

## Polymerverarbeitung II – Verarbeitung-Struktur-Eigenschaften

### Einleitung

Obwohl Kunststoffe erst seit etwa 100 Jahren bekannt sind, sind sie aus dem heutigen Alltag nicht mehr wegzudenken. Durch ihre leichte Verarbeitbarkeit und ihr geringes Gewicht bei gleichzeitig ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften finden sie in vielen Bereichen Einsatz.

Dabei kann man die Materialeigenschaften (mechanische und thermische Stabilität, optische Eigenschaften wie Farbe und Transparenz) nicht nur durch die Auswahl geeigneter Monomere (Einfluss auf Löslichkeit, chemische Stabilität) sowie die Polymerisationsbedingungen (Molekulargewicht, Polydispersität beeinflussen die Mikrostruktur im Werkstoff) bestimmen. Vielmehr können auch durch Additivieren und Polymerverarbeitung die Eigenschaften der Werkstoffe an die jeweiligen Aufgabengebiete angepasst werden. Bei der (Weiter)verarbeitung können einzelne Parameter wie die Steifigkeit eines Werkstücks noch weiter beeinflusst werden (Abkühlraten, Streckung). Insgesamt gibt es sehr viele Möglichkeiten ein Kunststoffprodukt an die gestellten Anforderungen anzupassen (Abbildung 1).

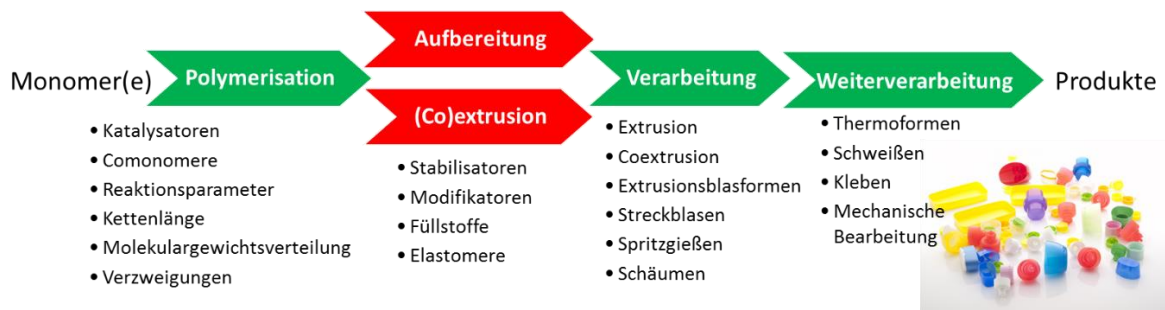
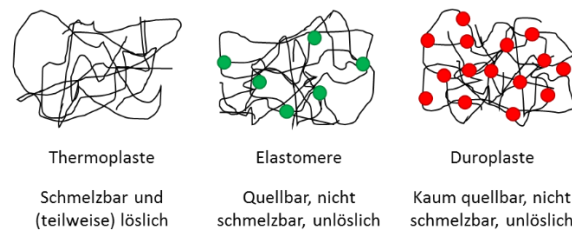


Abbildung 1: Vom Monomer zum Produkt.

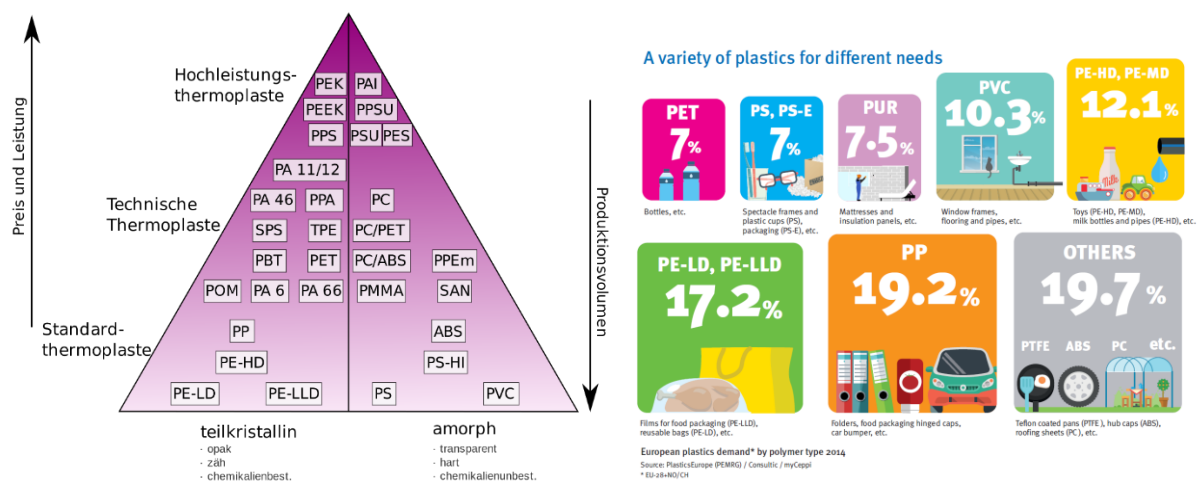
Neben der Möglichkeit, Kunststoffe über ihre chemische Zusammensetzung (Polyolefine, Polyester, Polyamide...) oder über den Syntheseweg zu klassifizieren (Stufenwachstum und Kettenwachstum), kann man sie auch aufgrund ihrer Eigenschaften in Thermoplaste, Elastomere und Duromere(-plaste) einteilen (Abbildung 2). **Duroplaste** bestehen aus einem makromolekular aufgebauten Raumnetzwerk, das über chemische Bindungen engmaschig verknüpft ist. In **Elastomeren** sind die Makromoleküle durch wenige chemische Bindungen zu einem weitmaschigen Raumnetzwerk verbunden, durch die geringere Anzahl der Quervernetzungen zeigen sie gummielastisches Verhalten. Weder Elastomere noch Duroplaste können ohne Zersetzung des Materials geschmolzen oder gelöst werden. **Thermoplaste** bestehen aus Makromolekülen, die von intermolekularen Kräften zusammengehalten werden. Dadurch sind diese Kunststoffe oft schmelzbar oder sogar löslich.

Ein Sonderfall sind **thermoplastische Elastomere (TPE)**, die sich bei Raumtemperatur vergleichbar den klassischen Elastomeren verhalten, sich jedoch unter Wärmezufuhr plastisch verformen lassen.



**Abbildung 2:** Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste.

Thermoplastische Kunststoffe können in amorphe und teilkristalline Kunststoffe eingeteilt werden (mit welcher Messmethode kann man bestimmen ob ein Kunststoff amorph oder teilkristallin ist?). In Abbildung 3 ist diese Einteilung sowie eine weitere Aufteilung nach Preis und Produktionsvolumen gezeigt („Kunststoffpyramide“). An der Spitze dieser Pyramide stehen Hochleistungskunststoffe, die vor allem in High-Tech-Anwendungen (Medizin, Raumfahrt, Luftfahrt) eingesetzt werden. Technische Kunststoffe, die für höherwertige technische Artikel (Maschinenbau, Elektrotechnik, Fahrzeugbau) eingesetzt werden, sind etwas kostengünstiger und werden auch mit größeren Produktionsvolumina hergestellt. Massenkunststoffe finden großflächig im Verpackungsbereich, Bauwesen, Haushalt oder Sport Einsatz, jedoch können für diese durch gezieltes Design der Polymerstrukturen sowie Compoundierung mit geeigneten Füllstoffen oder anderen Polymeren durchaus auch Anwendungen im Bereich der technischen Kunststoffe erschlossen werden. Ein Beispiel sind Stoßstangen und Armaturenbretter in der Fahrzeugindustrie sowie Bauteile in Haushaltsgeräten, die heute größtenteils aus Polypropylen-Compounds bestehen.



**Abbildung 3:** Kunststoffpyramide und Einsatz von Kunststoffen in der EU (2014). PS-E = expanded polystyrene (Schäume, Styropor®).<sup>1</sup>

## Extrusion und Compoundierung

Die Extrudertechnik hat sich mittlerweile als wichtigstes verfahrenstechnisches Element in der kontinuierlichen Produktion von thermoplastischen Kunststoffartikeln etabliert. Bei der Extrusion werden Kunststoffe kontinuierlich durch eine Düse gepresst. Dazu wird der Kunststoff im **Extruder** (Abbildung 4) unter hohem Druck und hoher Temperatur geschmolzen und homogenisiert.

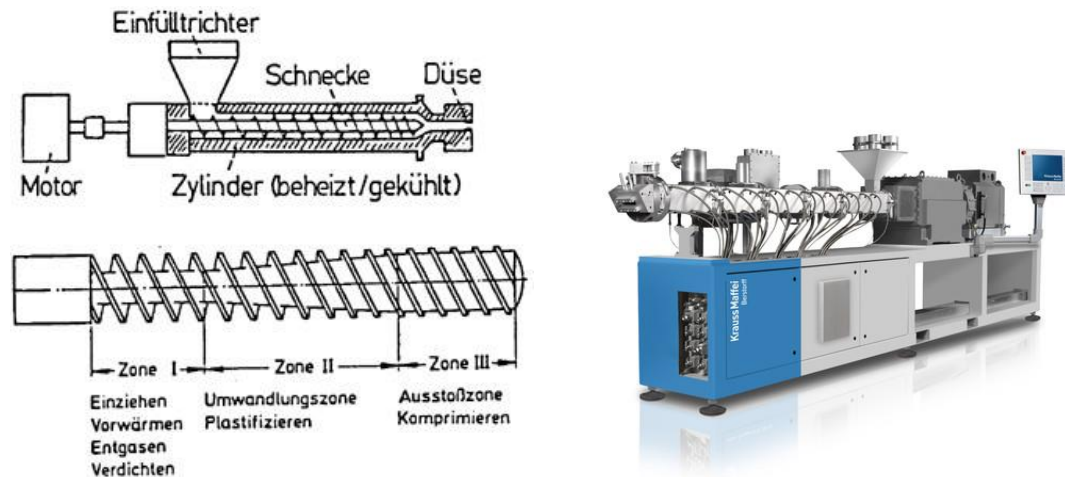


Abbildung 4: Extruder.<sup>2,3</sup>

Der **Trichter** hat die Aufgabe, dem Extruder das zu verarbeitende Material gleichmäßig zuzuführen. Die **Schnecke** erfüllt eine Vielzahl von Aufgaben wie Einziehen, Fördern, Aufschmelzen und Homogenisieren des Kunststoffes und ist damit das Kernstück eines Extruders. Am meisten verbreitet ist die Dreizonen-Schnecke.

In der **Einzugszone** wird das noch als Feststoff vorliegende Material eingezogen und weitergefördert sowie vermischt und erwärmt. In der **Kompressions- bzw. Umwandlungszone** wird das Material durch die abnehmende Gangtiefe der Schnecke verdichtet, aufgeschmolzen und homogenisiert. In der **Ausstoßzone** wird das aufgeschmolzene Material auf die gewünschte Verarbeitungstemperatur gebracht und in einem konstanten, homogenen Strom unter gleichmäßigem Druck in das Werkzeug gepresst.

Am Ende des Extruders befindet sich das Werkzeug (z.B. eine Spritzgussmaschine), das dem extrudierten Polymermaterial seine Form gibt und die notwendige Oberflächenqualität geben soll. Bei Aufbereitungsextrudern wird das Produkt entweder strangförmig gewonnen und dann mit einem rotierenden Messer zerschnitten (Stranggranulierung, Kaltabschlag) oder direkt nach der Düse durch ein mit Wasser überströmtes rotierendes Messer abgehackt (Heißabschlag oder Unterwassergranulierung). Diese Granulate werden dann von kunststoffverarbeitenden Betrieben weiterverwendet (z.B. im Spritzguss).

Es gibt keine Universalschnecke, die für die Verarbeitung aller Materialien geeignet wäre. Abbildung 5 zeigt verschiedene Schneckentypen mit verschiedenen Gehäusen, unterschiedlicher Gangzahl und unterschiedlicher Gangtiefe. Auch die Drehzahl der Schnecke richtet sich nach dem zu

verarbeitenden Material; sie liegt meist zwischen 3 bis 90 U/min und kann bei schnell laufenden Maschinen bis zu 1500 U/min liegen. Je nach Produkt wird mit Drücken von 10 bis zu 300 (700) bar und Temperaturen zwischen 60 bis 300 °C gearbeitet. Einige Materialien werden von Einzelschnecken nicht in die Umwandlungszone befördert, sondern kleben an der Schnecke und blockieren den Durchgang. Das wird bei Extrudern mit zwei sich kämmenden Schnecken vermieden, wobei der Drehsinn gleich- oder gegenläufig sein kann. Die Förderung und der Druckaufbau werden beim Einschnecken- und gleichläufigen Doppelschneckenextruder durch die Reibung der mit der Schnecke rotierenden Masse an der stehenden Gehäusewand bewirkt. Die so in der Rotation zurückbleibende Masse wird von den wendelförmigen Schneckengängen zur Auslassdüse geschoben.


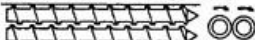
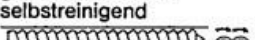
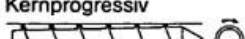
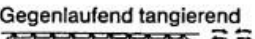
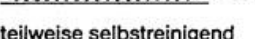
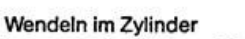
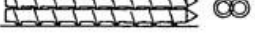
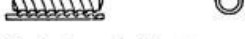
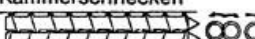
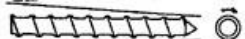
Einwellenschnecken	Doppelschnecken (nicht ineinandergreifend)	Doppelschnecken (ineinandergreifend)
Gangprogressiv 	Gleichlaufend tangierend 	gleichläufig und selbstreinigend 
Kernprogressiv 	Gegenlaufend tangierend 	teilweise selbstreinigend 
Wendeln im Zylinder 		Kammerschnecken 
Konisches Gehäuse 		Konische Schnecken und Konisches Gehäuse 
Gangprogressiv und Konisches Gehäuse 		

Abbildung 5: Beispiele für konventionelle Einschnecken- und Zweischneckenextrudertypen.<sup>4</sup>

Je nach Anwendung, zu verarbeitendem Kunststoff und Extrudertyp können verschiedene Schneckenelemente eingesetzt werden (Abbildung 6).

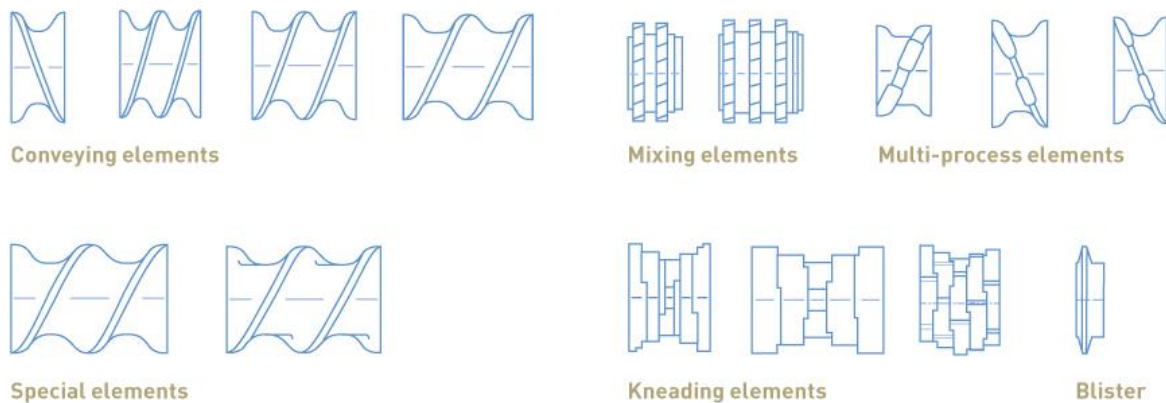


Abbildung 6: Schneckenelemente.<sup>4</sup>

## Verarbeitung

Thermoplaste können durch kontinuierliche **Extrusion** oder **Spritzguss** verarbeitet werden. Bei der Extrusion wird das Polymer erhitzt (wie auch schon bei der Aufbereitung) und im geschmolzenen Zustand durch eine Matrize in Form gepresst, um dünne Folien, dünnen Film oder Fasern zu erzeugen. Für die Herstellung von Rohren und Profilen wird auch kontinuierliche Extrusion angewandt, dabei muss die aus dem Extruder kommende Form aber während der Abkühldauer der Rohre stabil bleiben. Das erfordert eine sehr zähflüssige, dicke Polymerschmelze, besonders bei dickwandigen Rohren mit großem Durchmesser. Für die Herstellung sehr breiter und schlauchförmiger Folien werden Blasfolienanlagen eingesetzt. Dabei tritt die Folie senkrecht nach oben aus und wird durch Luftzuführung im Inneren auf den gewünschten Umfang aufgeblasen.

Folienextrusion (mehrlagig) <https://www.youtube.com/watch?v=RY--RPOkEjU>

Rohrextrusion [https://www.youtube.com/watch?v=zcBv\\_JvFDBI](https://www.youtube.com/watch?v=zcBv_JvFDBI)

Blasfolienanlage <https://www.youtube.com/watch?v=TTVyOFQ8Dlw>

Im Gegensatz zu den zähflüssigen Produkten für Rohrextrusion stehen Produkte die für den **Spritzguss** eingesetzt werden. In diesem diskontinuierlichen Prozess wird ein Reservoir am vorderen Ende des Extruders mit Schmelze aufgefüllt, das dann in die vorbereitete Form gedrückt wird. Dabei handelt es sich um ein zyklisches Verfahren, das durch die Steuereinrichtung der Maschine koordiniert wird (Abbildung 7).

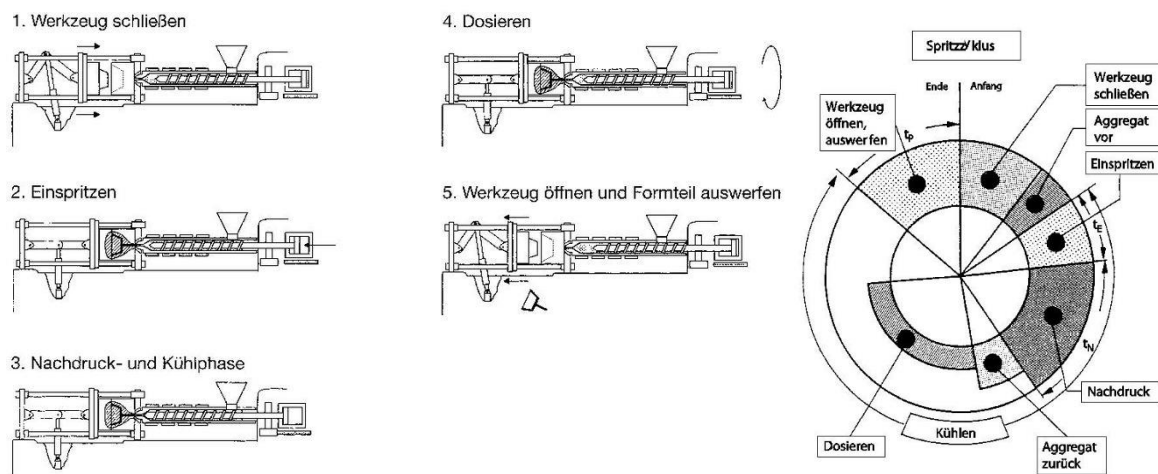
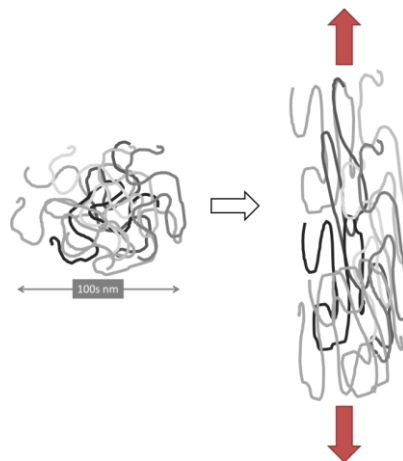


Abbildung 7: Verfahrensablauf beim Spritzguss.<sup>3</sup>

## Hintergrund zur Übungsaufgabe<sup>5,6</sup>

Die Struktur der Polymermoleküle hat einen direkten Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften (z.B. Kristallinität, mechanische Festigkeit und Wärmebeständigkeit) der Massenkunststoffe. Im Zuge dieser Laborübung soll nun die Auswirkung der Polymerverarbeitung auf die Materialstruktur und die physikalischen Eigenschaften veranschaulicht werden.

Kunststoffmaterialien bestehen aus einer verknäuelten Ansammlung von Polymermolekülen (so genannten Ketten). Technische Formgebungsprozesse erzwingen während der Verarbeitung reversible oder irreversible Molekülorientierungen. Derartige Orientierungen sind immer mit einer Formänderung der Moleküle verbunden. Wird nun eine Kraft auf die Polymerketten ausgeübt, so führt dies dazu, dass sich die Ketten bewegen und neu ausrichten. Ist die aufgebrachte Kraft groß genug, so orientiert sich die Längsachse der Moleküle in Richtung der aufgebrachten Kraft neu (Abbildung 8). Eine Neuorientierung der Kette benötigt weniger Energie und tritt daher eher auf, wenn der Kunststoff erhitzt wird.

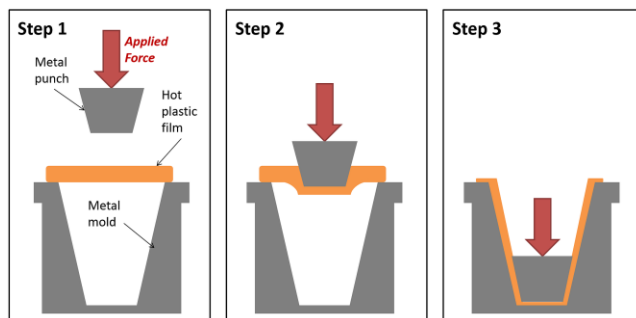


**Abbildung 8:** Vereinfachte Darstellung der Mikrostruktur eines Kunststoffes, zusammengesetzt aus verknäuelten Polymerketten (links). Die Ausübung einer Zugkraft (rote Pfeile) führt zu einer Neuausrichtung der Ketten in Richtung der wirkenden Kraft (rechts).<sup>5</sup>

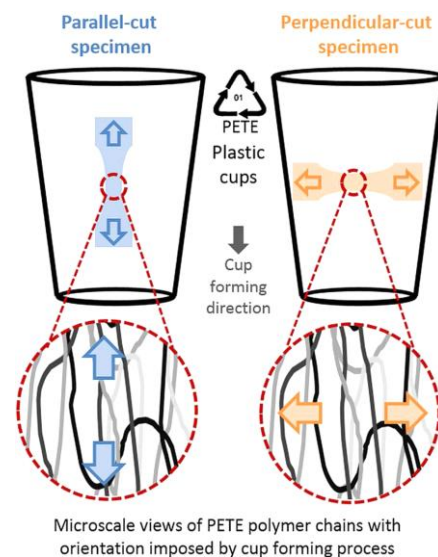
Die Längsachse der ausgerichteten Moleküle kann elastische Energie in ihrem kovalent gebundenen „Rückgrat“ speichern, was wiederum eine starke mechanische Reaktion der deformierten Kettenansammlung zur Folge hat. Das Kunststoffmaterial zeigt dadurch eine höhere mechanische Festigkeit parallel zur Kettenausrichtung als senkrecht zu dieser. Dies liegt daran, dass nur relativ schwache Van-der-Waals-Wechselwirkungskräfte zwischen den verschiedenen Ketten den senkrecht zur Ausrichtungsrichtung ausgeübten Kräften Widerstand leisten. Im Vergleich dazu stehen die relativ starken kovalenten Bindungen im Rückgrat der Ketten, die der parallel zur Ausrichtungsrichtung ausgeübten Kraft entgegenwirken.



Thermoplaste erweichen durch das Erhitzen und können so zu einer Vielzahl verschiedener Formen, z.B. Becher, Gabeln, Schnüre usw. verarbeitet werden. Einweg-Kunststoffbecher werden üblicherweise nach dem als „Thermoformen“ bekannten Verfahren hergestellt (Abbildung 9). Dazu wird ein erhitzter Kunststoffilm über einer abgekühlten Metallform mit einem becherförmigen Hohlraum positioniert (Schritt 1). Im 2. Schritt wird ein Metallstempel mit nach unten gerichteter Kraft mit dem heißen Kunststoff in Kontakt gebracht. Das hat zur Folge, dass der Kunststoff sich um den Stempel herum verformt. Üblicherweise wird das Füllen der Form durch Vakuum unterstützt. Im 3. Schritt wird der Stempel weiter in den Kunststoff gedrückt, wodurch sich dieser dehnt, die Form schließlich füllt und den Becher erzeugt. Abschließend wird der Becher abgekühlt und aus der Form entfernt.



**Abbildung 9:** Herstellung von Einweg-Plastikbechern durch Thermoformen.<sup>5</sup>



**Abbildung 10:** Orientierung der Polymerstränge in einem thermogeformten Becher.<sup>5</sup>

## Bestimmung der mechanischen Festigkeit (Zugversuch)<sup>7,8</sup>

Das Spannungs- und Dehnungsverhalten von Werkstoffen ist von großer Bedeutung und wird mit dem Zugversuch bestimmt. Der Zugversuch zählt zu den zerstörenden, quasistatischen Prüfverfahren und ist in der Werkstoffprüfung ein genormtes Standardverfahren. Bestimmt werden damit die Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Streckgrenze, sowie weitere Werkstoffkennwerte. Ein Prüfkörper mit definierter Querschnittsfläche (Abbildung 11) wird mit einer bestimmten Geschwindigkeit bis zum Bruch oder Abreißen gedehnt.

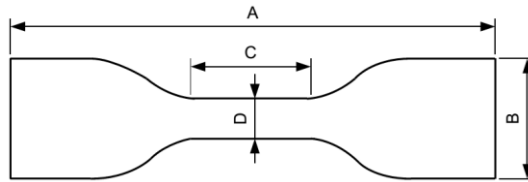


Abbildung 11: Schulterstäbe (Prüfkörper für den Zugversuch).<sup>9</sup>

Während des Versuchs werden die Kraft (F) an der Probe und die Längenänderung ( $\Delta L$ ) in der Messstrecke der Probe kontinuierlich gemessen. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Abbildung 12) ist dabei ein direktes Ergebnis des Zugversuches, aus welchem dann die technischen Kennwerte abgelesen werden können.

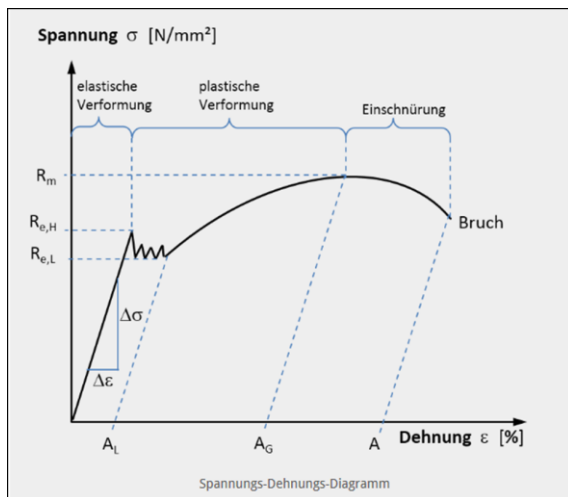


Abbildung 12: Allgemeines Spannungs-Dehnungs-Diagramm.<sup>8</sup>

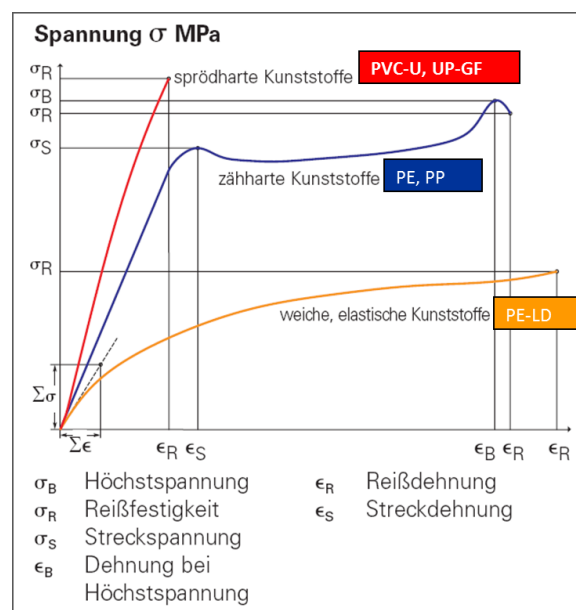


Abbildung 13: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für verschiedene Kunststoffe.<sup>8</sup>

Die Nennspannung ( $\sigma_n$ ) wird aus der Kraft und der Querschnittsfläche der undeformierten Probe ( $S_0$ ) berechnet und die Dehnung ( $\epsilon$ ) aus der Längenänderung ( $\Delta L$ ) bezogen auf die Ausgangslänge ( $L_0$ ) der Probe.

$$\sigma_n = \frac{F}{S_0}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$



Am Beginn einer Krafteinwirkung (wie auch während des Zugversuchs) verhalten sich viele Werkstoffe linear-elastisch, solange die Streckgrenze nicht erreicht wurde. Dieses linear-elastische, reversible Verformungsverhalten wird mit dem Elastizitätsmodul beschrieben. Der Elastizitätsmodul (E-Modul, „Young’s Modulus“) ist die Proportionalitätskonstante zwischen Spannung ( $\sigma$ ) und Dehnung ( $\epsilon$ ) eines festen Werkstoffes im linear elastischen Bereich (Steigung der Hooke’schen Geraden). Er definiert das Verhältnis des Spannungsanstiegs und der dabei zunehmenden Dehnung bei unbeeinflusster Querschnittsverformung des Prüfkörpers.

Abbildung 13 zeigt ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm für verschiedene Kunststoffe. Spröde Werkstoffe (rote Kurve) haben eine hohe Festigkeit und eine geringe Reißdehnung. Duktile (zähe) Werkstoffe (blaue Kurve) haben eine Streckgrenze. Kautschukähnliche (gummiartige) Werkstoffe (orange Kurve) haben eine geringe Festigkeit mit sehr hoher Reißdehnung.

Der Betrag des E-Moduls ist umso größer, je mehr Widerstand ein Material seiner elastischen Verformung entgegensetzt. Ein Bauteil aus einem Material mit hohem Elastizitätsmodul (z.B. Stahl) ist also steifer als ein Bauteil gleicher Konstruktion (gleichen geometrischen Abmessungen), welches aus einem Material mit niedrigem Elastizitätsmodul (z.B. Gummi) besteht. Bei anisotropen, insbesondere bei kristallinen Materialien ist der Elastizitätsmodul richtungsabhängig. Die Streckgrenze ( $R_e$ , yield point) ist die Spannung, bis zu der ein Werkstoff bei einachsiger und momentfreier Zugbeanspruchung keine makroskopische plastische Verformung zeigt. Sie wird durch die Streckdehnung und die Streckspannung beschrieben

## Übungsaufgabe

Der Einfluss der Kunststoffverarbeitungstechnik auf die mechanische Festigkeit von Einweg-Kunststoffbechern soll mittels Zugversuch bestimmt werden. Zu diesem Zweck werden Becher aus 4 verschiedene Materialien ausgegeben. Aus diesen werden längs und quer je 3 Schulterstäbe ausgeschnitten und mit einer Zugprüfmaschine getestet. (Aufgrund der Corona/COVID-19 Situation wurden die Messungen im Vorfeld bereits durchgeführt und es werden die entsprechenden Daten im Zuge der Übungseinheit zugeschickt.)

Bestimmen Sie sich anhand des Zug-Dehnungsverhaltens welches Probenverhalten vorliegt (siehe Abbildung 13). Berechnen Sie den E-Modul und geben Sie die Streckgrenze (yield point), Zugfestigkeit (max. stress), Reißfestigkeit (break stress) und Bruchdehnung (break strain) an.

## Protokoll

Spätestens 7 Tage nach dem Praktikum per E-Mail als PDF, ein gemeinsames pro Gruppe.

- **Titelseite:** LV-Bezeichnung, LV-Nummer, Überschrift, Name + Matrikelnummer, Gruppenbezeichnung, Betreuer
- **Einleitung** (inkl. Aufgabenstellung/Ziel): max. 1 Seite (kurz)
- **Ergebnisse und Diskussion:**
  - Angabe der Messdaten und der berechneten Werte (inkl. Literaturvergleich + Angabe der Quellen)
  - Vergleich des Verhaltens der Prüfkörper (längs und quer) mit Grafik (Wie manifestiert sich die Polymerverarbeitung in den mechanischen Eigenschaften der Probe?)
  - Vergleich der unterschiedlichen Materialien
- **Zusammenfassung:** max. 1 Seite

## Quellen

---

<sup>1</sup> <http://www.plasticseurope.de>

<sup>2</sup> Römpp Chemielexikon, Einträge „Polypropylen“ und Polyethylen.

<sup>3</sup> W. Micheli, *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*, 3. Auflage, 1992 Carl Hanser Verlag München Wien.

<sup>4</sup> <http://www.kraussmaffeiberstorff.com/de/schneckenelemente-2.html>

<sup>5</sup> K. A. Erk, M. Rhein, M. J. Krafcik, S. Ydstie, *J. Chem. Educ.* 2015, 92, 11, 1876-1881.

<sup>6</sup> G. W. Ehrenstein, *Polymer Werkstoffe*, 2., völlig überarbeitete Auflage, 1999, Carl Hanser Verlag.

<sup>7</sup> H. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer, T. Hirth, *Kunststoffe, Eigenschaften und Anwendungen*, 8., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2012, Springer Verlag.

<sup>8</sup> <https://www.krv.de>.

<sup>9</sup> U. Blobner, B. Reichter, *Fachwissen Prüfverfahren für Elastomere, Zugversuch: Prüftechnische Grundlagen und Empfehlungen für die praktische Anwendung*, 2012, <https://www.o-ring-prueflabor.de>.