

lung von Naturprodukten entstehen. Sie sind in der Regel bei der Verarbeitung unter bestimmten Bedingungen (Wärme, Druck) plastisch formbar oder sind plastisch geformt worden“.

Diese makromolekularen Verbindungen werden Polymere genannt. Innerhalb eines Makromoleküls und somit einer Polymerkette liegt eine niedermolekulare Einheit vor, welche sich vielfach wiederholt aneinanderreihet und somit ein Makromolekül bildet. Je mehr dieser Wiederholungseinheiten verknüpft sind, desto länger ist die resultierende Polymerkette. Die Art (struktureller Aufbau) der Wiederholungseinheit und dessen Anzahl (durchschnittliche Kettenlänge) innerhalb eines Polymers legen chemische und physikalische Eigenschaften fest. Durch zugeführte Zusätze (Additivierung) können die Eigenschaften beeinflusst und somit angepasst bzw. optimiert werden. Das resultierende Produkt aus dem Polymer und seiner Additivierung wird als Kunststoff bezeichnet.

Anstelle von „Kunststoff“ findet man vor allem in älterer Literatur ebenso wie im allgemeinen Sprachgebrauch auch die Bezeichnung „Plastik“ oder „Plaste“ (von lat. „plasticus“ mit der Bedeutung weich, verformbar, elastisch). Plaste war ein in der ehemaligen DDR offiziell eingeführter Begriff für Kunststoffe.

2.1.1 Herstellung von Kunststoffen

Ein Kunststoff entsteht durch die Additivierung des zuvor gefertigten Polymers indem beispielsweise Stabilisatoren, Zuschlagstoffe, Weichmacher oder Flammenschutzmittel sowie Zusätze in Form von Pigmenten und Füllstoffen zugefügt werden (vgl. hierzu Kapitel 5).

Die Herstellung von Polymeren basiert grundsätzlich auf drei zu unterscheidenden Reaktionsvorgängen:

- Polymerisation,
- Polykondensation und
- Polyaddition.

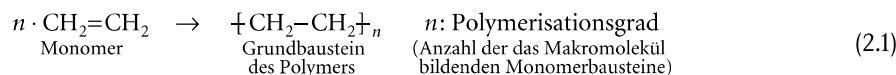
Die niedermolekularen Ausgangsmoleküle bezeichnet man bei allen Reaktionsvorgängen als *Monomere*.

2.1.1.1 Polymerisation

Monomere als Grundbausteine

Unter dem Begriff Polymerisation versteht man eine *Kettenreaktion*, bei der ungesättigte Moleküle zu Makromolekülen (Polymeren) verknüpft werden. Es bilden sich hierbei keine Reaktionsnebenprodukte.

Im Fall der Polymerisation besitzen die Monomere aufspaltbare Doppel- bzw. Dreifachbindungen. Nach erfolgter Reaktion stellen sie die Basis für die sich wiederholende Einheit dar und bilden somit den Grundbaustein eines Polymers. Als einfaches Beispiel ist die Entstehung von Polyethylen aufgezeigt:



Die Anzahl n der Grundbausteine, die eine Molekülkette bilden, nennt man auch Polymerisationsgrad. Die Gesamtheit der entstehenden Makromoleküle und somit der Polymerketten stellt das Polymer dar.

Der Ausdruck „Kettenreaktion“ hat nichts damit zu tun, dass in diesem Falle Molekülketten entstehen. Er bezeichnet vielmehr die Kinetik und somit das zeitliche Voranschreiten einer Reaktion, die aus drei zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen bzw. Reaktionsteilschritten besteht:

- Startreaktion,
- Kettenwachstumsreaktion und
- Abbruchreaktion.

Je nach Art der reaktionsfähigen Teilchen, die die Polymerisation der Monomere auslösen, unterscheidet man die folgenden Polymerisationsarten voneinander:

- radikalische Polymerisation,
- ionische Polymerisation (kationisch oder anionisch) und
- Polymerisation mit Übergangsmetallverbindungen.

Die Reaktionsteilschritte für die Polymerisation mit Übergangsmetallverbindungen können nicht ohne Einschränkung formuliert werden, da es bis heute noch nicht gelungen ist, den Reaktionsablauf dieser Polymerisationsart restlos aufzuklären.

2.1.1.1 Radikalische Polymerisation

Zum Start der Polymerisation zerfallen sogenannte Initiatoren durch Energiezufuhr in sehr reaktionsfähige Radikale (I^*), die dann mit den Monomeren (M) reagieren. Eine typische Initiatorklasse sind Peroxide wie beispielsweise Wasserstoffperoxid (H_2O_2) oder Dibenzoylperoxid.

Initiatoren bilden Radikale

Reaktionsablauf (Bild 2.1):

1. Startreaktion, d. h. die Initiatoren ($I-I$) zerfallen in ihre Radikale (I^*) durch Energiezufuhr.
2. Kettenwachstumsreaktion:
 - a) Die Radikale reagieren nun mit einem doppelt gebundenen Kohlenstoffatom eines Monomers (M ; in diesem Fall Ethen: $H_2C=CH_2$). Es resultieren eine Bindung zwischen dem Initiatorfragment und dem Kohlenstoffatom sowie ein Radikal am anderen Kohlenstoffatom der Doppelbindung.
 - b) Die neue reaktive Gruppe (Position des Radikals) reagiert Schritt für Schritt mit weiteren Doppelbindungen, wobei stets die Position des Radikals um einen Grundbaustein verschoben wird. Dies führt zu einer Verlängerung der Polymerkette. Da diese Art von Wachstum sehr schnell abläuft, spricht man von einer Kettenreaktion.
3. Abbruch, d. h. die Polymerisation kommt zum Stillstand durch:
 - a) Reaktion zweier Radikal-Enden von zwei Polymerketten unter Bildung einer Kohlenstoff-Kohlenstoff-Einfachbindung (Kombination). Es resultiert eine zu diesem Zeitpunkt vergleichsweise lange Kette mit vielen Wiederholungseinheiten (Grundbausteinen).

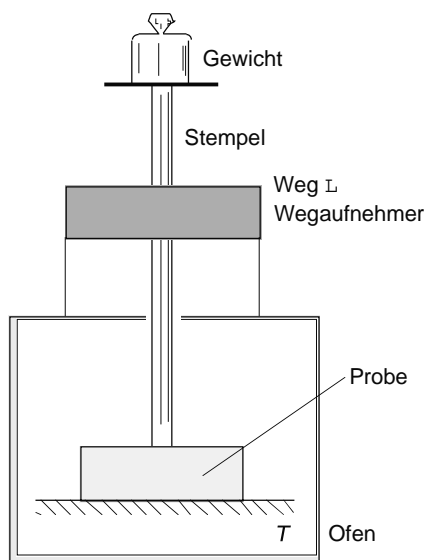


Bild 3.2
Prinzip der TMA (Thermomechanische Analyse)

3.1.3 Wärmeleitfähigkeit

gute Isolatoren Wie alle *Isolatoren* leiten auch Kunststoffe die Wärme nur schlecht. Bei Metallen sorgen die frei beweglichen Elektronen nicht nur für eine hohe elektrische Leitfähigkeit, sondern auch für eine gute Wärmeleitfähigkeit. Bei Kunststoffen, die zu den elektrischen Nichtleitern oder Isolatoren gehören, fehlen jedoch diese frei beweglichen Elektronen für den Wärmetransport. Wärme kann bei Kunststoffen vorzugsweise entlang der Molekülketten transportiert werden, was deutlich langsamer vonstattengeht.

Diese „isolierende“ Eigenschaft ermöglicht den Einsatz von Kunststoffen in vielen Anwendungsbereichen (z. B. Behälter für kalte und warme Flüssigkeiten), bereitet aber auf der anderen Seite Schwierigkeiten bei ihrer Verarbeitung, da die für die Verarbeitung notwendige Wärme nur langsam eingebracht bzw. am Ende der Verarbeitung wieder herausgeholt werden kann.

Schäume Die *Wärmeleitfähigkeit* λ von Kunststoffen ist etwa dreihundert- bis tausendmal kleiner als die von Metallen. Luft leitet die Wärme noch etwa 10-mal schlechter, so dass geschäumte Kunststoffe ein noch besseres Isoliervermögen besitzen und deshalb auch als *Wärmedämmmaterial* eingesetzt werden. Auf der anderen Seite kann die Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen durch Zugabe von metallischen Füllstoffen um ein Vielfaches gesteigert werden.

Temperaturabhängigkeit Die Wärmeleitfähigkeit bewegt sich für reine Kunststoffe im Bereich von $0,15 \text{ W}/(\text{mK}) \leq \lambda \leq 0,5 \text{ W}/(\text{mK})$ (Bild 3.3). Die Temperatur beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit bei amorphen Thermoplasten kaum. Bei teilkristallinen Thermoplasten hingegen sinkt die Wärmeleitfähigkeit bis zum Schmelzpunkt mit zunehmender Temperatur. Am Schmelzpunkt fällt die Leitfähigkeit deutlich ab, weil hier die kristallinen Bereiche, die die Wärme besser leiten als die amorphen, aufgeschmolzen werden.

Oberhalb der Schmelztemperatur ist eine Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit in der Regel nicht mehr vorhanden; eine Kunststoffschmelze besitzt also eine von der Temperatur nahezu unabhängige Wärmeleitfähigkeit.

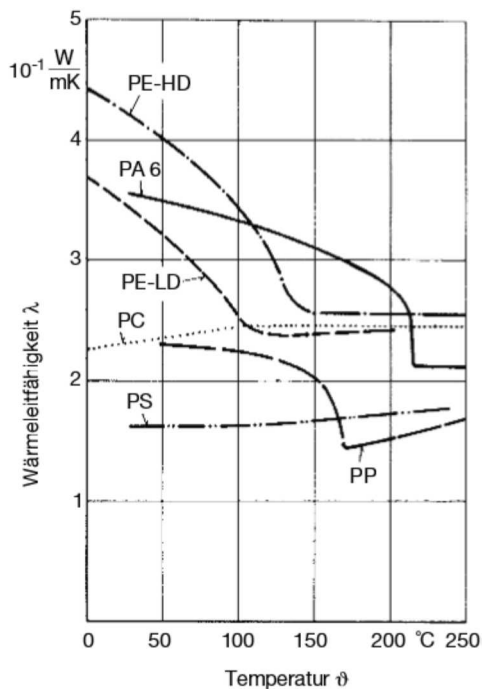


Bild 3.3
Wärmeleitfähigkeit verschiedener Thermoplaste

3.1.4 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärme ist der Quotient aus zugeführter Wärmeenergie und Temperaturerhöhung. Anschaulich betrachtet beschreibt sie, wieviel Energie je Masseneinheit benötigt wird, um eine beabsichtigte Temperaturerhöhung zu erreichen. Bei ungefüllten Kunststoffen liegt die spezifische Wärmekapazität c_p im Bereich von $0,4 \text{ kJ}/(\text{kgK}) \leq c_p \leq 2,7 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ (Bild 3.4). Amorphe Thermoplaste zeigen eine mit der Temperatur kontinuierlich ansteigende spezifische Wärmekapazität. Bei teilkristallinen Thermoplasten hingegen findet bei der Kristallitschmelztemperatur ein Phasenübergang statt. Zugeführte Wärmeenergie wird genutzt, um die Kristallite aufzuschmelzen. Währenddessen erhöht sich die Temperatur jedoch nicht.

Thermoplaste

Duroplaste ändern ihre spezifische Wärmekapazität beim *Aushärten* sehr deutlich. Während der Aushärtung wird Wärme frei, die zu einer Senkung der spezifischen Wärmekapazität führt. Bei einem ausgehärteten Duroplasten steigt die spezifische Wärme monoton kontinuierlich mit der Temperatur an, da in einem ausgehärteten Duroplasten auch bei höherer Temperatur keine chemische Reaktion stattfindet. Einziges Merkmal des Kurvenverlaufs ist die Glasübergangstemperatur, die mit zunehmendem Aushärtungsgrad gegen einen Grenzwert wächst.

Duroplaste

3.2.2.2 Carreau-Ansatz

Der *Carreau-Ansatz* beschreibt den Verlauf der Viskositätskurve mit einem Drei-Parameter-Modell der Form: Drei-Parameter-Modell

$$\eta = \frac{A}{(1 + B\dot{\gamma}^n)^{1/n}} \quad (3.12)$$

Hierbei beschreiben A die Nullviskosität, B die sogenannte reziproke Übergangsgeschwindigkeit und C die Steigung der Viskositätskurve im strukturviskosen Bereich (Bild 3.11).

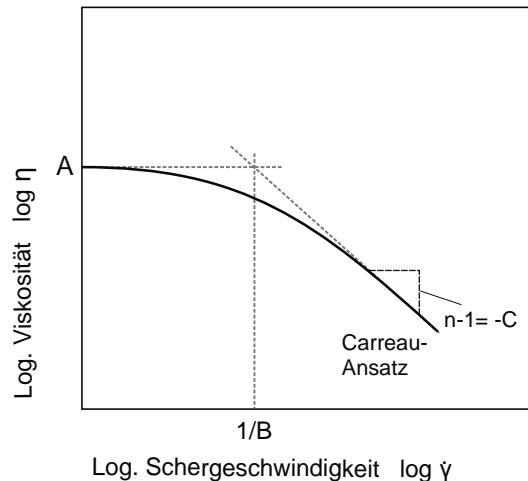


Bild 3.11 Beschreibung einer Viskositätskurve mit dem Carreau-Modell

Dieses Modell hat den Vorteil, dass es das tatsächliche Stoffverhalten innerhalb eines breiteren Schergeschwindigkeitsbereiches als der Potenzansatz richtig wiedergibt, und dass es auch für $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ sinnvolle Viskositätswerte liefert. Die Koeffizienten A , B und C können nur durch eine Regressionsrechnung aus Messdaten ermittelt werden. Der Aufwand ist damit höher als beim Potenzansatz, bei dem man leicht graphisch anhand einer Ausgleichsgeraden die Parameter bestimmen kann.

breiterer
Gültigkeitsbereich

3.2.3 Einfluss der Temperatur auf das Fließverhalten

Das Fließverhalten von Polymerschmelzen ist nicht nur von der Schergeschwindigkeit, sondern auch von der Temperatur T und (in geringerem Maße) vom hydrostatischen Druck p abhängig. (Auf die Druckabhängigkeit der Viskosität soll wegen ihrer in der Praxis meist geringen Bedeutung nicht eingegangen werden.) Die starke Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur ist offensichtlich in Bild 3.12 zu erkennen. In einer doppeltlogarithmischen Auftragung zeigen aber die

Masterkurve

Verläufe der Viskositätskurven bei unterschiedlichen Temperaturen eine große Ähnlichkeit im grundsätzlichen Kurvenverlauf. Die Kurven lassen sich ineinander überführen, wenn man sie längs einer Geraden mit der Steigung -1 verschiebt (*Temperaturverschiebungsprinzip*). Alle Kurven lassen sich so in einer sogenannten Masterkurve zusammenführen. Die Masterkurve ist unabhängig von der Temperatur (Bild 3.13).

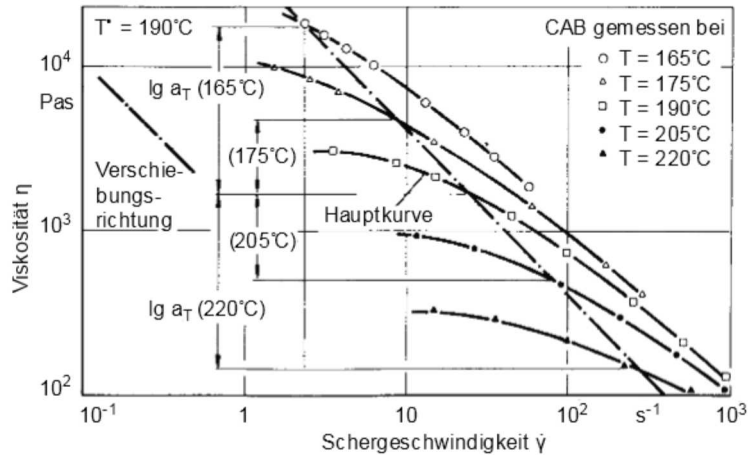


Bild 3.12 Viskositätsfunktionen bei verschiedenen Temperaturen (Verschiebungsprinzip: Temperaturverschiebungsfaktor $a_T [T]$)

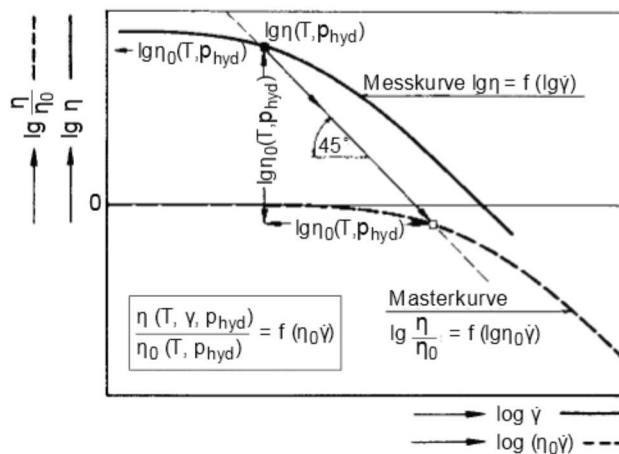


Bild 3.13 Temperatur- und druckinvariante Viskositätsfunktion

■ 4.2 Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Einflussfaktoren	Bei fast allen Anwendungen von Kunststoffen sind die mechanischen Eigenschaften in irgendeiner Form mitbestimmend. Für die mechanischen Eigenschaften, insbesondere das Spannungs-Dehnungs-Verhalten, spielen neben den von außen auf den Werkstoff einwirkenden Faktoren (wie Temperatur und umgebende Medien) Größe und Zeitdauer der Belastung eine entscheidende Rolle. Dies ist bei den <i>Thermoplasten</i> weit stärker als bei den <i>Duroplasten</i> oder den <i>faserverstärkten Kunststoffen</i> ausgeprägt. Für die Beurteilung des mechanischen Werkstoffverhaltens der Kunststoffe ist daher die übliche Angabe von Festigkeitswerten, wie der <i>Zugfestigkeit</i> , oder von elastischen Kenngrößen, wie dem <i>Elastizitätsmodul</i> , nicht ausreichend. Erst das Spannungs-Dehnungs-Verhalten beschreibt das Verhältnis von innerer Werkstoffanstrengung infolge von äußerlich angreifenden Kräften und den damit erzwungenen Materialdehnungen. Es stellt insofern eine wichtige Information für den Konstrukteur dar.
Beanspruchungsarten	Bezüglich der Beanspruchungsarten unterscheidet man zwischen <i>einachsiger</i> und <i>zweiachsiger Belastung</i> , wobei man prüftechnisch einachsige Belastung vorzieht und nur in besonderen Fällen eine zweidimensionale Belastung aufbringt. Im Wesentlichen werden Probekörper in Biege-, Druck-, Zug-, Scher- und Schubversuchen auf ihr Verhalten unter diesen Belastungsarten untersucht. Diese gängigen Prüfmethoden sind in verschiedenen Normen und Prüfvorschriften beschrieben.
Prüfmethoden	Anhand des Zugversuches lassen sich die Vorgänge im Probekörper beim einachsigen Belastungszustand am einfachsten beschreiben, weshalb im Folgenden vorwiegend auf diese Beanspruchungsart aufgebaut wird. Bei <i>Biege-, Druck- und Scher- bzw. Schubbeanspruchung</i> ist trotz quasi-einachsiger Kraftwirkung mit Überlagerung von Spannungen im Werkstoff insbesondere bei <i>anisotrop</i> aufgebautem Material, wie z. B. geschichteten oder gefüllten Systemen, zu rechnen. Beim Zugversuch werden stabförmige Probekörper mit vorgegebener Geschwindigkeit durch eine äußerlich angreifende Kraft, die parallel zur Stablängsachse wirkt, beaufschlagt, wobei senkrecht zur Belastungsrichtung keine äußeren Kräfte herrschen und demzufolge keine Dehnungsbehinderung eintritt. Während des Belastungsvorgangs werden die Längsverformungen gemessen und als Funktion der Zugkraft aufgezeichnet. Auf diese Weise erhält man eine Kraft-Verformungs-Kurve, die unter Berücksichtigung einflussgebender Prüfparameter rechnerisch oder durch geeignete Messtechnik in einem sogenannten <i>Spannungs-Dehnungs-Diagramm</i> ausgedrückt werden kann.

4.2.1 Kurzzeit-Verhalten

Kurzzeitzugversuche	Für die <i>Dimensionierung</i> von Kunststoffherzeugnissen sind, wie bei anderen Werkstoffen auch, Kennwerte aus Kurzzeitversuchen, die unter den oben genannten Belastungsarten ermittelt wurden, grundlegend. In Bild 4.4 werden die Grundformen von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen für sprödes, zähelastisches und weichelastisches Material gezeigt. Bei den Kurzzeit-Versuchen wird die <i>Beanspruchungsgeschwindigkeit</i> so gewählt, dass eine zügig wachsende Spannung oder Verformung derart eintritt, dass der charakteristische Werkstoffkennwert, in der Regel <i>zerstö-</i>
---------------------	--

rendes oder *instabiles Probenversagen*, innerhalb von wenigen Minuten eintritt. Die Beanspruchungsgeschwindigkeit kann durch eine konstante Laststeigerung oder durch eine konstante *Verformungsgeschwindigkeit* erzeugt werden, wobei die letztere Variante bei der Prüfung von Kunststoffen üblich ist.

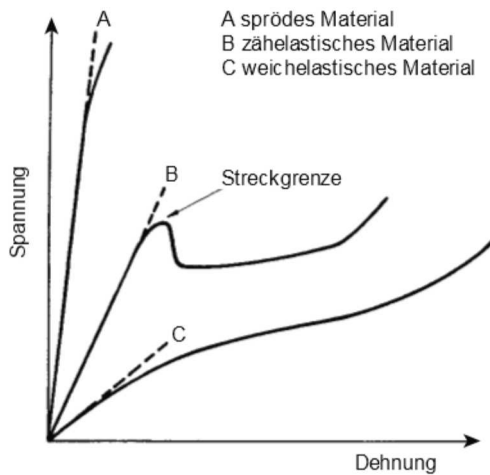


Bild 4.4
Grundformen von Spannungs-Dehnungs-Kurven

Da die Kunststoffe zu den viskoelastischen Werkstoffen zählen, sind ihre mechanischen Eigenschaften von der Dauer und der Geschwindigkeit der Beanspruchung abhängig. Bild 4.5 zeigt den Einfluss, den unterschiedliche Dehngeschwindigkeiten auf die Zugfestigkeit von einigen thermoplastischen Kunststoffen ausüben. Dabei wird deutlich, dass die verschiedenen Kunststoffe bei charakteristischen Dehngeschwindigkeiten eine maximale Festigkeit aufweisen. Diese Dehngeschwindigkeiten liegen zum Teil deutlich über den bei *Kurzzeit-Beanspruchung* gewählten.

viskoelastischer
Werkstoff

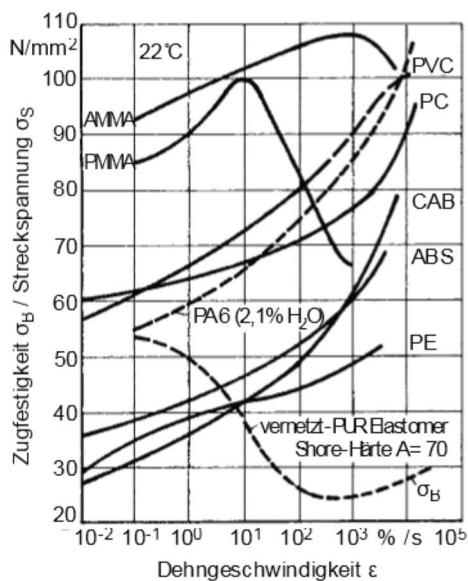


Bild 4.5
Abhängigkeit der Zugfestigkeit bzw. der Streckspannung von der Dehngeschwindigkeit (nach Oberbach)

Angriff *irreversible Veränderungen* der Kunststoffmoleküle bewirken, wie Kettenabbau, Vernetzung, Änderungen in der chemischen Zusammensetzung der Molekülketten, z. B. Oxidation usw.

Wirkung Die Wirkungsweise physikalisch aktiver Medien beruht auf einer Aufweitung des Molekülverbandes (äußerlich als Quellung erkennbar). Dadurch wird die Beweglichkeit der Makromoleküle erhöht, Härte und Festigkeit nehmen ab, die elektrischen und andere physikalische Eigenschaften verändern sich. Der Grad der Eigenschaftsänderung hängt mit der *Polarität* von Werkstoff und Medium zusammen („Gleiches löst Gleiches“):

- Nichtpolare Polymere wie PS, PE, PIB quellen oder lösen sich in nichtpolaren *Lösungsmitteln* (z. B. Benzin, Benzol), während sie gegen polare Lösungsmittel (Wasser, Alkohol) beständig sind.
- Polymere, die polare Gruppen enthalten, wie Polyvinylalkohol, Polyamid u. a., sind gegen nichtpolare Substanzen beständig, quellen oder lösen sich dagegen in polaren Stoffen.

Lagerung Bei der Ermittlung der Widerstandsfähigkeit gegen Medien werden Probekörper ohne äußere mechanische Belastung in diesen gelagert. Nach steigenden Lagerungszeiten werden bestimmte Eigenschaftsänderungen ermittelt; die Ergebnisse pauschal zusammengefasst in Bewertungsmaßstäben wie z. B. beständig, bedingt beständig und unbeständig (Tabelle 4.1). Diese Klassifizierung gibt natürlich nur einen groben Anhalt über die Verwendbarkeit eines Kunststoffes für einen speziellen Fall. Eine Erprobung unter Praxisbedingungen ist in vielen Fällen unerlässlich.

Tabelle 4.1 a) Widerstandsfähigkeit einiger Thermoplaste bei Raumtemperatur

	Säuren			Laugen		Kohlenwasserstoffe			Fette, Öle
	schwach	stark	oxydierend	schwach	stark	aliphatisch	chloriert	aromatisch	
Polyethylen hoher Dichte	+	+	-	+	+	+	-	o	+
Polypropylen	+	-	-	+	+	+	-	o	+
PVC-U	+	o	-	+	+	+	-	-	+
PVC-P	+	+	-	+	o	-	-	-	o
Polymethylmethacrylat	+	o	o	+	o	+	-	-	+
Polystyrol	+	o	-	+	+	o	-	-	+
Polytetrafluorethylen	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Polyamid	-	-	-	+	o	+	o	+	+
Polycarbonat	+	+	o	-	-	+	-	-	+

+ = beständig o = bedingt beständig - = unbeständig

Tabelle 4.1 b) Widerstandsfähigkeit einiger Duroplaste bei Raumtemperatur

	Säuren			Laugen		Kohlenwasserstoffe			Fette, Öle
	schwach	stark	oxydierend	schwach	stark	aliphatisch	chloriert	aromatisch	
UP-Harze	o	-	-	+	+	+	o	-	+
EP-Harze	+	-	-	+	o	+	o	+	+
vernetzte Polyurethane	o	-	o	+	-	+	o	+	o
elastische Polyurethane	+	-	-	o	o	+	-	-	+
Silikonharze	+	-	-	+	+	o	-	o	+
Harnstoffharz-Pressmasse	o	-	-	+	o	+	+	+	+
Melaminharz-Pressmasse	o	-	-	+	-	+	+	+	+
Phenolharz-Pressmasse	+	-	-	+	-	+	+	+	+

+ = beständig o = bedingt beständig - = unbeständig

4.7.2 Spannungsrisssbeständigkeit

Bei Metallen ist die Erscheinung der *Spannungskorrosion* allgemein bekannt. Sie führt bei gleichzeitiger Einwirkung bestimmter Medien und Zugspannungen zur verformungslosen Trennung mit *inter-* oder *transkristallinem* Verlauf. Die Ursachen sind meist elektrochemischer Art.

Metalle

Auch bei Kunststoffen tritt diese Brucherscheinung unter der kombinierten Einwirkung innerer *Orientierungs-* oder *Abkühlspannungen* (herstellbedingt) oder/und äußerer Zugspannungen und bestimmter Flüssigkeiten oder Dämpfe auf. Da es sich hierbei jedoch meist um rein physikalische Prozesse (Benetzung, Diffusion, Quellung) handelt, werden diese Erscheinungen mit *Spannungsrisssbildung* bezeichnet (kein Korrosionsprozess).

Spannungskorrosion

Fast alle Thermoplaste zeigen bei bestimmten Medien Spannungsrisssbildung, wobei folgende Faktoren das Ausmaß noch erhöhen:

Risssbildung

- höhere Zugspannung,
- längere Einwirkdauer,
- höhere Temperatur,
- höhere Kristallinität,
- geringeres Molekulargewicht.

In der Praxis treten Spannungsrisse häufig dann auf, wenn Formteile nachträglich mit ungeeigneten Klebstoffen verbunden oder mit lösungsmittelhaltigen Farben bedruckt werden bzw. im Einsatz mit spannungsrisssauslösenden Medien in Kontakt kommen. Besonders deutlich sind Spannungsrisse bei ungefüllten, glasklaren Kunststoffen wie PS, SAN, PMMA und PC zu erkennen.

Spannungsrisse

6.1.1 Der Extruder

Der Extruder ist das Kernstück jeder Extrusionsanlage und hat die Aufgabe, eine homogene Schmelze in ausreichender Menge mit der notwendigen Temperatur und dem notwendigen Druck in das nachfolgende Werkzeug zu fördern. Ein Extruder besteht grundsätzlich aus (Bild 6.2):

- dem Maschinenbett,
- dem Antrieb (Motor, Getriebe, Rückdrucklager),
- der Plastifiziereinheit (Einfülltrichter, Schnecke(n), Zylinder, Heizung, Kühlung) und
- dem Schaltschrank (Steuerung, Regeleinrichtung, Stromversorgung).

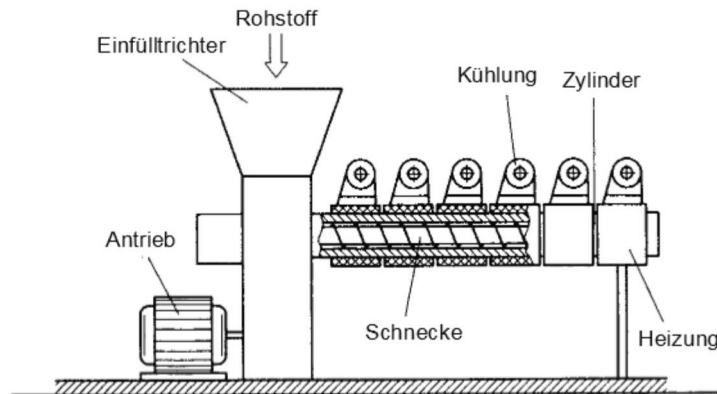


Bild 6.2 Prinzipdarstellung eines Extruder

Je nach Anwendung werden unterschiedliche Extrudertypen eingesetzt. Heute werden überwiegend die folgenden vier Extrudertypen eingesetzt:

- Konventioneller Einschneckenextruder mit glatter Einzugsbuchse und Dreizonenschnecke,
- Fördersteifer Einschneckenextruder mit genuteter Einzugsbuchse und Schnecke mit Misch- und evtl. Scherelementen,
- gleichlaufender Doppelschneckenextruder und
- gegenlaufender Doppelschneckenextruder.

Eine Übersicht über die Einteilung der verschiedenen Extrudertypen zeigt Bild 6.3.

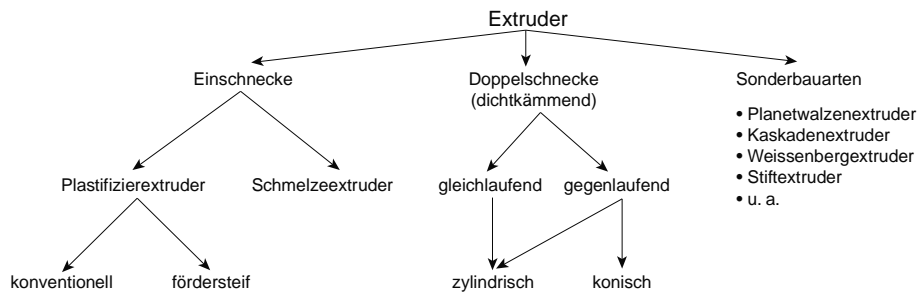


Bild 6.3 Einteilung der Extrudertypen

6.1.1.1 Der Einschneckenextruder

Das Prinzip des Einschneckenextruders zeigt Bild 6.4. Im ersten Drittel der Schnecke, der Einzugszone, wird der gewöhnlich granulatförmige Rohstoff eingezogen und zur Umwandlungszone bzw. Aufschmelzzone weitergefördert. Dort wird er verdichtet, entlüftet und in den fließfähigen Zustand überführt. Die Austragszone bzw. Meteringzone dient der thermischen und stofflichen Homogenisierung und dem Druckaufbau zur Überwindung des nachfolgenden Formwerkzeugs.

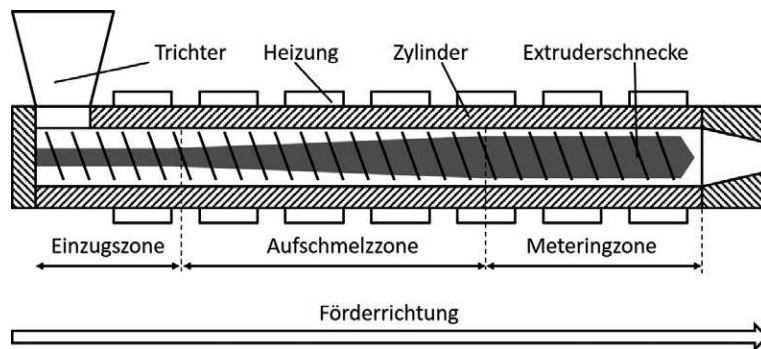


Bild 6.4 Schematische Darstellung des konventionellen Einschneckenextruders

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Schmelze- und Plastifizierextruder. Das Grundkonzept beider Maschinentypen, d. h. Steuerung, Antrieb, Getriebe etc., ist weitgehend identisch. Je nach Art des zu fördernden Materials (Schmelze oder Granulat) ergeben sich für Schmelzeextruder und Plastifizierextruder unterschiedliche, spezifische Schnecken-geometrien.

Die an einen Schmelzeextruder gestellten Aufgaben beschränken sich auf die Förderung und die Homogenisierung der Schmelze. Da dieser Extrudertyp nur wenig verbreitet ist, wird auf ihn im Folgenden nicht weiter eingegangen. Alle weiteren Ausführungen beziehen sich auf den Plastifizierextruder.

Die wichtigsten Aufgaben eines Plastifizierextruders sind die Förderung, die Plastifizierung und die thermische und stoffliche Homogenisierung des Materials (siehe Tabelle 6.1). Die Förderung des Materials im Extruder wird durch das Haften der

Schmelzeextruder

Plastifizierextruder

druckloses Gießen sind nicht mehr möglich, so dass hohe Drücke zur Formgebung erforderlich sind.

6.3.1.1 Verfahrensablauf

Für das Spritzgießen ist es notwendig, das vom Rohstoffhersteller meist in Granulat- oder Pulverform (Elastomere üblicherweise in Form von Streifen) angelieferte Material in einen fließfähigen Zustand zu überführen. Dafür wird zunächst das Material durch Rotation der Schnecke aus dem Maschinentrichter eingezogen und durch Dissipation und Wärmeleitung über den temperierten Zylinder plastifiziert (Bild 6.36). Nach Schließen des Werkzeuges (Schritt 1) wird das plastifizierte Material durch axialen Vorschub der Schnecke in das Werkzeug eingespritzt (Schritt 2).

Spritzgießzyklus

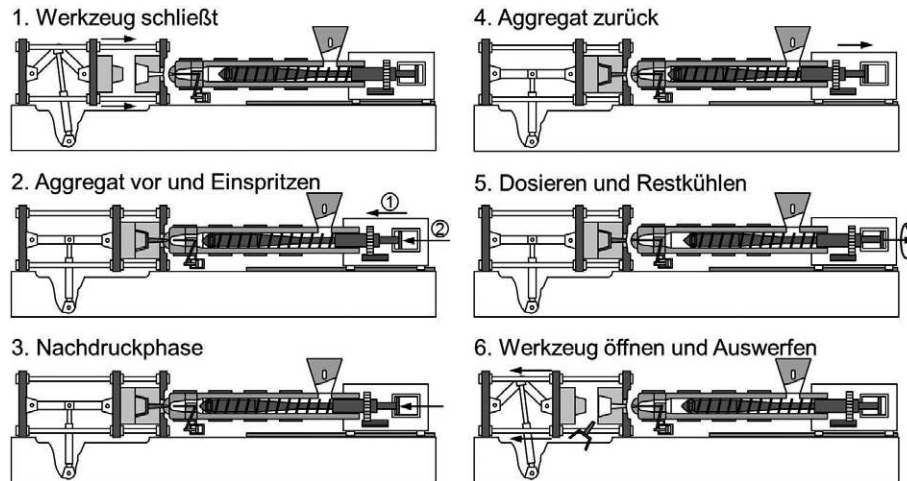


Bild 6.36 Verfahrensablauf beim Spritzgießen

Bei thermoplastischen Materialien wird das Werkzeug gekühlt, so dass die Schmelze mit Eintritt in das Werkzeug abkühlt und mit Unterschreiten der Erstarrungstemperatur (Glasübergangs- bzw. Kristallisationstemperatur) erstarrt. Durch die Abkühlung tritt eine Volumenschrumpfung ein, die durch eine weitere Schmelzeförderung in der Nachdruckphase (Schritt 3) bestmöglich kompensiert wird. Im Falle vernetzender Materialien (Duroplaste, Elastomere) wird das Werkzeug beheizt und somit der Vernetzungsvorgang initiiert. Nach Abschluss der Nachdruckphase wird das Aggregat zurückgefahren (Schritt 4) und es wird in der Dosierphase (Schritt 5) die Schmelze für den nächsten Zyklus erzeugt. Der letzte Verfahrensschritt umfasst das Öffnen des Werkzeuges und Auswerfen des Formteils (Schritt 6).

Die skizzierten Verfahrensschritte, die sich zeitlich teilweise auch überdecken, sind Bestandteil jedes Spritzgießzyklus. Die Regeleinheit der Spritzgießmaschine übernimmt dabei die Steuerung bzw. Regelung der einzelnen Verfahrensschritte (Bild 6.37).

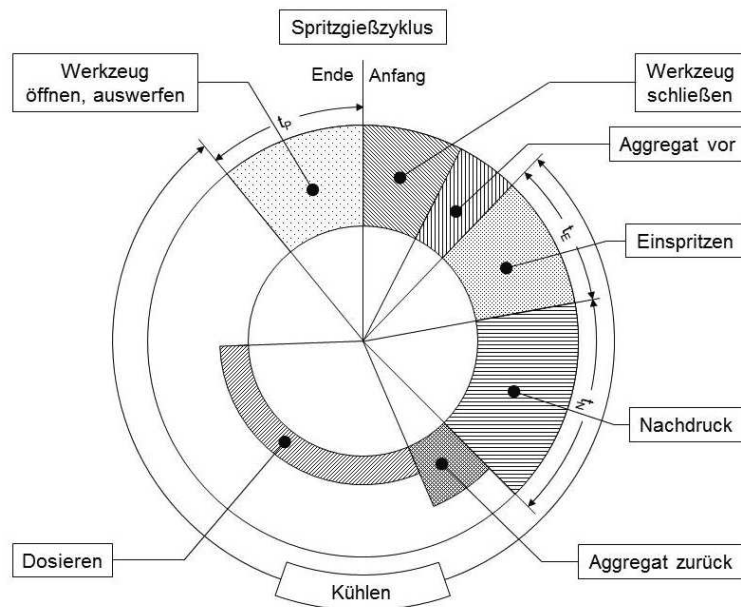


Bild 6.37 Spritzgießzyklus

Ziel bei der wirtschaftlichen Produktion eines Formteils ist es, die für diesen Ablauf benötigte *Zykluszeit* zu reduzieren, um eine hohe *Ausstoßleistung* zu erreichen. Wie in Bild 6.37 zu sehen, nimmt die Kühlzeit einen erheblichen Teil der Zykluszeit ein und bestimmt daher die Produktivität des Prozesses. Da die Zykluszeit proportional zum Quadrat der Bauteilwanddicke ist ($t_k \sim d^2$), kommt der Bauteilgeometrie eine große Bedeutung zu. Darüber hinaus sind die Temperaturdifferenzen zwischen Formmasse und Werkzeug sowie die thermischen Stoffeigenschaften der Formmasse von Bedeutung.

Zusätzlich zu den oben genannten Verfahrensschritten laufen weitere Funktionen ab, wie die Bewegung des Aggregates oder die Betätigung von Kernzügen und ähnlichen Funktionseinheiten, jedoch ändern diese nichts am grundsätzlichen Verfahrensablauf.

6.3.1.2 Maschinenaufbau

Baugruppen Unabhängig vom zu verarbeitenden Material ist eine Spritzgießmaschine aus den folgenden Baugruppen aufgebaut (Bild 6.38): Das *Maschinenbett* nimmt das *Plastifizieraggregat* und die *Schließeinheit* auf. Letztere dient dazu, die Öffnungs- und Schließbewegung des *Werkzeugs* während des Produktionszyklus zu realisieren. Der Ablauf des Spritzgießzyklus wird über eine *Regeleinheit*, welche meist in einem von der Maschine getrennten Schaltschrank untergebracht ist, koordiniert. Nicht zur Maschine gehörig, aber für den Prozess unerlässlich ist das Spritzgießwerkzeug, in dem die geometrische Ausformung stattfindet. Während die Spritzgießmaschine innerhalb bestimmter Schussgewichte und Werkzeugabmessungen uni-

tragsaggregate eingesetzt. Bei der Verwendung von Mehrkomponentensystemen ist für eine homogene Vermischung der Komponenten vor dem Auftragen Sorge zu tragen.

- Abwarten, bis der Klebstoff ^{EU}verbindungsfähig ist:
Je nach Art des Klebstoffes müssen gewisse Zeitabstände vor dem Zusammenfügen der Teile eingehalten werden. So ist z. B. bei der Verwendung von Lösemittelklebstoffen dafür zu sorgen, dass die *Ablüftzeit* (Zeit, bis das Lösemittel verdunstet) eingehalten wird. Beim Kleben mit reinen Lösemitteln darf man nur eine begrenzte Zeit (offene Zeit) warten, damit das Lösemittel noch hinreichend wirksam wird.
- Fügen und Fixieren:
Es genügt häufig ein Andrücken von Hand oder mit Walzen, bei größeren Teilen werden Pressen eingesetzt. Der Druck soll die Luft zwischen den Klebflächen verdrängen. Bei sogenannten „Sekundenklebern“ wird die maximale Klebfähigkeit durch kurzes Aufbringen eines hohen Druckes erreicht. Physikalisch oder chemisch abbindende Klebstoffe erfordern in der Regel Einrichtungen zum Fixieren der Teile während der Abbindephase. Eine Temperaturerhöhung beschleunigt in der Regel den Abbindevorgang. Der Anpressdruck beeinflusst außerdem die Klebfilmstärke.
- Aushärten des Klebstoffes ^{EU}
- Entfernen der Fixierung:
Nach Beendigung der Klebung muss vielfach eine weitere Zeit abgewartet werden, bis die Klebverbindung belastet werden darf. Diese Wartezeit kann bis zu einigen Tagen betragen.

Bei richtiger Durchführung ist das Kleben bei Kunststoffen heute als vollwertiges Fügeverfahren anzusehen, mit dem unlösbare Verbindungen mit hohem Kraftschluss hergestellt werden können.

■ 7.4 Mechanische Bearbeitung

Die spanende Bearbeitung von Kunststoffteilen ist trotz der moderner Fertigungsverfahren von Kunststoffformteilen, wie z. B. durch Spritzgieß- oder Spritzpressverfahren, oft nicht zu vermeiden. Formteile müssen nachbearbeitet werden (Entgraten), komplizierte Einzelteile z. B. gebohrt, geschliffen oder maßlich angepasst werden und Halbzeuge müssen zugeschnitten und in eine gewünschte Form gebracht werden. Insbesondere bei Einzelanfertigungen, Prototypen und sehr kleinen Serien werden spanende Fertigungsverfahren auch in der Kunststofftechnik oftmals eingesetzt. Weiterhin spielen sie eine zentrale Rolle bei der handwerklichen Anwendung von Kunststoffprodukten, wie z. B. Rohren, Fenstern, Fassadenisolierungen, bei der Reparatur von Kunststoffbauteilen in der Fahrzeugtechnik und Windrädern sowie vielen weiteren Anwendungsfeldern.

Dabei müssen jedoch die Eigenschaften des Werkstoffes Kunststoff berücksichtigt werden. Da die Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe sehr gering ist, sind *Schnittgeschwindigkeit*, *Vorschub* und *Schneidengeometrie* so zu wählen, dass die entstehende

spanende Bearbeitung

Wärme weitgehend mit dem Span abgeführt wird. Thermoplaste dürfen sich dabei nicht über 60 °C und Duroplaste nicht über 150 °C erwärmen. Ist eine Kühlung erforderlich, muss darauf geachtet werden, nur solche *Kühlmedien* zu verwenden, die den Werkstoff weder anlösen noch anquellen. Für die Bearbeitung werden Werkzeuge aus Schnellarbeitsstahl (SS-Stahl), Hochleistungsschnellarbeitsstahl (HSS-Stahl), Hartmetall (Sinterlegierung von Metallkarbid), Diamant (Polykristallin-Diamant, PKD; Bordotierter Diamant, BDD) und Korund eingesetzt.

7.4.1 Sägen

Kreissägen eignen sich zum Herstellen gerader Schnitte. Als Sägeblätter kommen nur Schnellarbeitsstahl bzw. hartmetallbestückte Sägeblätter in Frage, die ungeschränkt und hohlgeschliffen sein müssen (Bild 7.28). Bei dünnen Tafeln und harten Werkstoffen ist eine kleine *Zahnteilung* erforderlich. Der Antrieb der Kreissägen ist stärker zu dimensionieren als bei der Holzbearbeitung. Richtwerte für das Sägen von Kunststoffen enthält Tabelle 7.4.

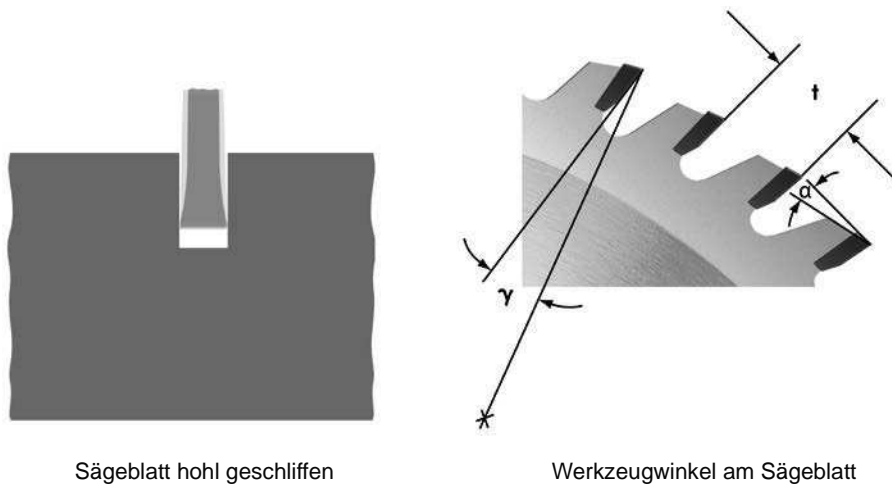


Bild 7.28 Zahngestaltung und Werkzeugwinkel bei Sägeblättern

Der Säge Tisch soll beim Sägen, besonders bei spröden Kunststoffen, so eingestellt sein, dass die Zähne nur gering über die Oberfläche der zu sägenden Platte hinausragen. So werden Absplitterungen des Materials beim Durchstoßen des Sägeblattes verhindert, und es wird ein sauberer Schnitt gewährleistet.

Bandsäge:
Zahnteilungen

Rohre, Blöcke und dickere Tafeln werden mit der Bandsäge zugeschnitten. Auch *Kurvenschnitte* werden mit der Bandsäge vorteilhaft ausgeführt. Bei Bandsägeblättern sind die Zähne im Allgemeinen leicht geschränkt, um das Verschmieren der Zahnspalten durch Späne zu vermeiden. Die gegenseitigen Beziehungen zwischen den optimalen Zahnteilungen, den Schnittgeschwindigkeiten und den Materialdicken sind von der Art des Kunststoffes abhängig. Genaue Angaben darüber befinden sich in Tabelle 7.4.

7.4.2 Fräsen

Werkzeugwinkel Fräser zur Bearbeitung von Kunststoffen haben im Gegensatz zu Fräsern zur Bearbeitung von Metall eine geringere Schneidenzahl, gegenüber Fräsern zur Holzbearbeitung jedoch meist größere Schneidenzahlen, mit Ausnahme der einschneidigen Oberfräser. Die Fräser bestehen aus Schnellarbeitsstahl oder Hartmetall, sie können auch hartmetallbestückt sein. Die Werkzeugwinkel bei Fräsern sind in Bild 7.29 dargestellt. Die Schnittgeschwindigkeit soll möglichst hoch und der Vorschub verhältnismäßig klein gehalten werden, um ein Splintern spröder Werkstoffe zu verhindern. Zur Vermeidung von Materialschädigung ist hier eine intensive Kühlung wichtig. Beim *Umfangs-* und *Formfräsen* von Thermoplasten sollten die Werkzeuge nicht mehr als zwei Schneiden haben, damit die *Spanräume* genügend groß sind und Schwingungen aufgrund der Schneidezahl klein bleiben. Die größten Schnittleistungen sind bei hohen Oberflächengüten mit *Einschneidenwerkzeugen* zu erreichen. Für plane Flächen ist das *Stirnfräsen* wirtschaftlicher als das Umfangsfräsen.

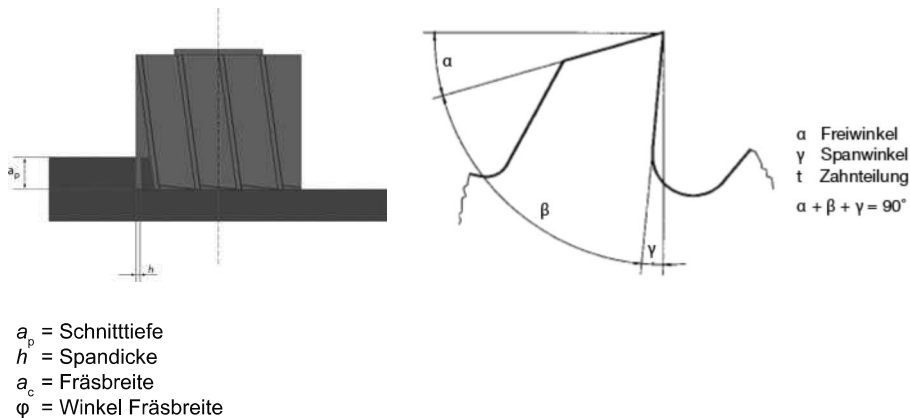


Bild 7.29 Werkzeugwinkel bei Fräsen

Spanwinkel Allgemein gilt die Regel: Der Spanwinkel geht umso mehr von positiven Werten gegen Null, je härter der Werkstoff und je dünner das Werkstück ist. Die Schneidenzahl ist umso kleiner, je weicher der Werkstoff ist, dagegen ist der Vorschub größer, um die Wärme mit dem Span abzuführen. Nähere Angaben können der Tabelle 7.5 entnommen werden.

Tabelle 7.5 Richtwerte für das Fräsen von Kunststoffen nach VDI-Richtlinie 2003

Kunststoff	Kurzzeichen	Werkzeug	α	γ	v_c
Duroplaste Organische Füllstoffe Schichtpressstoffe und Pressstoffe	Hp Hgw GFK	SS HM	bis 15 bis 10	15 bis 15 5 bis 15	bis 10 bis 1000
	Inorganische Füllstoffe	HM Diamant	bis 10 bis 10	5 bis 15 5 bis 15 Konzentration ca. 50 Korngröße D 1 bis 10	bis 1000 bis 1500
Thermoplaste Polyethylen, Polyethacrylat und Polystyrol Polycarbonat und Styrolacrylnitril Acrylnitril, Acrylnitril, Styrolcopolymer Styrolacrylnitril, Polycarbonat Polymethylmethacrylat Polylactid Polycarbonat Polyurethan Polychlorid hart und Polychlorid Celluloseester Polyolefin Polyamid	PMM PMMA PS S S S S POM P P P P P P	SS	bis 10	1 bis 5	bis 1000
	5 bis 10		bis 10	bis 1000	
	5 bis 10		bis 10	bis 1000	
	5 bis 10 5 bis 15		bis 15	bis 1000	
	5 bis 15		bis 15	bis 1000	

v_c Schnittgeschwindigkeit in m/min
 a_p Vorschub pro Zahn bis 0,5 mm betragen
 Hp Hartpapier
 Hgw Hartgewebe
 GFK Glasfaserverstärkte Kunststoffe

7.4.3 Schleifen und Polieren

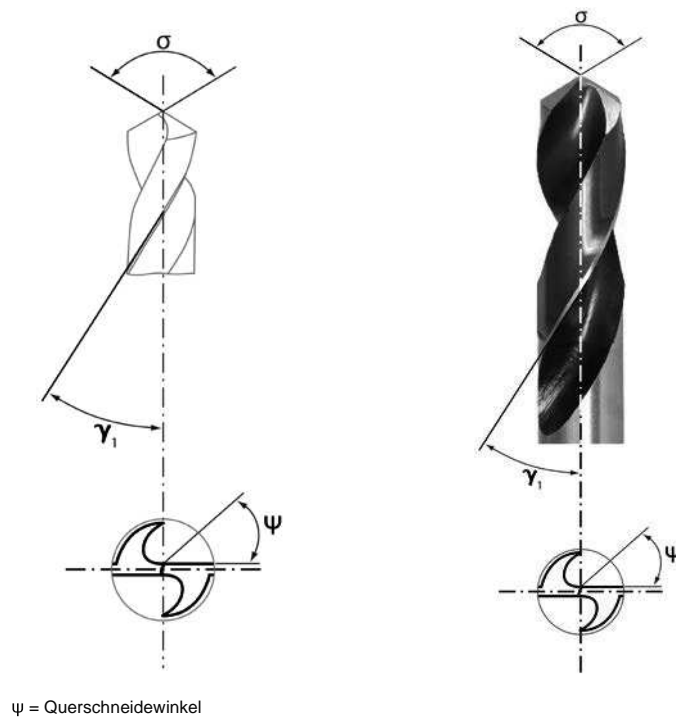
Das Schleifen wird bei der Kunststoffverarbeitung wenig angewandt. Die Nachbehandlung von Sägeschnitten oder das *Verputzen* von Sägeschnitten kann durch Schleifen sowohl mit handelsüblichen Schleifpapieren (mit groben bis staubfeinen Körnungen) als auch mit Schleifbändern geschehen. Die Schleifgeschwindigkeit bei umlaufenden Schleifbändern soll etwa 10 m/s betragen. Duroplaste können im Allgemeinen gut durch Schleifen bearbeitet werden, während Thermoplaste wegen der hohen Wärmeentwicklung sehr stark zum „Schmieren“ neigen. Durch *Polieren* erhält man seidenmatte bis hochglänzende Oberflächen. Das Polieren kann von Hand oder maschinell mit *Filz-* oder *Schwabbelnscheiben* erfolgen. Die dabei verwendeten Poliermittel haben wesentlichen Einfluss auf die Oberflächengüte.

Voraussetzung für eine gute Politur ist, dass die zu beseitigenden Oberflächenunebenheiten (Kratzer, Riefen) nur gering sind. Beim Polieren von Thermoplasten ist darauf zu achten, dass durch die entstehende Reibungswärme die Oberflächen nicht zu hoch erwärmt werden bzw. schmelzen. Dies lässt sich durch mehrmaliges Unterbrechen des Poliervorganges erreichen.

Schleifgeschwindigkeiten

7.4.4 Bohren

Wendelbohrer Bohren kommt in der Werkstatt und in der Fertigung sehr häufig vor. Die fast überall vorhandenen Hand- oder Ständerbohrmaschinen können dafür verwendet werden. Die für die metallischen Werkstoffe bekannten *Wendelbohrer* sind für die Kunststoffe fast immer anwendbar. Von großem Vorteil sind Wendelbohrer mit steilem Drall, da sie eine gute *Spanabfuhr* gewährleisten. Die Spitzenwinkel bei Thermoplasten betragen im Allgemeinen 60° bis 90° . Werkzeugwinkel bei Wendelbohrern sind in Bild 7.30 dargestellt. Genauere Angaben über die Schneidengeometrie sind werkstoffabhängig in Tabelle 7.6 aufgeführt.



ψ = Querschneidwinkel

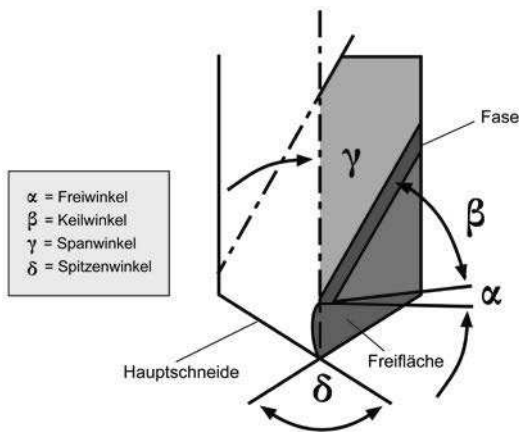


Bild 7.30
Werkzeugwinkel bei Wendelbohrern

Tabellle 7.6 Richtwerte für das Bohren von Kunststoffen nach VDI-Richtlinie 2003

Kunststoff	Kurzzeichen	Werkzeug	α	γ	ϕ	η	s
Duroplaste	Schichtpressstoff und Pressstoff	SS HM	6 bis 8 6 bis 8	6 bis 1 6 bis 1	1 bis 1 1 bis 1	1 bis 1 1 bis 1	1 bis 1 1 bis 1
	Organische Füllstoffe		6 bis 8	6 bis 6	8 bis 1	8 bis 1	durch Wasser und Füllstoffe
Thermoplaste	Organische Füllstoffe	HM	6 bis 8	6 bis 6	8 bis 1	8 bis 1	durch Wasser und Füllstoffe
	Polymethacrylate und Polymere	PMM PMMA	8 bis 8	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Polystyrol und Styrol	PS	8 bis 8	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Acrylnitrilpolymere	SN	8 bis 8	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Acrylnitrilradien	AN	8 bis 8	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Styrolpolymere	St	8 bis 1	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Polymethacrylate	POM	8 bis 8	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Polymethacrylate	P	8 bis 8	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Polacetal	P	8 bis 8	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Polycarbonat	P	16	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Polibromethan	P	8 bis 1	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Polychlorid hart und Polymere	P	8 bis 1	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Celluloseester	P	8 bis 1	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Polylein	P	1 bis 1	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6
	Polylid	P	1 bis 1	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6	6 bis 6

v Schnittgeschwindigkeit in $\frac{m}{min}$
 s Vorschub $\frac{mm}{U}$
 ϕ Bohrer diameter soll ca. $\frac{1}{6}$ betragen
 Hp Hartpapier
 Hgw Hartgewebe
 GFK Glasfaser verstärkter Kunststoff

Bohrerübermaß Wegen der starken Ausdehnung der Kunststoffe durch die beim Bohren entstehende Reibungswärme fallen die Bohrungen um 0,05 bis 0,1 mm enger als der Bohrerdurchmesser aus. Man wählt daher in der Praxis ein entsprechendes Bohrerübermaß. Beim Bohren tiefer Löcher lüftet man den Bohrer öfters und kühlt im Allgemeinen mit Druckluft. Bei leicht schmierenden Werkstoffen wie PE und PP ist bei kleinen Schnittgeschwindigkeiten ein sehr großer Vorschub von Vorteil. So kann die Reibungswärme mit dem Span abgeführt werden.

Bei Bohrungen im Bereich von 10 bis 150 mm Durchmesser empfiehlt sich, für dünnwandige duroplastische Werkstücke Hohlbohrer mit Diamantkrone einzusetzen (Bild 7.31), wobei die Schnittflächen nach der spanenden Bearbeitung mit Harz zu versiegeln sind.



Bild 7.31
Diamanthohlbohrer

7.4.5 Drehen

Drehmaschinen Die verwendeten Drehmaschinen sollten schnelllaufend, in der Einstellbarkeit der *Spindeldrehzahl* weitgehend variabel und mit einer Luft- und Flüssigkeitskühlung ausgerüstet sein. Die Schnittgeschwindigkeiten betragen je nach Werkstoff bis zu 500 m/min.

Drehmeißel Die Drehmeißel können aus Schnellarbeitsstahl sein, wenn geringe Verschleißwirkungen zu erwarten sind. Die Werkzeugwinkel bei Drehstählen sind in Bild 7.32 dargestellt. Bei Duroplasten und vor allem bei Kunststoffen mit Glasfaserfüllungen sollen die Drehmeißel Hartmetallschneiden haben.

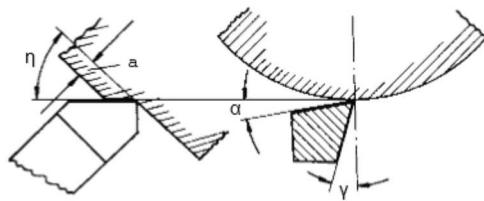


Bild 7.32
Werkzeugwinkel bei Drehstählen

Wird das Schneidenprofil leicht abgerundet, entstehen in der Werkstückoberfläche keine scharfkantigen Rillen. Die Oberfläche wird sehr sauber. Genauere Angaben über Richtwerte für die Schneidengeometrie der Werkzeuge zum Längs- und Plan-drehen können der Tabelle 7.7 entnommen werden.

Schneidengeometrie

Tabelle 7.7 Richtwerte für das Drehen von Kunststoffen nach VDI-Richtlinie 2003

Kunststoff	Kurzzeichen	Werkzeug	α	γ	χ	v	s	a
Duroplaste	Organische Füllstoffe	Hp Hgw GFK	5 bis 10	15 bis 10 10 bis 15	5 bis 5 5 bis 5	bis bis		
	Organische Füllstoffe	HM	5 bis 11	0 bis 1	5 bis 5	bis		
Thermoplaste	Polymethacrylate und Polymere	PMM MM	5 bis 10	0 bis 1	ca. 5	50 bis 50	0 bis 0	bis
	Polystyrol und Styrol							
	Polymethylmethacrylate	PMMA MA	5 bis 10	0 bis 1	ca. 5	50 bis 50	0 bis 0	bis
	Polycarbonat							
	Polymethacrylate	PMMA MA	5 bis 10	0 bis 5	5 bis 5	50 bis 50	0 bis 0	bis
	Polymethacrylate							
	Polymethacrylate	PMMA MA	5 bis 10	0 bis 5	5 bis 5	50 bis 50	0 bis 0	bis
	Polymethacrylate							
	Polymethacrylate	PMMA MA	5 bis 10	0 bis 5	5 bis 5	50 bis 50	0 bis 0	bis
	Polymethacrylate							
	Polymethacrylate	PMMA MA	5 bis 10	0 bis 5	5 bis 5	50 bis 50	0 bis 0	bis
	Polymethacrylate							
	Polymethacrylate	PMMA MA	5 bis 10	0 bis 5	5 bis 5	50 bis 50	0 bis 0	bis
Polymethacrylate	PMMA MA							

v_c Schnittgeschwindigkeit in $\frac{m}{min}$ in $\frac{m}{min}$
 Q_T Vorschub in $\frac{mm}{U}$
 a_p Spantiefe in mm

HP Hartpapier
 Hgw Hartgewebe
 GFK Glasfaserverstärkter Kunststoff

α Vorschub s bis 0 bis 0 in $\frac{mm}{U}$ in $\frac{mm}{U}$
 γ Stabilität des χ sowie der Maschine und der Oberflächengüte
 χ Spantiefe bis 10 in $\frac{mm}{U}$ in $\frac{mm}{U}$
 v des χ und der Maschine

■ 8.1 Einleitung

Das Recycling von Kunststoffen gewinnt seit Jahren immer mehr an Bedeutung und ist heute eine feste Größe in der Kunststofftechnik. Dazu haben vor allem sich ändernde ökonomische, ökologische und gesellschaftliche bzw. gesetzgeberische Zusammenhänge beigetragen. Ein wachsendes Umweltbewusstsein, strengere gesetzliche Auflagen, aber auch steigende Rohstoffkosten sorgen dafür, dass die Wiederverwendung oder Verwertung von Kunststoffen vorangetrieben wird. Es ist absehbar, dass diese Entwicklung auch in Zukunft anhalten wird.

Ein wesentlicher Gesichtspunkt, der für diese Entwicklung mitverantwortlich ist, war zunächst das 1986 in Kraft getretene „Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen“. Im Oktober 1996 trat das neue Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz in Kraft, das schließlich im Jahre 2012 durch eine Neufassung ersetzt wurde. Darin werden zwei wesentliche Lösungsansätze für das Problem wachsender Müllberge und schwindender Ressourcen genannt: Oberstes Ziel muss danach zunächst die Vermeidung von Abfällen sein. Die Produktion und der Konsum müssen so gestaltet werden, dass so wenig Abfälle wie möglich entstehen. Sofern Abfälle nicht vermeidbar sind, müssen diese einer Verwertung zugeführt werden, d. h. die Abfälle müssen in den Wirtschaftskreislauf rückgeführt werden. Letztendlich dürfen ausschließlich nicht mehr verwertbare Abfälle umweltverträglich beseitigt werden.

Vermeidung von
Abfällen

Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz werden alle Stoffe, die in einem Produktionsprozess anfallen und die nicht das Produkt selbst darstellen, als Abfall definiert. Diese Abfälle werden eingeteilt in „Abfälle zur Verwertung“ und in „Abfälle zur Beseitigung“. Dabei sind Abfälle zur Verwertung Wirtschaftsgüter, die weiter genutzt werden können. Die Nutzung erfolgt entweder stofflich, also durch Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abfällen oder energetisch, indem Energie in der Regel durch Verbrennung aus den Abfällen gewonnen wird. Eine Deponierung von unbehandeltem Siedlungsabfall ist in Deutschland seit Mitte 2005 gesetzlich untersagt, dies betrifft auch Kunststoffabfälle, wie z. B. Verpackungen im Hausmüll, Fensterprofile aus Kunststoff im Bauschutt etc.

Abfälle zur Verwertung

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz wird in seinem weiten Abfallbegriff konkretisiert durch ein untergesetzliches Regelwerk. Dies sind Verordnungen, die den Vollzug

des Gesetzes erst ermöglichen. So haben die Einführung der Verpackungsverordnung („Grüner Punkt“) im Jahr 1991 und deren Novellierung im Jahr 2003 („Einwegpfand/Dosenpfand“) dazu beigetragen, dass der Verwertung von Kunststoffabfällen ein höherer Stellenwert zukommt. Die Vorgaben zu Recyclingquoten von Kraftfahrzeugen (Altfahrzeug-Verordnung aus dem Jahr 1997; Neufassung 2002) führen dazu, dass auch Kunststoffe in Altfahrzeugen der Verwertung zugeführt werden müssen. Daraus resultiert, dass schon bei der Konstruktion von Kraftfahrzeugen ein Augenmerk auf die spätere Recyclingfähigkeit der Komponenten und Bauteile gelegt werden muss.

Lebenszyklus Die Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus Abfällen hat zur Folge, dass die in Bild 8.1 dargestellten Kreisläufe entstehen. Auf dem Weg vom Rohstoff über das Produkt zum Abfall setzen sie an unterschiedlichen Stellen an.

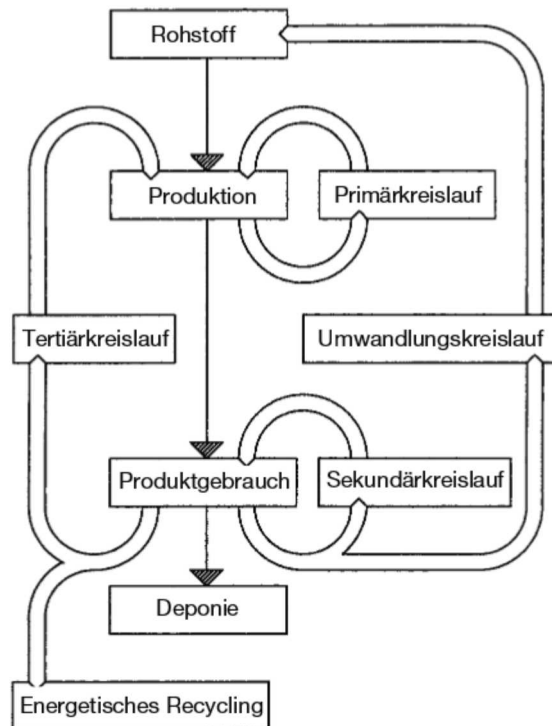


Bild 8.1 Recyclingkreisläufe

Recyclingkreisläufe Grundsätzlich sind vier verschiedene Kreisläufe zu erkennen. Im Primärkreislauf werden Produktionsabfälle wieder in einsetzbare Werkstoffe überführt, was im Allgemeinen als *innerbetriebliches Recycling* bezeichnet wird. Im Sekundärkreislauf wird ein Produkt, das nach seinem Erstgebrauch potenziellen Abfall darstellt, durch *Wiederverwendung* als neues oder anderes Produkt genutzt. Ein Beispiel hierfür sind ausgediente abgefahrene Autoreifen, die als Fender in Häfen eine sinnvolle Weiterverwendung finden. Aber auch die Verwendung von Mehrwegflaschen fällt nach der obigen Definition in den sekundären Recyclingkreislauf. Der Tertiärkreislauf umschließt die Stationen Produktion und Produktgebrauch sowie die anschlie-