

Prof. Dr.-Ing. H.G. Heinrich

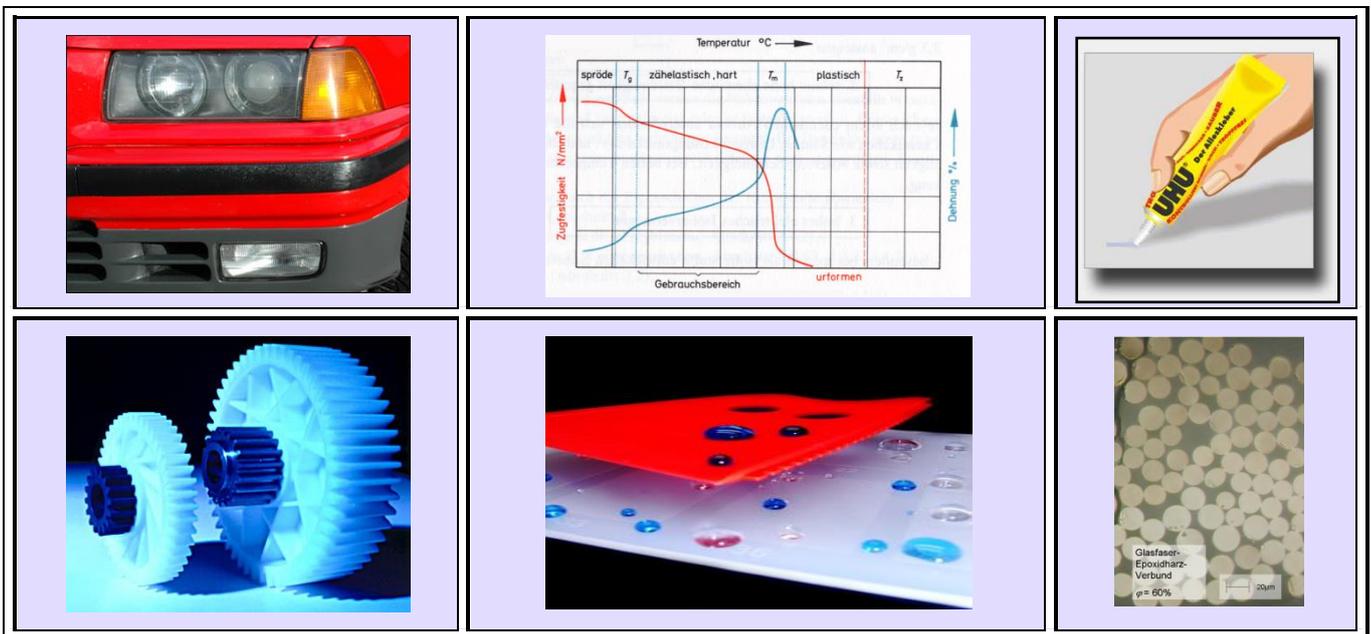
Vorlesung "WTK, Ingenieurwerkstoffe"

Arbeitsblätter zum Teil 2 „Kunststoffe“

Die Arbeitsblätter sind bestimmt als vorlesungsbegleitende Unterlagen. Sie enthalten fast alle Bilder und Diagramme der in der Vorlesung besprochenen Folien aber nur einen Teil des Textes und sind deshalb zum Eigenstudium des Faches nicht geeignet.

Bitte beachten Sie bitte auch die vorlesungsergänzenden Aufsätze auf meiner Homepage unter

<http://homepages.fh-regensburg.de/~heh39273/aufsatz.shtml>



Der Ausdruck des Skriptes auf DIN-A4-Größe und in Farbe ist empfehlenswert !

SS 2015

Gliederung der WTK-Vorlesung- Teil 2 „Kunststofftechnik“

- 1. Literaturangaben und Einführung**
- 2. Kunststofftechnik – Inhalte/Ziele**
- 3. Chemische Grundlagen**
 - 3.1 Atomaufbau, Bindungsarten und PSE
 - 3.2 Hauptvalenzen, kovalente Bindung und MO-Theorie
 - 3.3 Nebenvalenzen: Wasserstoffbrücken- und van-der-Waals-Bindung
- 4. Was ist ein Kunststoff**
- 5. Aufbau der Kunststoffe**
 - 5.1 Chemischer Aufbau
 - 5.2 struktureller Aufbau 1 – 5
 - 5.2.1 Isomerie
 - 5.2.2 Taktizität
- 6. Kunststoffarten und Anwendungsbeispiele**
 - 6.1 Duroplaste
 - 6.2 Thermoplaste
 - 6.2.1 Homopolymere
 - 6.2.2 Copolymere
 - 6.2.3 Thermoplastische Elastomere
 - 6.3 Polymerblends
 - 6.4 Flüssigkristalline Kunststoffe
 - 6.5 Elastomere
 - 6.6 Gegenüberstellung Thermoplaste - Elastomere - Thermoplastische Elastomere (TPE)
 - 6.7. Beispiele für verschiedene Kunststoffe und deren Anwendungen (tabellarisch)
- 7. Herstellung der Kunststoffe**
 - 7.1 Polymerisation (Kettenreaktion)
 - 7.2 Polykondensation, Polyaddition (Stufenreaktionen)
 - 7.3 Stoffumsatzdiagramm
 - 7.4 Herstellung von Granulaten
 - 7.5 Übungsaufgaben
- 8. Additive**
 - 8.1 Zusatz- und Füllstoffe – Einteilung
 - 8.1.1 Gleitmittel
 - 8.1.2 Stabilisatoren
 - 8.1.3 Weichmachung
 - 8.1.4 Nukleierungsmittel
 - 8.1.5 Laserbeschriftung
 - 8.1.6 Füll- und Verstärkungsstoffe
 - 8.1.6.1 Faserverstärkte Kunststoffe
 - 8.1.7 wärmeleitfähige Füllstoffe

9. Eigenschaften der Kunststoffe

- 9.1 Übersicht
 - 9.1.1 spezifisches Gewicht
 - 9.1.2 mechanische Eigenschaften
 - 9.1.3 Verarbeitung
 - 9.1.4 Wärme- und elektrische Leitfähigkeit
 - 9.1.5 Wärmedehnung
 - 9.1.6 optische Eigenschaften
 - 9.1.7 Korrosion
 - 9.1.8 Permeation, Diffusion
 - 9.1.9 Löslichkeit und Quellbarkeit
 - 9.1.10 Kunststoffe (Recycling, s. auch Kap. 14)
 - 9.1.11 Eigenschaften der Kunststoffe (Zusammenfassung)

10. Morphologie der Kunststoffe (Zustandsdiagramme → ZSD)

- 10.1 Allgemeines
- 10.2 Zustandsdiagramme
 - 10.2.1 ZSD amorpher Thermoplaste-
 - 10.2.2 ZSD teilkristalliner Thermoplaste
 - 10.2.3 ZSD von Elastomeren
 - 10.2.4 ZSD von Duroplasten
 - 10.2.5 Wiederholung von Kap. 10 (aus „Franck/Biederbeck“)

11. Mechanisches Verhalten der Kunststoffe: Werkstoffmodelle

- 11.1 V-T-Diagramm
- 11.2 p-V-T-Diagramm
- 11.3 Werkstoffmodelle...
 - 11.3.1 ideal elastischer Stoff (Hookescher Körper)
 - 11.3.2 ideal viskoser Stoff (Newtonsche Flüssigkeit)
 - 11.3.3 der visko-elastische Stoff (Maxwell-Körper)
 - 11.3.4 der elasto-viskose Stoff (Voigt-Körper)
 - 11.3.5 Grundmodell für das Verhalten aller Kunststoffe
- 11.4. Strangaufweitung

12. Rheologie

- 12.1 Laminare Strömung
 - 12.1.1 Laminares Scherfließen (Newtonsche Flüssigkeit)
- 12.2 Schergeschwindigkeit und Viskosität
 - 12.2.1. Newtonsches Fließen
 - 12.2.2 strukturviskoses Verhalten
 - 12.2.3 dilatantes Verhalten
 - 12.2.4 Bingham Körper
 - 12.2.5 Schergeschwindigkeit und Viskosität, etablierte Darstellungen
- 12.3 Viskositätsmessungen
- 12.4 Fließeigenschaften von Kunststoffschmelzen
- 12.5 Strukturviskosität bei Kunststoffschmelzen

13. Verarbeitungsverfahren der Kunststoffe (Auswahl)

- 13.1 Übersicht
- 13.2 Urformen
 - 13.2.1 Kalandrieren
 - 13.2.2 Extrudieren
 - 13.2.3 Blasfolien

- 13.2.4 Ummantelungen
- 13.2.5 Textilfasern
- 13.2.6 Weitere Beispiele von Kunststoffverarbeitungsmaschinen

14. Werkstoffprüfung bei Kunststoffen

- 14.1 Zugversuch
- 14.2 ...

.

15. Wiederverwertung (Der Wertstoffkreislauf der Kunststoffe)

- 15.1 (werk-)stoffliche Wiederverwertung
- 15.2 chemisches Recycling (rohstoffliche Verwertung)
- 15.3 thermische Nutzung (energetische Verwertung)
- 15.4 Deponieren (Abfallbeseitigung)

16. Bezeichnung der Kunststoffe

17. Vorgehen zum Ermitteln des geeigneten Kunststoffes

1. Literaturangaben und Einführung

Auswahl an Fachbüchern:

- | | | |
|----|---------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. | Kunststoffkompendium
Franck/Biederbick | Vogel-Verlag |
| 2. | Werkstoffkunde Kunststoffe
Menges et al. | Hanser Verlag. |
| 3. | Kunststoffkunde
Schwarz | Vogel-Verlag |
| 4. | Kunststofftaschenbuch
Meyer | Hanser Verlag |
| 5. | Einführung in die Kunststoffverarbeitung
P. Michaeli | Hanser Verlag |
| 6. | Kunststoffprüfung
Grellmann/Seidler | Hanser Verlag |
| 7. | Werkstoffkunde
Bargel/Schulze | Springer Verlag |

2.1 Kunststofftechnik - Inhalte

- Chem. Struktur, Bindungsmechanismen und Darstellung von Makromolekülen
- Herstellverfahren für Kunststoffe, Übersicht über Kunststoffarten und Modifikationen
- Morphologie der Kunststoffe
- Charakteristische Eigenschaften, Viskoelastizität, Strukturviskosität, Orientierungen
- Gebrauchseigenschaften, mech., opt., chem. und thermische Kennwerte
- Kunststoffverarbeitung; Extrusionstechnik, Blasformtechnik
- Stückprozesse; Spritzgießen, Pressen, GFK-, CFK-, SFK- und FVT-Verarbeitung
- Thermoformen, Schweißen usw.

2.2 Kunststofftechnik – Ziele

- Fähigkeit zur Verknüpfung von Struktur und Eigenschaften der Kunststoffe
- Kenntnisse über die wichtigsten Kunststoffarten und deren Anwendung
- Kenntnis der charakteristischen Eigenschaften und Besonderheiten von Kunststoffen
- Überblick über die Herstellung von Produkten, über Mess- und Prüfverfahren
- Fähigkeit zur Auswahl des Verarbeitungsverfahrens zur Erzielung optimaler Produkteigenschaften

Zur Erinnerung: Werkstoffgruppen

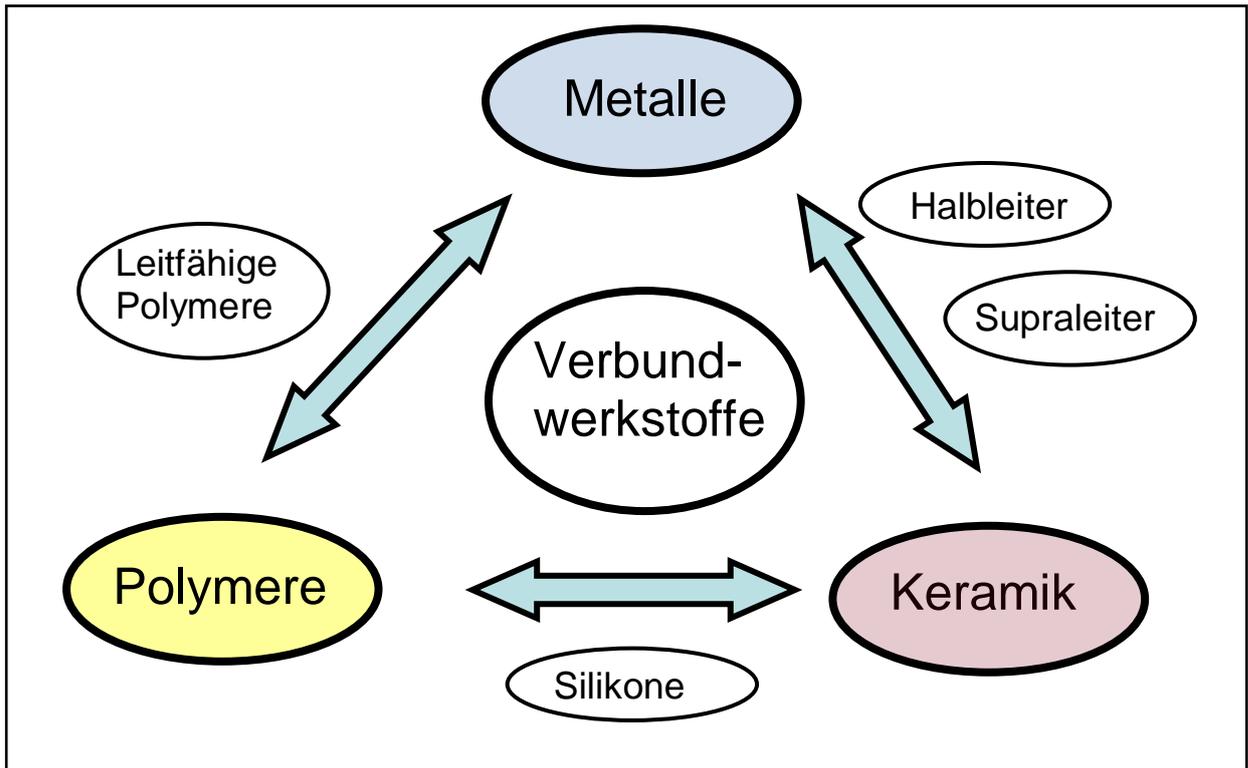


Abb. 1: mögliche Einteilung der Werkstoffe

3. Kunststoff: Definitionen

Kunststoffe sind

Die Bezeichnung Polymere kommt aus dem Griechischen (poly = viel, meros = Teil) und gibt einen Hinweis auf den Aufbau der Grundkunststoffe*.

Die einzelnen Teile (Monomere) verbinden sich untereinander zu Ketten, die man als Makromoleküle bezeichnet.

C ist die Atomsorte, die die Fähigkeit besitzt, solche Molekülketten zu bilden (s.u.). Die am häufigsten beteiligten Atomsorten sind: H, O, N, S

* Viele Kunststoffe haben dazu noch weitere Bestandteile wie Füllstoffe, Farbstoffe, Stabilisatoren etc., die nicht polymer aufgebaut sind.

Datenblätter von über 85000 Kunststoffen vorhanden → [Suchmaschine von Prospector](#) oder

B) Kunststoffe (Plaste) sind technische Werkstoffe, die aus Makromolekülen mit organischen Gruppen bestehen und durch chemische Umsetzungen gewonnen wurden. Ihre Molmasse liegt etwa zwischen 8000 und 6 000 000 g/mol.

Im Internet sind über 85.000 Datenblätter von Kunststoffen vorhanden s.

<http://www.ides.com/eplasturgy/german/prospector.asp> (Prospektor)

oder

<http://www.m-base.de/main/> (CAMPUS-Datenbank)

Etwas ausführlicher:

Kunststoffe sind technische Werkstoffe, die aus niedermolekularen Stoffen (z.B. Ethylen) künstlich synthetisiert oder durch Umwandlung von Naturstoffen (z.B. Stärke, Casein) hergestellt werden. Der Molekülaufbau der Kunststoffe ist faden-förmig (bei manchen auch räumlich). Die Molekülketten (**Polymere**) bestehen aus tausenden kleiner **Monomere**

Organische Stoffe sind Kohlenstoffverbindungen.

Die durchschnittliche (mittlere) Anzahl der Monomereinheiten je Makromolekül nennt man **Polymerisationsgrad (n)**. Das Produkt aus Polymerisationsgrad und Molmasse (M) der Monomereinheit ergibt die **mittlere Molmasse** des Polymers in g/mol.

Bis zu Polymerisationsgraden von etwa 10 bis 20 ändern sich die Eigenschaften noch deutlich, wenn man den Polymerisationsgrad nur um eine einzige Einheit ändert. Diese Stoffe heißen **Oligomere**.

Nicht zu den Kunststoffen zählt man:

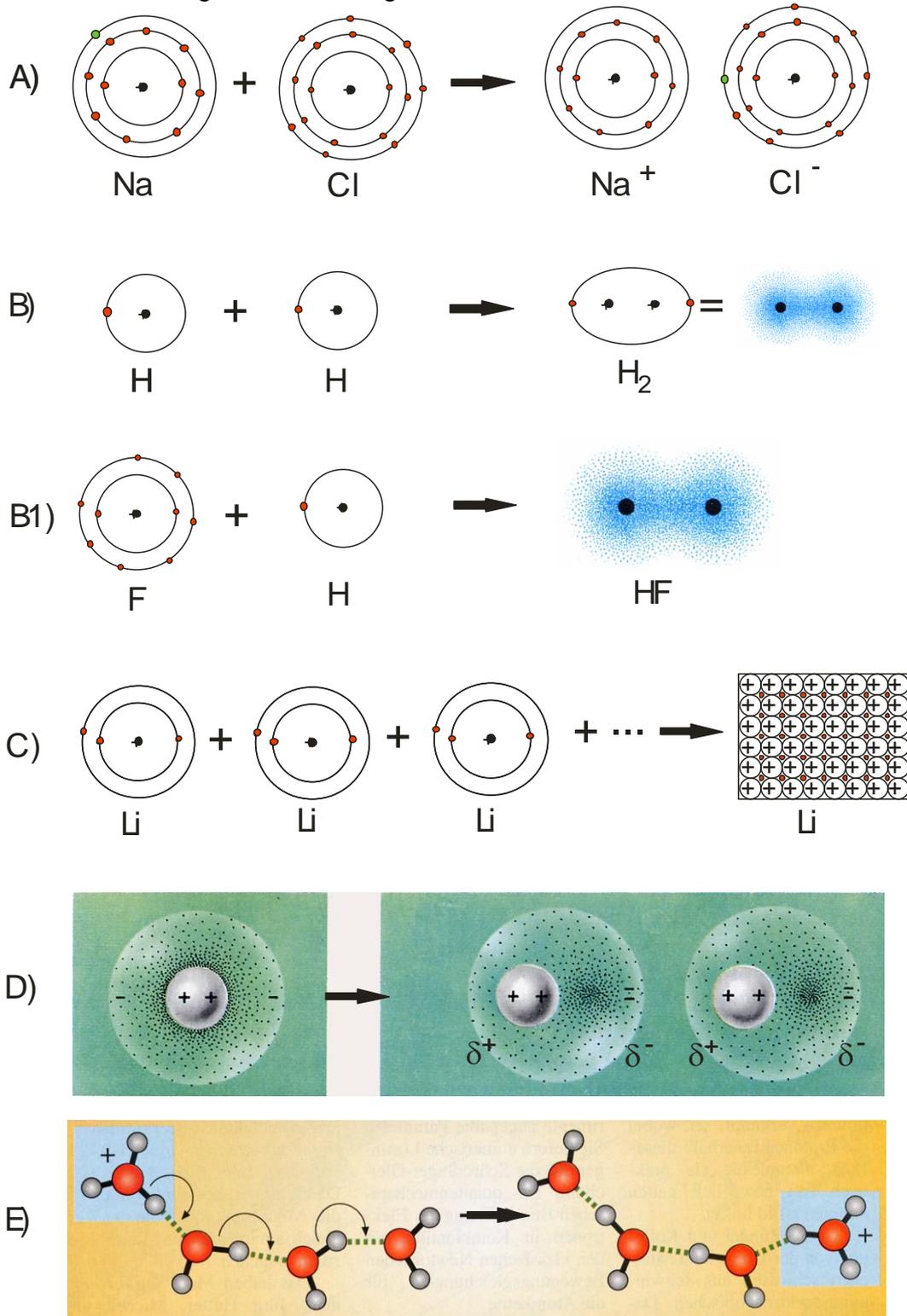
1. natürliche organische Werkstoffe wie Holz, Baumwolle, Seide, Naturharze u.a.,
2. natürliche und künstliche anorganische Werkstoffe wie Stein, Glas, Keramik, Metalle u.a.

4. Chemische Grundlagen:

4.1 Atomaufbau, Bindungsarten + PSE (s. auch VL Teil 1)

Außer den Edelgasen ist die gesamte Materie und damit auch alle Werkstoffe aus Molekülen zusammengesetzt, die wiederum aus Atomen (\rightarrow PSE, s. B-WTK-Metalle Skript) bestehen. In den Molekülen sind die Atome durch bestimmte Kräfte miteinander verbunden. Dies geschieht freiwillig, da die Atome dabei einen niedrigeren E-Zustand erreichen. Ziel ist dabei das Erreichen der Edelgaskonfiguration ($8 e^-$ auf der Außenschale \rightarrow PSE)

Man unterscheidet die folgenden Bindungsarten \rightarrow Abb. 2:



A) Ionenbindung → Bindung zwischen

B) e⁻-Paar-Bindung → Bindung zwischen . Zwischen den Atomkernen befinden sich bindende Elektronenpaare. Jedes Elektron dieser Paare wird von beiden Kernen angezogen. (= kovalente Bindung = Atombindung)

B1) e⁻-Paar-Bindung zwischen ungleichen Partnern → Es entstehen Raumladungen, Dipole

C) Metallbindung → zwischen

D) van-der-Waals-Bindung → zwischen , induzierte Dipol-Dipol-Wechselwirkung

E) H-Brücken-Bindung → zwischen , die ein H-Atom enthalten, Spezialfall der Dipol-Dipol-Wechselwirkung (im Wasser, aber auch in der DNA oder in Kunststoffen)

Kunststoffe sind polymere Werkstoffe, d.h. sie bestehen aus Makromolekülen. Sowohl natürliche (Holz, Leder, Kautschuk, Teer etc.) als auch synthetische Werkstoffe werden meistens durch organische Polymere auf der Basis von Kohlenstoff (C) gebildet.

Warum ist es gerade der C und wie kommen die Makromoleküle zustande? Die Ursache liegt im atomaren Aufbau und dem Bindungsmechanismus, s.u.

Viele Moleküle wie z.B. Wasser oder Gase, aber auch die Kunststoffe, werden durch kovalente- (e⁻-Paar-, Atom-) Bindungen zusammengehalten. Der C ist aufgrund seines atomaren Aufbaus zudem in der Lage Kettenmoleküle zu bilden → Kunststoffe.

Zum Verständnis dieses Vorganges wurde die **MO-Theorie (Molekül-Orbital-Theorie)** entwickelt. Danach entsteht die Bindung zwischen Nichtmetallatomen durch Überlappung der Atomorbitale zum Molekülorbital (= MO)

Die Form der Orbitale (hier s-, p, und d-Orbitale), d.h. der Orte der höchsten Aufenthaltswahrscheinlichkeit der e⁻, ist mit Hilfe der Quantenmechanik (für das H-Atom) berechnet worden, s. Abb.:

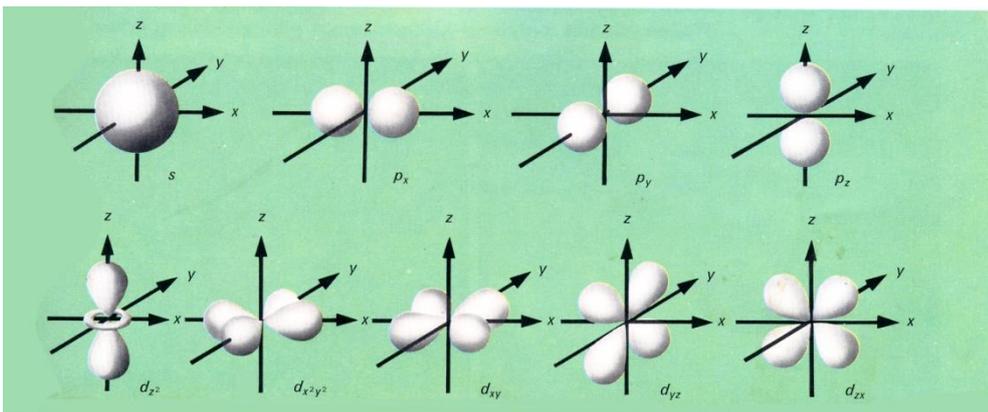


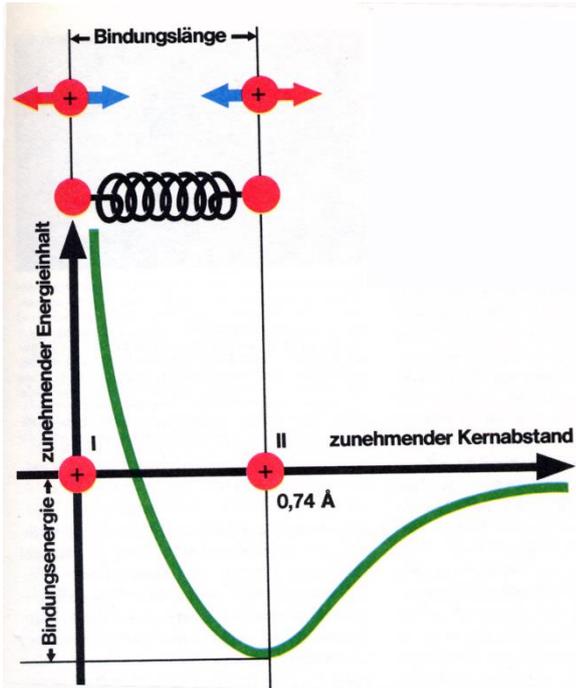
Abb. 3.:
Form der Orbitale für
das H-Atom

Perioden	Hauptquantenzahlen	Schalen	Unterschalen	Hauptgruppen		Hauptgruppen																
				Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa											
1	1	K	s	1	H 1,00797												2	He 4,0026				
				1	1	2																
2	1	K	s	2	Li 6,939	4	Be 9,0122													10	Ne 20,179	
				2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
3	1	K	s	3	Na 22,9898	11	Mg 24,305	Zwischen-													18	Ar 39,948
				2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	1	K	s	4	K 39,102	19	Ca 40,08	20	21	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Kr 83,80	
				2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Abb. 4: PSE (Ausschnitt)

4.2 Hauptvalenzen: kovalente Bindung und MO-Theorie

a) H₂ (e⁻-Konfiguration: 1s¹)

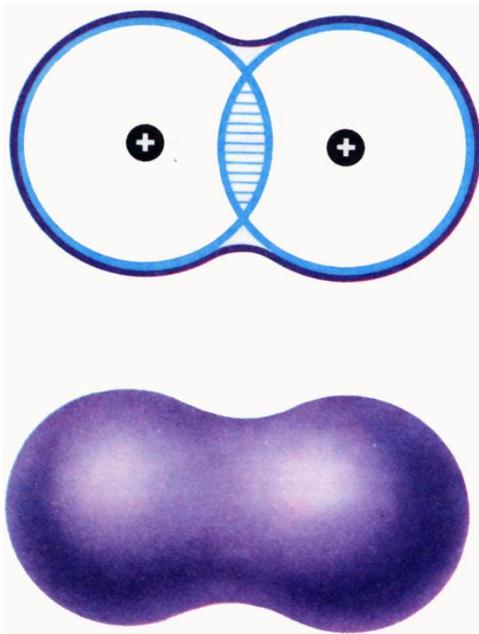


Prinzipiell führen die verschiedenen Bindungsmechanismen zu einer Erniedrigung der E des Gesamtsystems, s. nebenstehende Grafik. Deshalb entstehen die Verbindungen automatisch.

Der Abstand der beiden Protonen in einem H₂-Molekül ist ein Kompromiss zwischen der Anziehung beider Kerne durch die e⁻-Hülle und ihrer Abstoßung untereinander.

Analogon: 2 Kugeln, die mit einer Spiralfeder verbunden sind, s. Abb. 5.

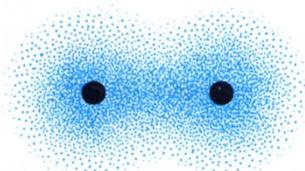
Abb. 5: Bindungsenergie als f(Kernabstand) beim Wasserstoff



Das H-Atom hat nur 1 e⁻, s. PSE. Damit es die Edelgaskonfiguration erreicht (→ He, 1s²) ist ein weiteres e⁻ nötig.

2 H-Atome können ein H₂-Molekül bilden, indem sich die s-Orbitale der beiden e⁻ der Atome teilweise überlappen, s. Abb. Dadurch gehören beide e⁻ zu jedem Atom und die Edelgaskonfiguration ist erreicht. Dies entspricht einem niedrigeren E-Zustand (s. oben links) und führt deshalb zu einer (stabileren) Verbindung. (Edelgase wie Ne besitzen schon von Natur aus eine Edelgaskonfiguration und liegen deshalb atomar vor.)

Abb. 6: Überlappung der Orbitale bei der H₂-Bildung



Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der e⁻ ist in der Abb. durch die Punktdichte wiedergegeben.

Abb. 7a: Elektronenverteilung beim H₂-Molekül

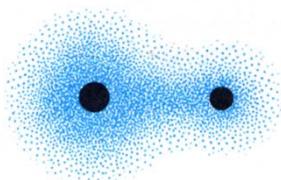


Abb. 7b: Elektronenverteilung beim HF-Molekül

b)

H₂O (e⁻-Konfiguration: H = 1s¹, O = 2s¹, 2s², 4p²)

Bei Molekülbildungen, also auch bei der Bildung des H₂O, reagieren immer nur die äußeren e⁻. (Deshalb sind die chemischen Eigenschaften der im PSE untereinander stehenden Elemente ähnlich). Bei der Bildung von H₂O überlagern sich 2 einfach besetzte (senkrecht aufeinander stehende) p-Orbitale des O-Atoms mit je einem 1s Orbital eines H-Atoms, s. Abb. 9-11.



Abb. 8: E-Niveau-Schema des H-Atoms

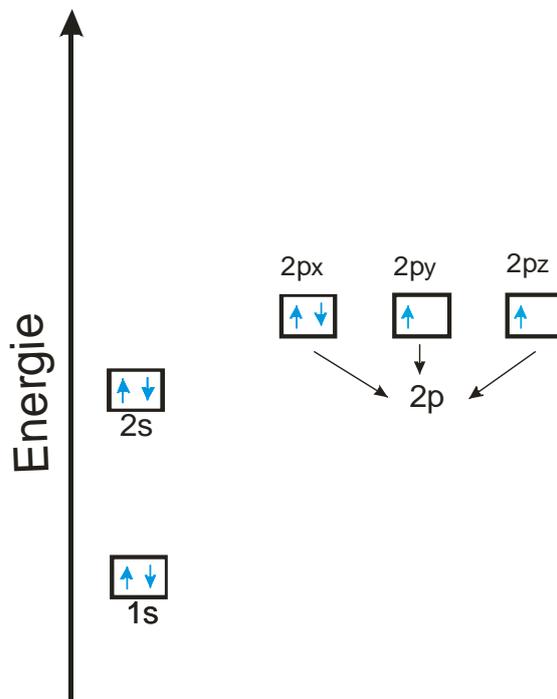
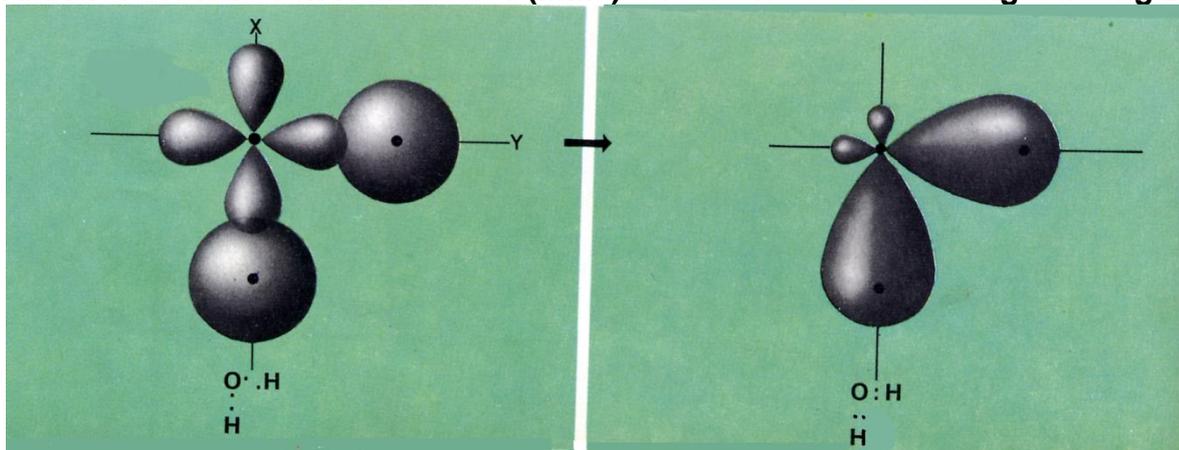


Abb. 9: E-Niveau-Schema des O-Atoms

In der räumlichen Darstellung unter Berücksichtigung der Orbitalformen ergibt sich folgendes Bild:

Abb. 10: Orbitale von H und O vor (links) und nach der Verbindungsbildung zu H₂O



Überlappung der Orbitale beim Wasser (H₂O) ergeben hier einen 90°-Winkel → Modell also nicht korrekt, da 104,5° gemessen werden (Abstoßung der H-Atome nicht berücksichtigt...)

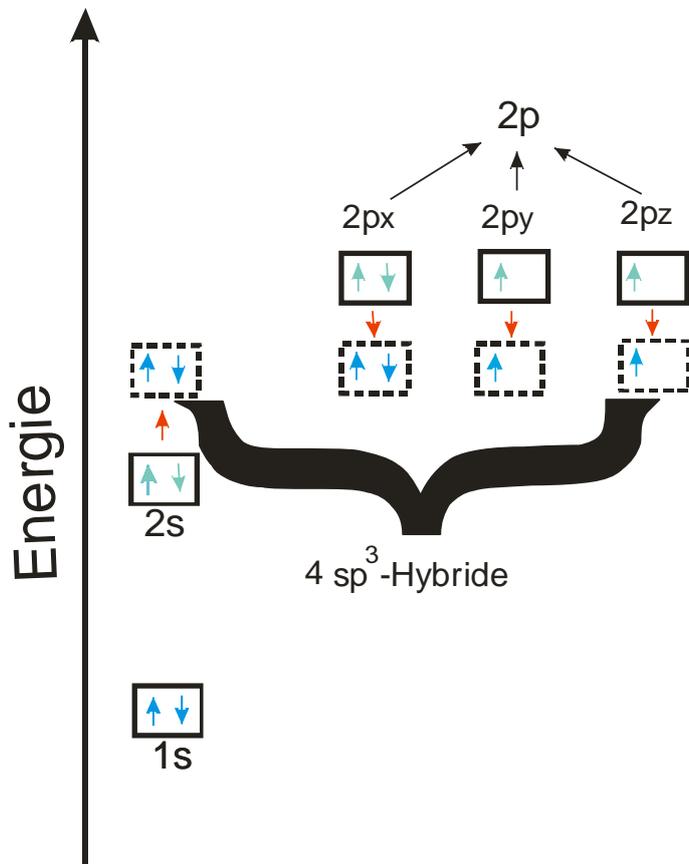


Abb. 11:

Erst durch die Annahme, dass eine Hybridisierung, s. Abb., erfolgt, kann der Bindungswinkel erklärt werden.

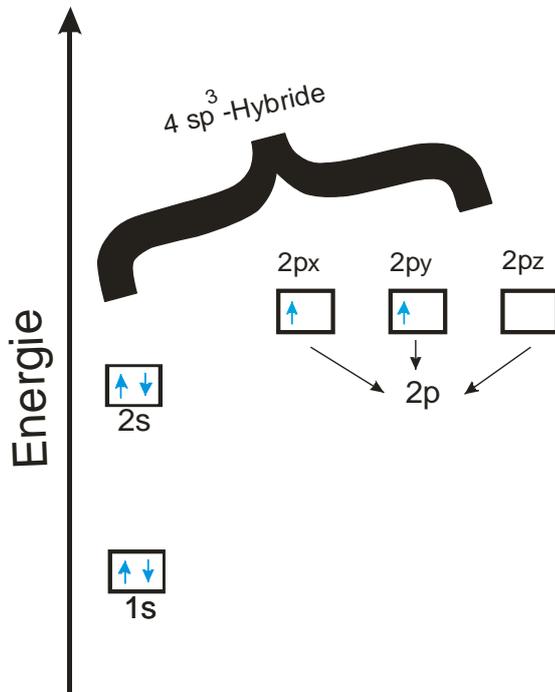
Die Hybridisierung erfolgt hier durch leichte Erhöhung bzw. Erniedrigung des E-Niveaus der Elektronen (s. rote Pfeile) ohne dass ein Elektron auf ein höheres E-Niveau geht (wie dies beim C, s.u., der Fall ist).

c) C (e^- -Konfiguration: $2s^1, 2s^2, 4p^2$)

(C steht in der 4. Gruppe des PSE, es fehlen ihm also $4 e^-$ zur Edelgaskonfiguration.)

Die für die organischen Werkstoffe wichtigste Atomsorte ist der C. Um sein Bindungsverhalten und damit den Aufbau der Kunststoffe beschreiben zu können, muß man das MO-Modell erweitern, was im Folgenden beschrieben wird.

Im E-Niveau-Schema sieht der C wie folgt aus:



Daraus ergibt sich zunächst, dass der C zweiwertig sein müsste. Um die meßtechnisch nachgewiesene Vierwertigkeit des C zu erklären entwickelte der Chemiker Pauling das Modell der Hybridisierung:

Abb. 12: E-Niveau-Schema des C

Danach bedarf es zunächst einer „Promovierung“, s. nächste Abb.

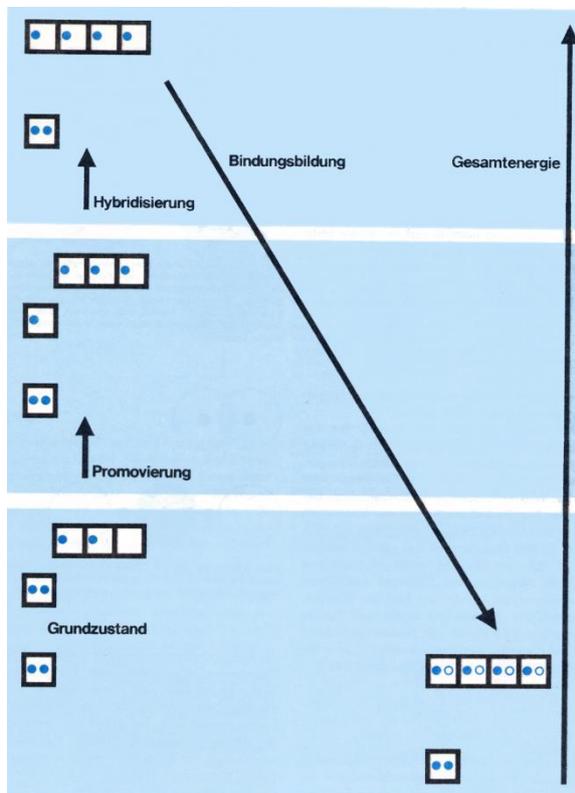


Abb. 13:

Promovierung im E-Niveau-Schema:

Die Hybridisierung führt erst zu einem niedrigeren E-Zustand nachdem eine Promovierung stattgefunden hat, d.h. es geht zunächst ein $s-e^-$ der L-Schale (unter E-Aufwand) auf ein leeres p-Niveau, dann bilden sich aus einem $s-e^-$ und den nun drei p-Elektronen vier sp^3 -Hybride (Kreuzungen, Mischlinge, unten rechts in der Abb. sowie in den nächsten Abb.). Diese können jetzt mit den e^- -Wolken anderer Atome überlappen.

Kommt es zu einer Überlappung mit den s-Elektronen des H, so ergibt sich die bekannte Verbindung CH_4 (Methan). Damit ist die Vierwertigkeit des C und die räumliche Anordnung der Verbindung erklärbar.

In der übernächsten Abbildung ist dieser Vorgang grafisch dargestellt.

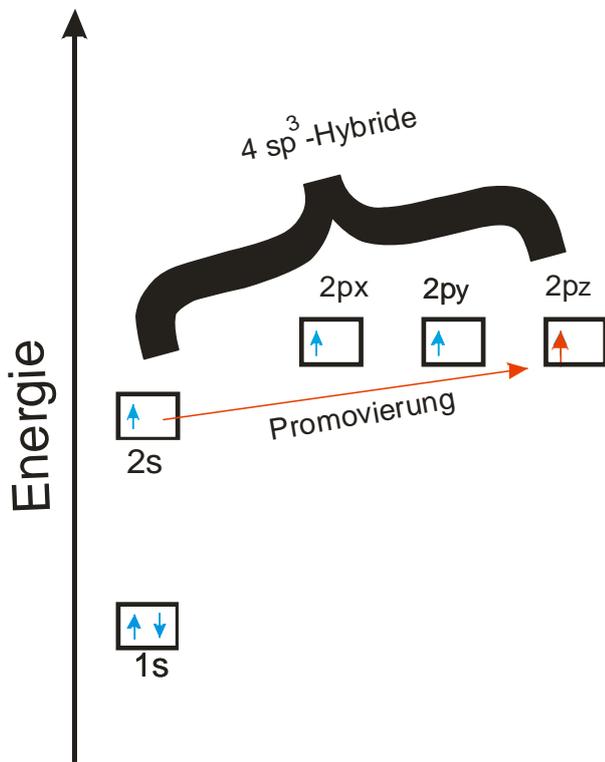


Abb. 14: E-Niveau-Schema des C-Atoms nach der Promovierung

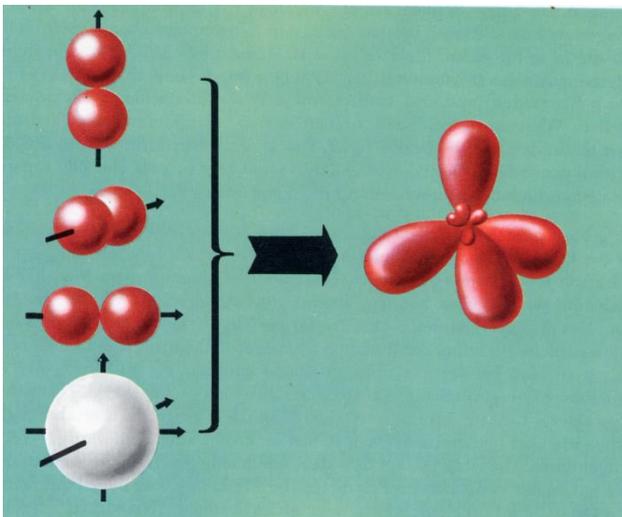
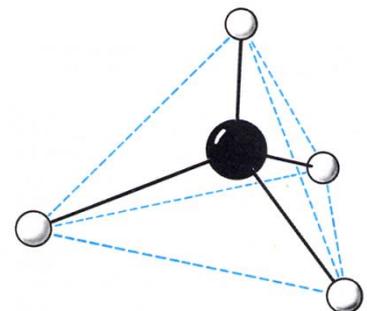


Abb. 15a: sp³-Hybridbildung

Aus 3 p-Orbitalen (eins davon durch Promovierung entstanden) und einem s-Orbital entstehen 4 sp³ Hybride in tetraedrischer Anordnung → gerichtete Bindungen.

Damit haben die Atome im **CH₄-Molekül** folgende Anordnung:

Abb. 26b: tetraedrische Anordnung der Atome im Methan-Molekül



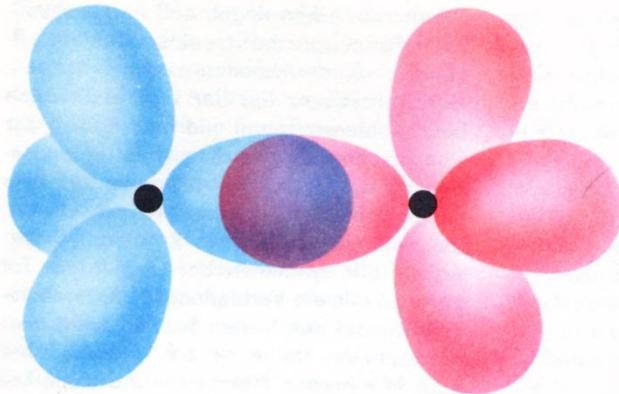
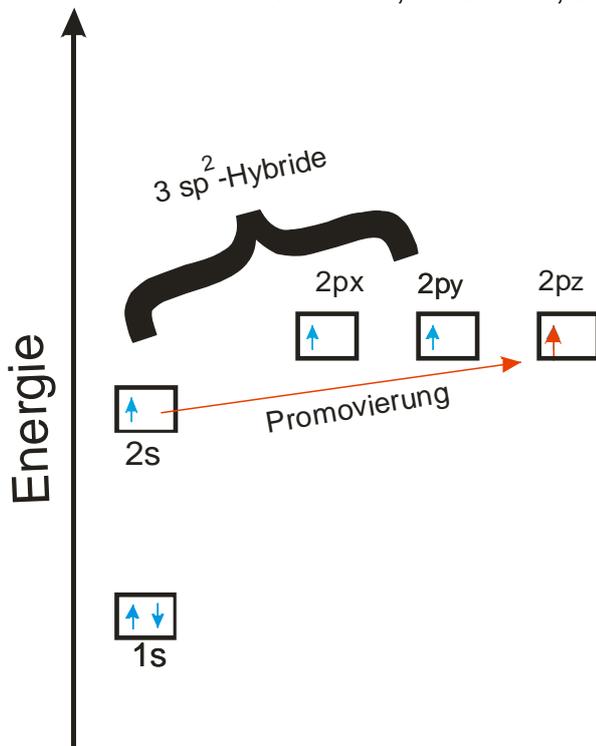


Abb. 16:
Entstehung von Ethan (C₂H₆):

Bildung einer C-C - Einfach- Bindung durch Überlappung je eines sp³-Hybridorbitals zweier C-Atome. Wenn die anderen 6 Hybridorbitale jeweils mit einem 1s-Orbital eines H-Atoms überlappen, entsteht Ethan (schwarze Punkte = C-Atome)
Alle Alkane zeigen diese Einfachbindung

Neben der genannten sp³-Hybridisierung sind nun verschiedene andere Hybridbildungen (e⁻-Zustände) erlaubt, wenn die zu mischenden Funktionen etwa gleiche Energie besitzen. So können aus einem s- und 2 p-Elektronen drei sp²-Hybride, d.h. 3 Wolken, die miteinander einen Winkel von 120° bilden, entstehen, s. folgende Abbildungen.



sp²-Hybridbildung:

Abb. 17a: Darstellung im E-Niveauschema

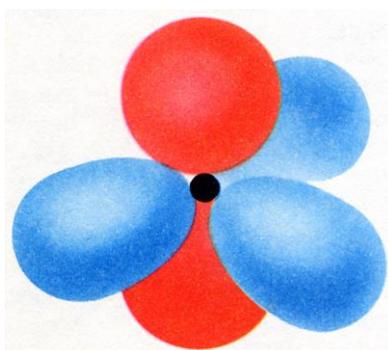


Abb. 18b: Schematische Darstellung eines Kohlenstoffatoms im sp²-Hybridzustand

Zwei p-Orbitale bilden zusammen mit dem 2s-Orbital drei sp²-Hybridorbitale (blau), welche vom Atommittelpunkt (schwarz) aus in die drei Ecken eines gleichseitigen Dreiecks ragen. Das dritte 2p-Orbital (rot) bleibt unverändert; es steht senkrecht zur Ebene des Dreiecks.

Weiterhin ergibt ein s- und ein p-Elektron zwei sp-Hybride, s.u., wobei die beiden Wolken in einer Geraden liegen. Die sp-Hybridisierung liegt vor wenn C-Atome über eine

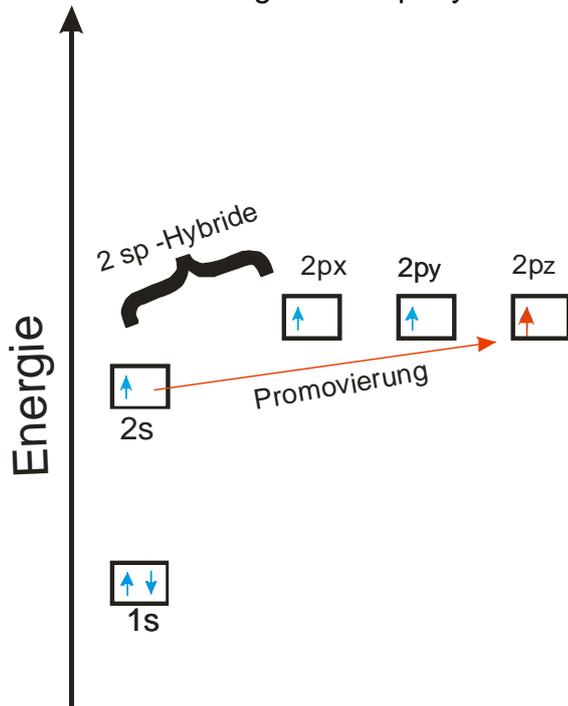


Abb. 18: sp-Hybridbildung: Darstellung im E-Niveauschema

Dreifachbindung miteinander verbunden sind. sp-Hybride entstehen durch Kombination des 2s-Orbitals mit einem 2p-Orbital, s.o. Die beiden sp-Hybridorbitale zeigen in entgegengesetzte Richtung von den Atomen weg, s. Abb. 20. Es bleiben zwei unveränderte 2p-Orbitale übrig.

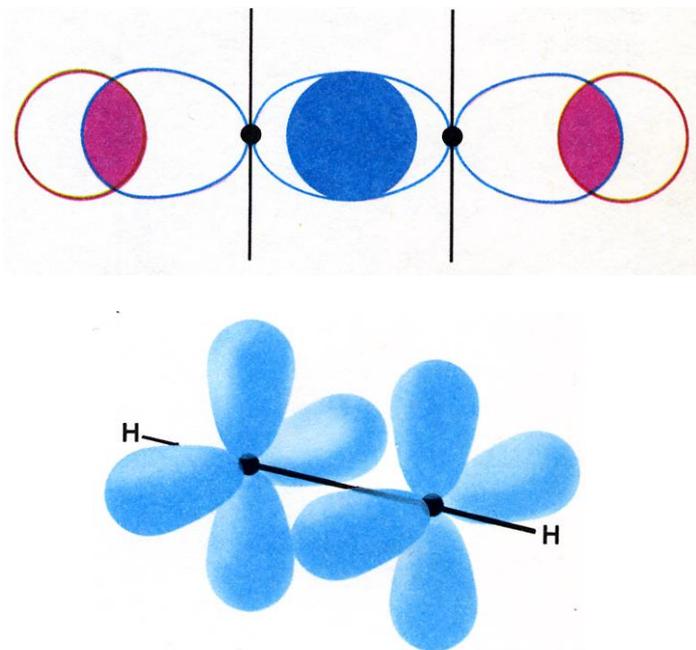


Abb. 19: Ausbildung der Orbitale beim Äthin (Dreifachbindung)

Im Acetylen-Molekül (Acetylen = Äthin = C_2H_2)

$H - C \equiv C - H$ überlappen je 1 sp-Orbital

zweier C-Atome zu einer σ -Bindung (blau) miteinander. Die übrig bleibenden überlappen (je eins pro Atom) mit 1s-Orbitale zweier H-Atome (rot). Dies ist in der oberen Grafik dargestellt. Die Lage des einen Paares unveränderter 2p-Orbitale ($2p_y$) ist durch 2 senkrechte Striche gekennzeichnet; das andere Paar ($2p_z$) steht senkrecht dazu, ragt also nach oben und unten aus der Ebene heraus. Im unteren Bild ist nur die Lage der 2p-Orbitale angedeutet. Die Überlappung geht daraus jedoch nicht hervor. Die Überlappung ist in der nächsten Graphik am Beispiel einer Doppelbindung dargestellt. Daran wird auch der Unterschied zwischen einer σ - und einer π -Bindung deutlich. Demzufolge besteht eine Dreifachbindung beim C aus einer σ - und zwei π -Bindungen.

Die Ausbildung insbesondere der **Doppelbindungen** zwischen den C-Atomen ist Voraussetzung für die Bildung und Herstellung von Polymeren, s.u., denn die Aufspaltung dieser Doppelbindung ermöglicht die Entstehung von C-Ketten (Makromolekülen).

$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ \text{C} = \text{C} \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$
 Beim Äthen = Ethylen (C_2H_4), s. links, **einem der wichtigsten Ausgangsprodukte für die Kunststoffindustrie (\rightarrow Polyethylen)**, entsteht die Doppelbindung durch Ausbildung von sp^2 -Hybriden, s.o.. Dabei sind die beiden Bindungen nicht gleichwertig. Nach den beteiligten Molekülorbitalen unterscheidet man σ - und π -Bindungen:

Verbinden sich zwei C-Atome, die sich im sp^2 -Hybridzustand befinden, dann überlappt zunächst je eines der drei sp^2 -Hybridorbitale miteinander. Das ergibt eine gewöhnliche Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung, in diesem Falle σ -Bindung genannt.

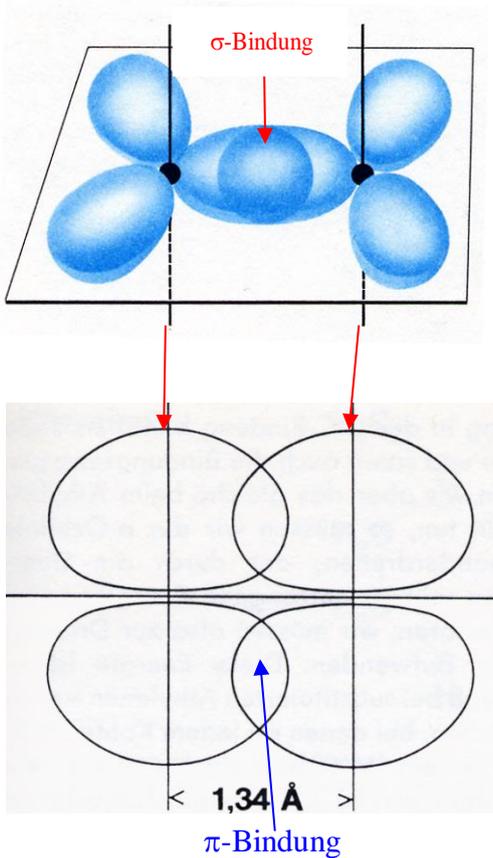


Abb. 20: σ -Bindung zweier C-Atome

Durch Überlappung zweier sp^2 -Orbitale kann ebenso wie durch Überlappung zweier sp^3 -Orbitale eine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung geknüpft werden. Dann bleiben an jedem der beiden Kohlenstoffatome zwei sp^2 -Orbitale übrig sowie je ein normales p-Orbital, dessen Lage durch einen senkrechten Strich angedeutet ist. An die vier restlichen sp^2 -Hybridorbitale heften wir noch bewährtem Muster vier H-Atome.

Abb. 21: π -Bindung zweier C-Atome

Gezeigt ist die mathematisch korrekte Form der Orbitale für Ethylen (Striche in der oberen Abb.)

Sichtbar ist die Überlappung der beiden „normalen“ p-Orbitale. Die daraus resultierende Verbindung bezeichnet man als π -Bindung. Da ihre Überlappung geringer ist als die der sp^2 -Hybride bei der σ -Bindung, ist die π -Bindung schwächer als die σ -Bindung

(\rightarrow bei der Kunststoffherstellung (Polymerisation) wird die π -Bindung aufgebrochen und damit die C-Kettenbildung (Makromoleküle) ermöglicht.)

- Die zur π -Bindung gehörigen Elektronen heißen π -Elektronen. Da die Überlappung der 2p-Orbitale bei der π -Bindung nur dann optimal funktioniert wenn ihre Achsen parallel zueinander stehen, s. Abb. 23, vermindert jede Verdrehung, z.B. um die Achsen der C-C – Bindung die Überlappungsfläche und kostet damit E. Dies ist der Grund dafür, dass die durch eine Doppelbindung verbundenen Teile eines Moleküls nicht mehr frei gegeneinander drehbar sind.

Die nachstehende Darstellung verdeutlicht noch einmal den geschilderten Sachverhalt

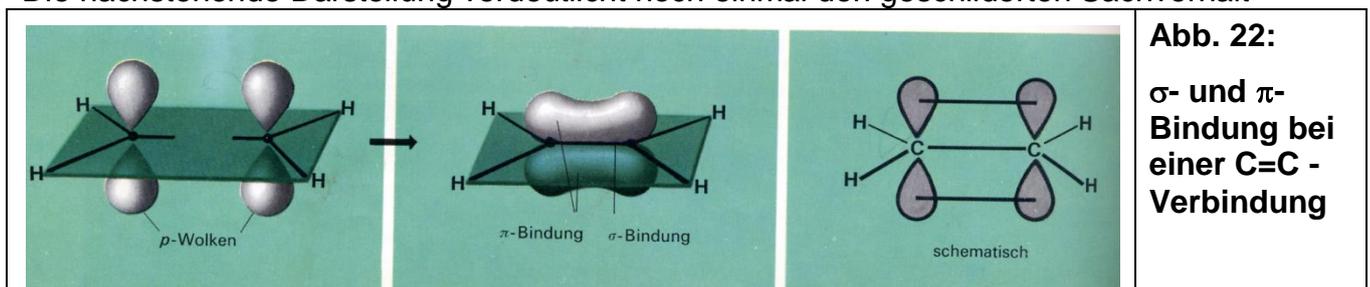


Abb. 22:

σ - und π -Bindung bei einer C=C - Verbindung

Merke:

Bei der **Sigma-Bindung** befinden sich die Elektronen um die Kern-Kernverbindungsachse herum.

Bei der **Pi-Bindung** befinden sich die Elektronen nicht auf der Verbindungslinie der Atomkerne sondern um die Kerne herum.

Da die Überlappung der Orbitale bei der **Sigma-Bindung** größer ist, ist die **Sigma-Bindung** stabiler als die **Pi-Bindung**.

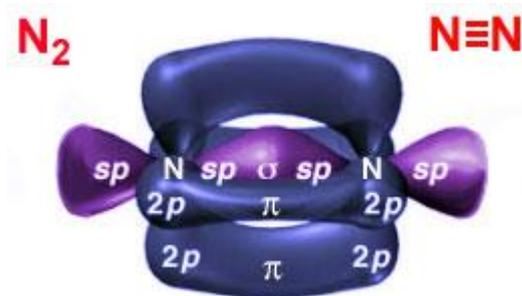


Abb. 23: Dreifachbindung bei N₂

auch die Dreifachbindung beim Stickstoff wird mit Hilfe von Sigma- und Pi-Bindung verständlich.

Man erkennt eine Sigma- und zwei Pi-Bindungen

Auch die aromatischen Kohlenwasserstoffe auf der Basis des Benzols lassen sich mit Hilfe der MO-Theorie und der Hybridisierung erklären. Sie sind für manche Kunststoffe, insbesondere für den Massenkunststoff Polystyrol (s.u.) von Bedeutung.

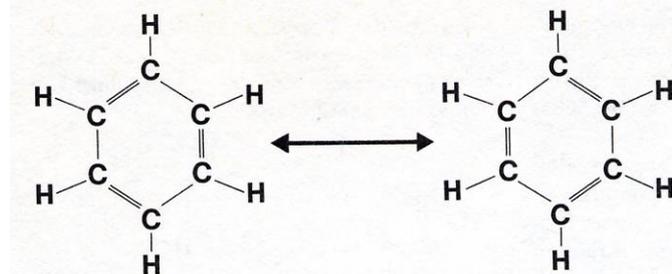
Das Problem ist folgendes: Wegen der relativ geringfügigen Überlappung der p-Orbitale in einer π -Bindung hat jedes Molekül mit einer Doppelbindung die Tendenz, in ein gesättigtes Molekül (ohne Doppelbindung) überzugehen, d. h. durch Bindung weiterer Partner auch die p-Orbitale an gewöhnlichen σ -Bindungen zu beteiligen.

Jedes Kohlenstoffatom wird im Laufe einer solchen Reaktion (\rightarrow **Polymerisation**, s.u.) „umhybridisiert“, d. h. es geht vom sp^2 -Hybridzustand in den sp^3 -Hybridzustand über. Je mehr Doppelbindungen ein Molekül hat, umso größer ist im allgemeinen die Tendenz, weitere Atome an sich zu binden, um schließlich nur noch Einfachbindungen mit der insgesamt größtmöglichen Bindungsenergie zu besitzen.

Mehr oder weniger zeigen alle Moleküle mit mehreren Doppelbindungen ein solch labiles Verhalten.

Nur eine - allerdings recht große - Gruppe macht eine Ausnahme. Der typische Vertreter dieser Gruppe ist das Molekül des Benzols.

Benzol hat, wie sich aus den Analysen ergibt, die Bruttoformel C_6H_6 . Diese Zusammensetzung kann nicht wie oben als lineares Polymer dargestellt werden. 1865 kam der deutsche Chemiker August Kekule darauf, wie die Strukturformel in der damals sich eben erst durchsetzenden, uns heute geläufigen Strichschreibweise zu formulieren sei, s. Abb. 24



Nun erklärt allerdings die Tatsache, daß man das Benzolmolekül als Sechseck schreiben kann, allein weder seine besondere Stabilität noch sein ungewöhnliches Verhalten bei chemischen Reaktionen.

Abb. 24: Strukturformel und Mesomerie beim Benzol

Diese Fragen wurden erst durch quantenchemische Berechnungen im Laufe des 20. Jahrhunderts geklärt. Ausgangspunkt war die schon von Kekulé stammende Einsicht, dass man nicht nur eine Formel des Benzols schreiben kann, sondern deren zwei, die sich durch nichts als durch die Lage der Doppelbindungen unterscheiden (die Kohlenstoffsymbole C werden bei solchen Ringformeln der Übersichtlichkeit halber gern weggelassen, s. nächste Abb..

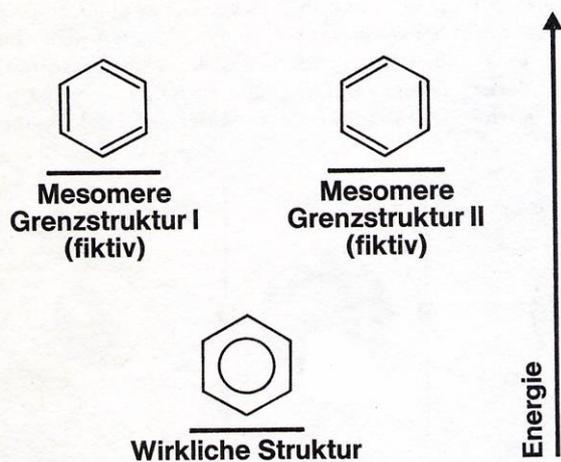


Abb. 25: Energiezustände beim Benzol
Mesomerie und Energiezustände beim Benzol

Die theoretischen Betrachtungen haben ergeben, dass in solchen und in ähnlichen Fällen keine der beiden Formeln den wirklichen Bindungszustand des Moleküls beschreibt. Dieser liegt vielmehr dazwischen, er ist gewissermaßen ein Mittelwert der beiden (wirkliche Struktur), s. Abb. 25.

Man spricht von einer »**Mesomerie**« zwischen den »mesomeren Grenzstrukturen«, und es hat sich als allgemeingültige Regel erwiesen, dass immer dann, wenn von einem Molekül mehrere mesomere Grenzformeln geschrieben werden können, der tatsächliche, in der üblichen chemischen Notation gar nicht formulierbare Bindungszustand eine geringere Energie hat, also stabiler ist als jeder der fiktiven, durch die mesomeren Grenzformeln angegebenen Bindungszustände, s. Abb. 26.

Die Situation wird deutlicher, wenn wir uns die Orbitale im Benzolmolekül ansehen. Wir setzen dazu sechs Kohlenstoffatome im sp^2 Hybridzustand zusammen und stellen fest, dass bei gleichen Abständen zwischen allen Kohlenstoffatomen jedes der sechs p-Orbitale, die senkrecht zur Ebene des Ringes stehen, genauso gut mit dem p-Orbital seines linken wie seines rechten Nachbarn überlappen kann, s. Abb. 27.

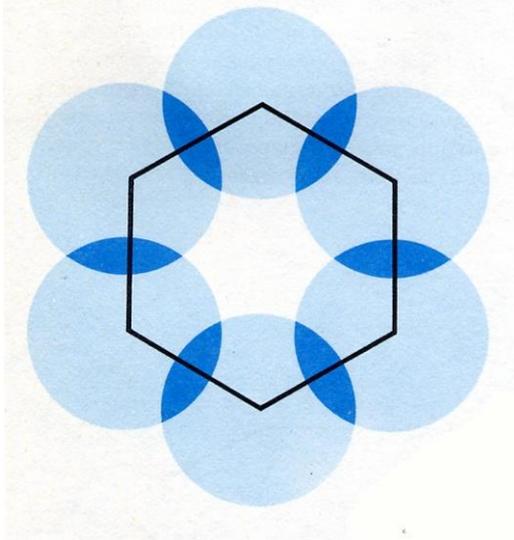


Abb. 26:
Benzolring, Draufsicht mit sich überlap-
penden Kohlenstoffatomen im sp^2 Hy-
bridzustand → „delokalisierte“ Elektronen

Das Endergebnis ist, dass die π -Elektronen über den ganzen Ring gleichmäßig verteilt sind. Man spricht von »delokalisierten Elektronen«, und diese Delokalisierung zusammen mit der leichten Beweglichkeit der Elektronen erinnert stark an das Verhalten der Elektronen im "Elektronengas« eines Metallkristalls, s. Metallkunde, 2. Semester.

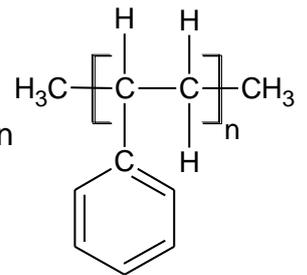
Um die Besonderheiten des Elektronensystems im Benzolmolekül auch in der Strukturformel anzudeuten, benutzen die Chemiker für den Benzolring oft folgendes Symbol:

Die Wasserstoffatome werden dabei der Einfachheit halber auch noch weggelassen. Die Schreibweise des Sechsrings mit drei Doppelbindungen ist allerdings ebenfalls in Gebrauch.



Der bekannteste Kunststoff, bei dem entlang der Makromolekülkette Benzolringe angeordnet sind, ist das Polystyrol, Strukturformel s. rechts. Man sieht, dass der Benzolring nicht an der Kettenbildung beteiligt ist.

Ringmoleküle (5-, 6-, oder 7-Ringe), bei denen ein oder mehrere Kohlenstoffatome im Ring durch andere Atome (Heteroatome) ersetzt sind, heißen „heterocyclische“ Verbindungen.

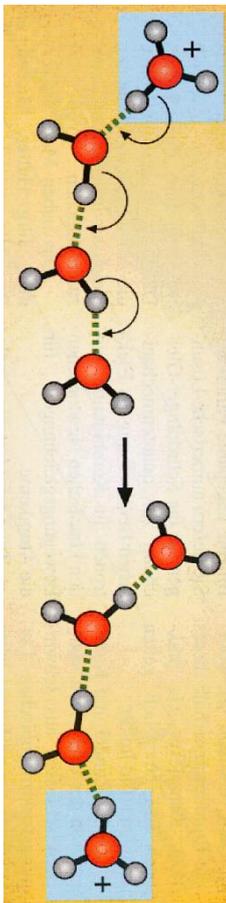


4.3 Nebenvalenzen:

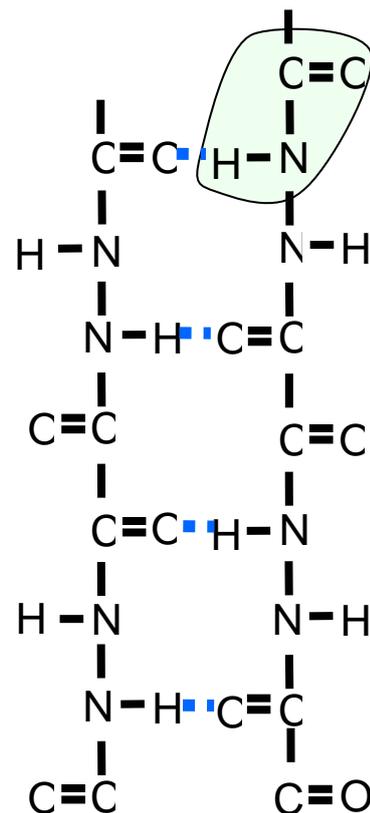
1) H-Brückenbindung

- Wichtiger Fall der permanenten Dipol-Wechselwirkung.
- Ermöglicht eine gerichtete Bindung zwischen valenzmäßig abgesättigten Molekülen.
- Wasserstoffbrücken bilden sich bevorzugt zu benachbarten O-Atomen

Bsp.: Wasser



Bsp.: Polyamid



Kräfte zwischen den Ketten → Thermoplaste,
Hydronium, Diffusion, Clusterbildung →

Abb. 27 + 28: Nebenvalenzbindungen

DNA

2) van-der-Waals-Bindung

Da die Elektronen in den Atomen der Moleküle stets in Bewegung sind, fallen die Zentren der Ladungsdichten der Elektronen und der positiven Kerne nicht immer zusammen, so daß eine *vorübergehende Polarisierung* des Moleküls oder Edelgasatoms auftreten kann (s. Abb.). Moleküle, die sich einander dicht genug und mit der richtigen Orientierung genähert haben, können als Folge dieser Dipolbildung aneinander haften bleiben, wobei sich die ungleich geladenen Molekülteile gegenseitig anziehen. Da aber die Elektronen ständig in Bewegung sind, ändert sich die Ladungsverteilung in den Atomen und Molekülen fortwährend, so daß diese Anziehungskräfte nur sehr schwach sein können.

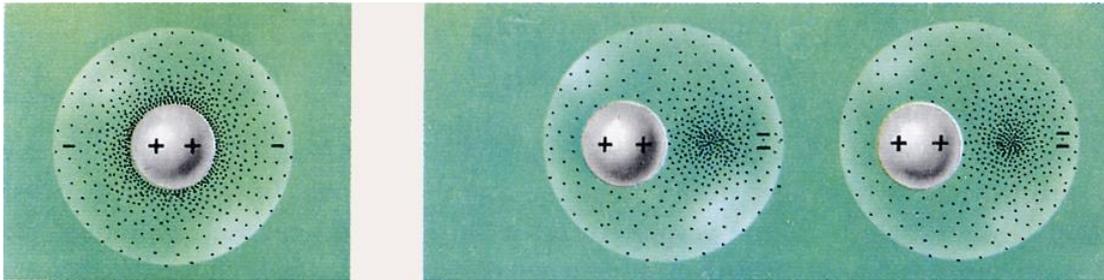


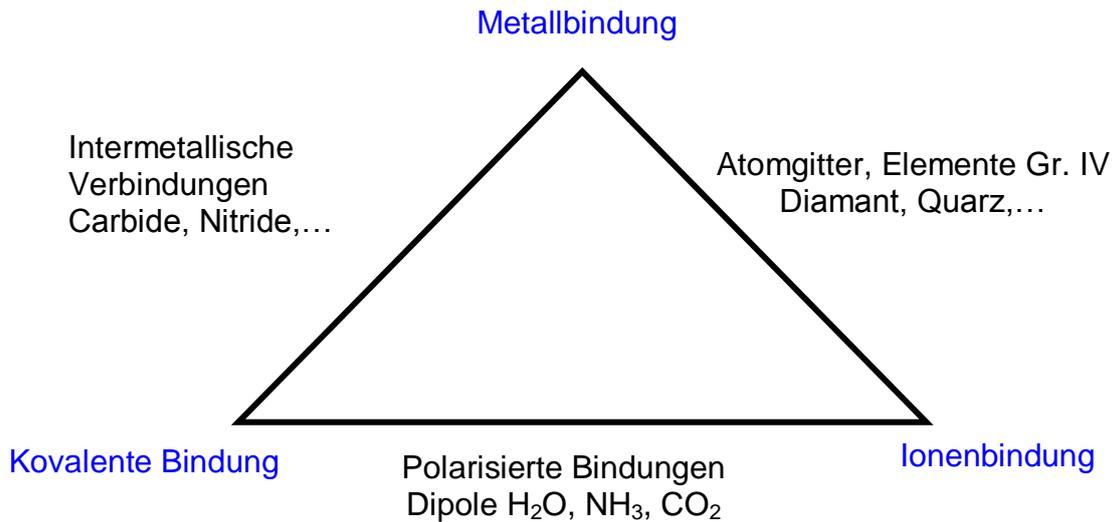
Abb. 29: Van-der-Waals-Kräfte zwischen Heliumatomen

Die Leichtigkeit der Polarisierung und damit auch die Anziehungs-F wächst mit der Zahl der Elektronen, also mit der Anzahl und Kompliziertheit der im Molekül enthaltenen Atome, wobei allerdings auch die Form eines Moleküls (seine Oberfläche) einen wichtigen Einfluß hat. Siede- und Schmelzpunkt flüchtiger Verbindungen steigen daher im Allgemeinen mit zunehmender Masse der Moleküle an. Wenn aber die Moleküle dauernd (nicht nur vorübergehend) polarisiert sind (so genannte *permanente Dipole*), oder wenn Wasserstoffbrücken (s.o.) gebildet werden können, sind die Anziehungskräfte zwischen ihnen wesentlich größer, und die Flüchtigkeit ist (unter Umständen trotz niedrigerer Molekülmasse) geringer → Wasser!

3) Ionenbindung in Polymeren

- Metallionen im Polymerverband wirken als sehr starke Dipole (z.B. Zn^{2+} , Cd^{2+}).
- Die Bindungsenergie kann höher sein als bei der H-Brückenbindung.
- Tritt nur in Ausnahmefällen auf.

Chemische Bindungen, Kurzfassung



Für die Eigenschaften der Kunststoffe

Zwischen den

(Bei den Metallen ist die Metallbindung, s. VL Teil1)

Bindungsenergien: (Maß für die Stabilität der Verbindung)

- Kovalente Bindung
 - Einfachbindung C–C ≈ 358 kJ/mol \rightarrow -Alkane
 - Doppelbindung C=C ≈ 610 kJ/mol \rightarrow Alkene
 - Dreifachbindung C \equiv C ≈ 830 kJ/mol \rightarrow Alkine
 - Einfachbindung Si–Si ≈ 445 kJ/mol \rightarrow Silikone
- Dispersionskräfte 0,3 - 4 kJ/mol
- Permanente Dipolkräfte 2 - 12 kJ/mol
- Wasserstoffbrücken 3 - 25 kJ/mol
- Ionenbindung 2 - 30 kJ/mol

Umrechnung der Bindungsenergie in Festigkeit:

- C-C Bindung \Rightarrow theoretische Festigkeit von 14000 – 19000 N/mm² für Polyethylen (PE)
- Bindungsenergie der Dispersionskräfte \Rightarrow theoretische Festigkeit von 450 N/mm²
- Gemessene Festigkeit 10 – 100 N/mm²

Folgerung:

Kunststoffe: Basisinformationen

(Beispiel: PE)

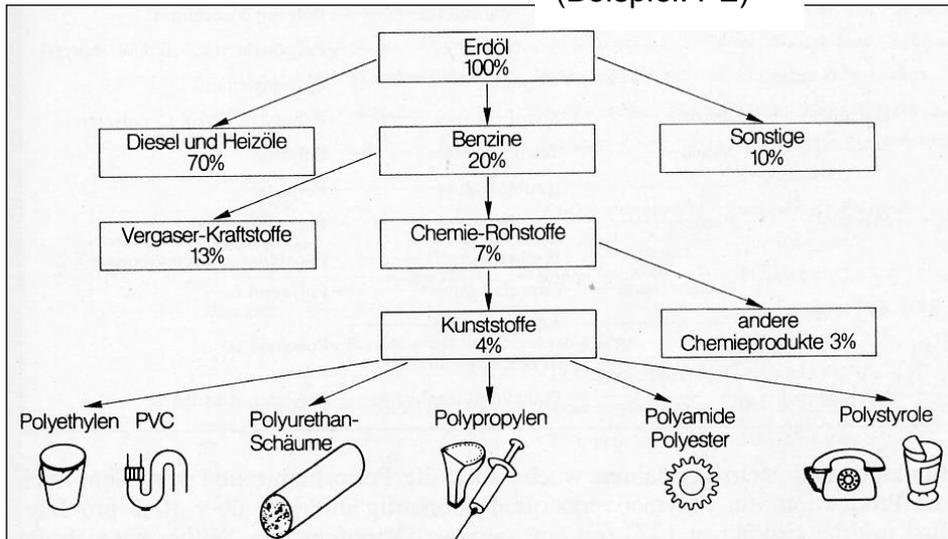


Abb. 30: Vom Erdöl zum Kunststoff (%-Zahlen gültig für die BRD 1998)

Die Rohstoffbasis für die vollsynthetischen Werkstoffe sind Grundstoffe sind Erdöl, Erdgas, Kohle, Kalk, Wasser, Stickstoff, (Sand) u.a.

→ praktisch

Tabelle: Einteilung der Kunststoffe nach den am Aufbau der Molekülkette oder des Grundgerüsts beteiligten Elementen

C	Kohlenstoff-Polyolefine, Dienpolymerisate, Polyvinylverbindungen, Polyphenylen, Polypropylen
C+O	Kohlenstoff und Sauerstoff- Polyester, Polycarbonate, Polyacetale, Polyether, Phenoplaste
C+O+N	Kohlenstoff + Sauerstoff + Stickstoff - Polyamide, Polyurethane, Polyimide, Epoxyharze
C+S	Kohlenstoff und Schwefel: Alkylensulfid-Elastomer, vulkanisierte Kautschuke, Polysulfon
C+N	Kohlenstoff und Stickstoff: Aminoplaste
Si+O	Silicium + Sauerstoff: Polysiloxane

Die Kunststoffe enthalten außerdem Wasserstoff, in wenigen Fällen (PTFE, FEP) statt dessen Fluor.

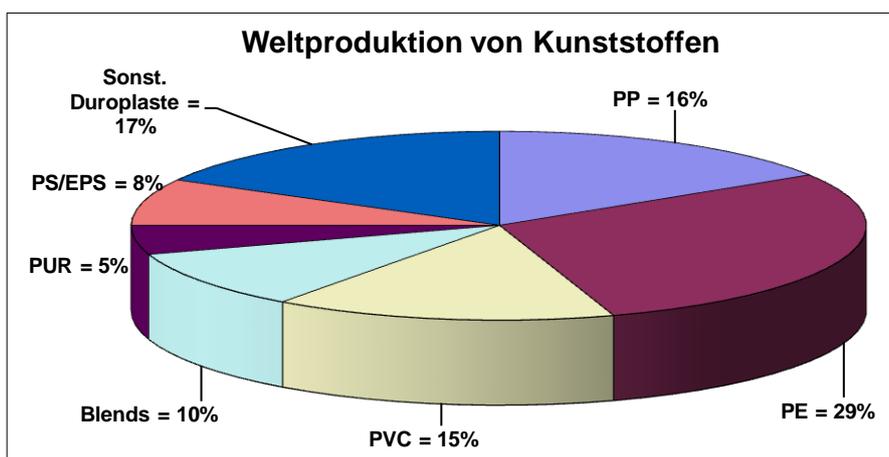


Abb. 31: Anteil der wichtigsten Kunststoffe an der Weltproduktion

2007:
Kunststoffe: 250 Mio. t
Stahl: 1000 Mio. t

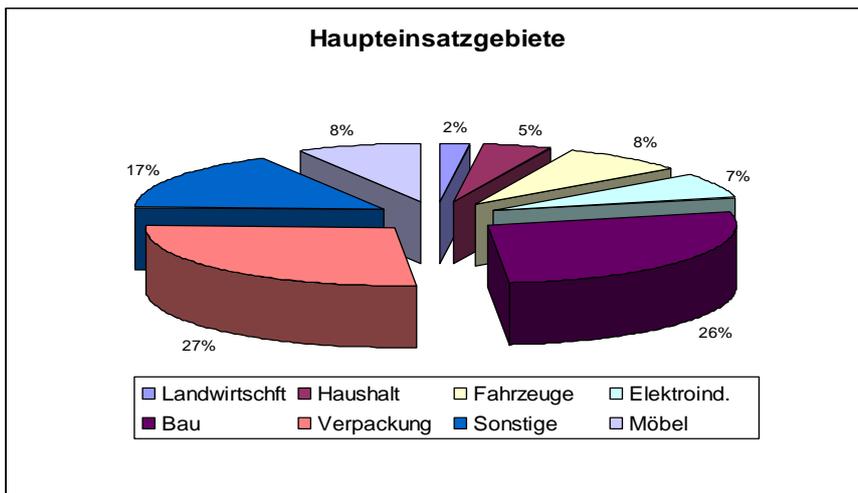


Abb. 32: Einsatz von Kunststoffen in vielen Bereichen der Industrie und im täglichen Leben

5. Aufbau der Kunststoffe:

5.1 chemischer Aufbau

- C, H ⇒ reine Kohlenwasserstoffe z.B. PE, PP, PS
- N, O ⇒ z.B. PMMA, PC, PA, PET, ABS
- S ⇒ in vielen Kautschuken
- Cl ⇒ chlorierte Kohlenwasserstoffe PVC
- Si ⇒ Alle Silikonkautschuke
- F ⇒ fluorierte Kohlenwasserstoffe, z.B. PTFE

Die Rohstoffe für die abgewandelten Naturprodukte sind Cellulose, Eiweiß, Naturkautschuk und Naturharze.

Als Kunststoffe bezeichnet man nur solche makromolekularen Stoffe, die ganz oder teilweise organisch aufgebaut sind, d.h. Kohlenstoff und meist Wasserstoff enthalten. Wenn noch andere Atomarten (Elemente) beteiligt sind, bezeichnet man diese als Heteroatome. Die häufigsten Atomsorten sind O, N, S.

Ausgangspunkt ist i.a. eine Vielzahl von Monomeren (einzelne Moleküle), z.B. Ethylen, s. Abb.42. aus denen sich durch chemische Reaktion ein Polymer bildet (Näheres s. Kap. „Chemische Grundlagen“ und „Herstellung der Kunststoffe“). Kohlenstoff besitzt vier Valenzen. Zwei davon werden für die Bildung linearer Ketten benötigt. Unter allen Elementen ist nur der Kohlenstoff in der Lage, mit seinesgleichen sehr stabile, lange Ketten aufzubauen. Die zwei Valenzen, die nicht an der Kettenbildung beteiligt sind, werden z.B. beim Polyethylen mit Wasserstoff besetzt. Dieser Kunststoff bildet sich aus monomeren Ethylenmolekülen nach folgender Gleichung:

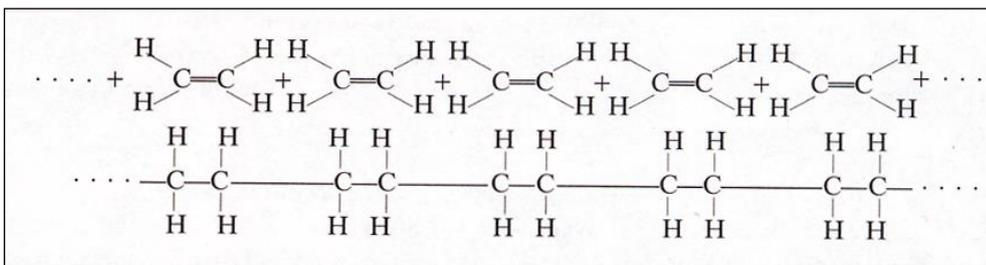


Abb. 33: Vom Monomer zum Polymer → Kettenbildung durch Aufbrechen von π -Bindungen von C=C Doppelbindung

Aus den chemischen Bedingungen ergibt sich der strukturelle Aufbau der Kunststoffe, s.u.

5.2 struktureller Aufbau der 3 Kunststoffklassen/1

Die hochmolekularen (makromolekularen) Stoffe unterscheiden sich durch:

- Art und Anordnung der an ihrem Aufbau beteiligten Elemente = chemische Struktur
- Größe der Makromoleküle
- Gestalt der Makromoleküle
- Anordnung der Makromoleküle zueinander, s.u.

Nach ihrem Aufbau unterscheidet man 3 Klassen von Kunststoffen:



- **Thermoplaste** (Plastomere, amorph oder teilkristallin)



- **Duroplaste** (Duromere)



- **Elastomere** (Kautschuke)

Worin unterscheiden sich diese 3 Klassen von Kunststoffen ?

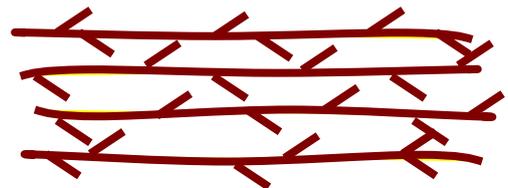
Kunststoffe: struktureller Aufbau/2

Alle Kunststoffe bestehen aus Kettenmolekülen!

1: lineare Kettenmoleküle



2: verzweigte Kettenmoleküle

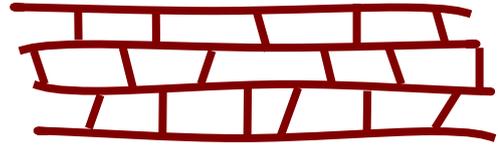


3: vernetzte Kettenmoleküle

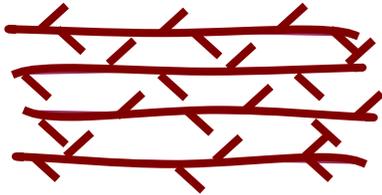


schwach

oder
stark vernetzt

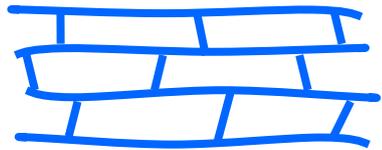


Lineare Kettenmoleküle



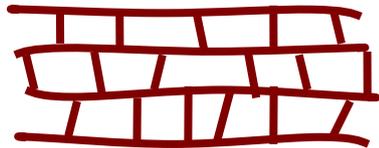
Verzweigte Kettenmoleküle

Thermoplaste



Schwach vernetzte Kettenmoleküle

Elastomere



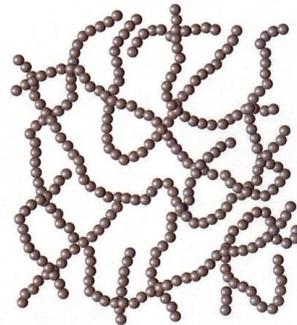
Stark vernetzte Kettenmoleküle

Duroplaste

Kunststoffe: struktureller Aufbau/3

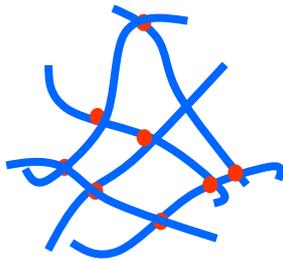
Kunststoffklassen und deren Strukturen

- Thermoplaste
- Amorph
 - Amorphe (regellose, wirre) Anordnung von linearen u./o. verzweigten Kettenmolekülen, Wattebauschstruktur
 - Klar, durchsichtig
 - z.B.
- Teilkristallin
 - Lineare u./o. verzweigte Kettenmoleküle teils in kristalliner teils in amorpher Anordnung.
 - Die Moleküle sind in den kristallinen Bereichen strauchartig gebündelt, weitgehend parallel angeordnet \Rightarrow Hexenbeisenstruktur.
 - Opak, durchscheinend
 - z.B.

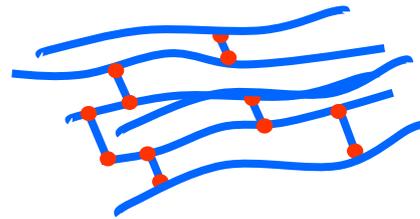


- **Elastomere** (Kautschuke)

Weitmaschig vernetzte Kettenmoleküle, z.B. Weichgummi, PUR-Weichschaum



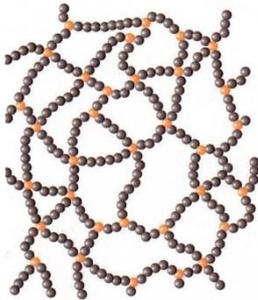
regellos



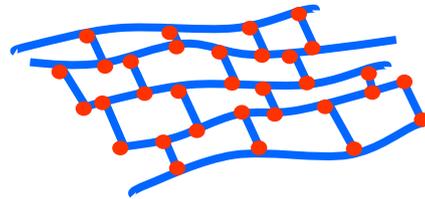
orientiert

- **Duroplaste**

Engmaschig vernetzte Kettenmoleküle
z.B. EP-Harz, PU-Harz, Hartgummi, PUR Hartschaum.

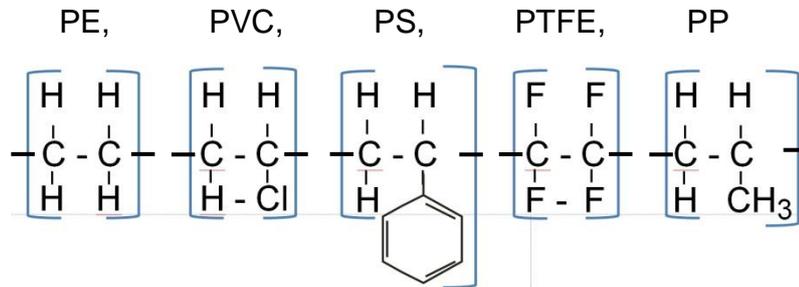


regellos



orientiert

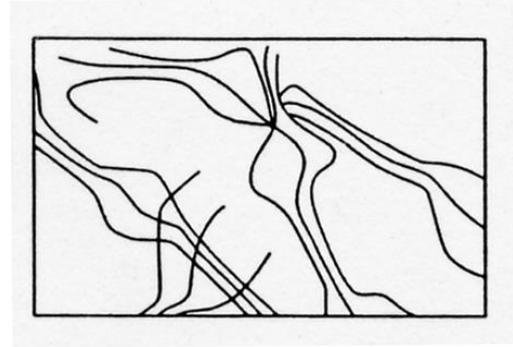
Monomere von



5.3 Gegenüberstellung Thermoplaste - Elastomere – Thermoplast. Elastomere (TPE)

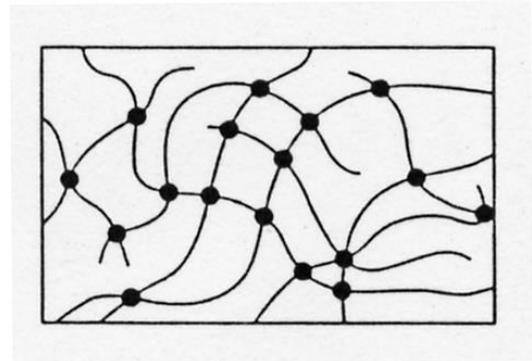
Thermoplaste

- ⇒ wird fließfähig und verformbar durch Wärmeeinwirkung und Scherkräfte
- ⇒ erstarrt beim Abkühlen
- ⇒ rein physikalischer Prozess ohne chemische Umwandlung oder Vernetzung
- ⇒ Verformungsprozess wiederholbar



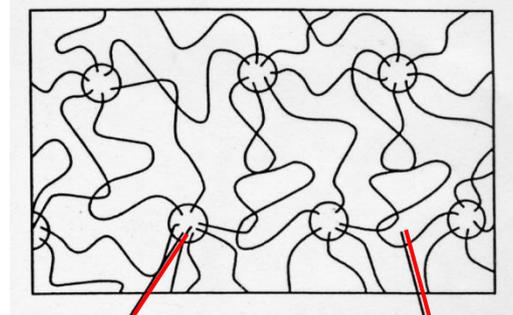
Elastomere

- ⇒ plastische Kautschukmasse, durch Wärmeeinwirkung vernetzbar
- ⇒ Vernetzung ist ein chemischer Prozess, Kautschukmolekülketten verknüpfen sich
- ⇒ danach gummielastische Eigenschaft (hält länger thermischer und mechanischer Beanspruchung stand)
- ⇒ durch erneute Wärmeeinwirkung nicht wieder verformbar



NEU: Thermoplastische Elastomere Basis: Styrol-Block-Copolymer (am Beispiel SEBS)

- ⇒ wird fließfähig und verformbar durch Wärmeeinwirkung und Scherkräfte
- ⇒ Moleküle aus thermoplastischen Polystyrol-Endblöcken und elastischem Ethylen-Butylen-Mittelblock
- ⇒ beim Abkühlen bilden sich physikalische Vernetzungsstellen (Polystyrol-Domänen) und verbinden die elastischen Ethylen-Butylen-Blöcke zu einem festen räumlichen Netzwerk, s. Abb. rechts
- ⇒ dadurch sind die elastischen Eigenschaften mit chemisch vernetztem Kautschuk vergleichbar
- ⇒ Verformungsprozess wiederholbar, somit problemlose Wiederverwertung von



PS-Domäne Ethylen-buthylen Netzwerk

Produktionsabfällen ohne Beeinträchtigung des mechanischen Wertniveaus möglich !

5.4 Isomerie

Verbindungen, die die gleiche Summenformel, d.h. dieselbe Anzahl und Art von Atomen aber unterschiedliche Struktur aufweisen, nennt man **isomer**. Man unterscheidet 2 Arten der Isomerie:

- **Strukturisomerie:**

liegt vor wenn die Verbindungen *dieselbe* Molekülformel und *dieselben* Bindungen zwischen den Atomen, aber eine *unterschiedliche* Anordnung der Atome im Raum haben.

- **Stereoisomere**

- haben die gleiche Summenformel und die gleiche Struktur (Konstitution) unterscheiden sich aber durch die räumliche Anordnung der Atome
→ Enantiomere

- **Physikalische und chemische Eigenschaften werden überwiegend von der Struktur des Moleküls bestimmt. Isomere Moleküle verleihen daher den zugehörigen Verbindungen unterschiedliche Eigenschaften** → Beispiele s. Abb. 35 und 36.

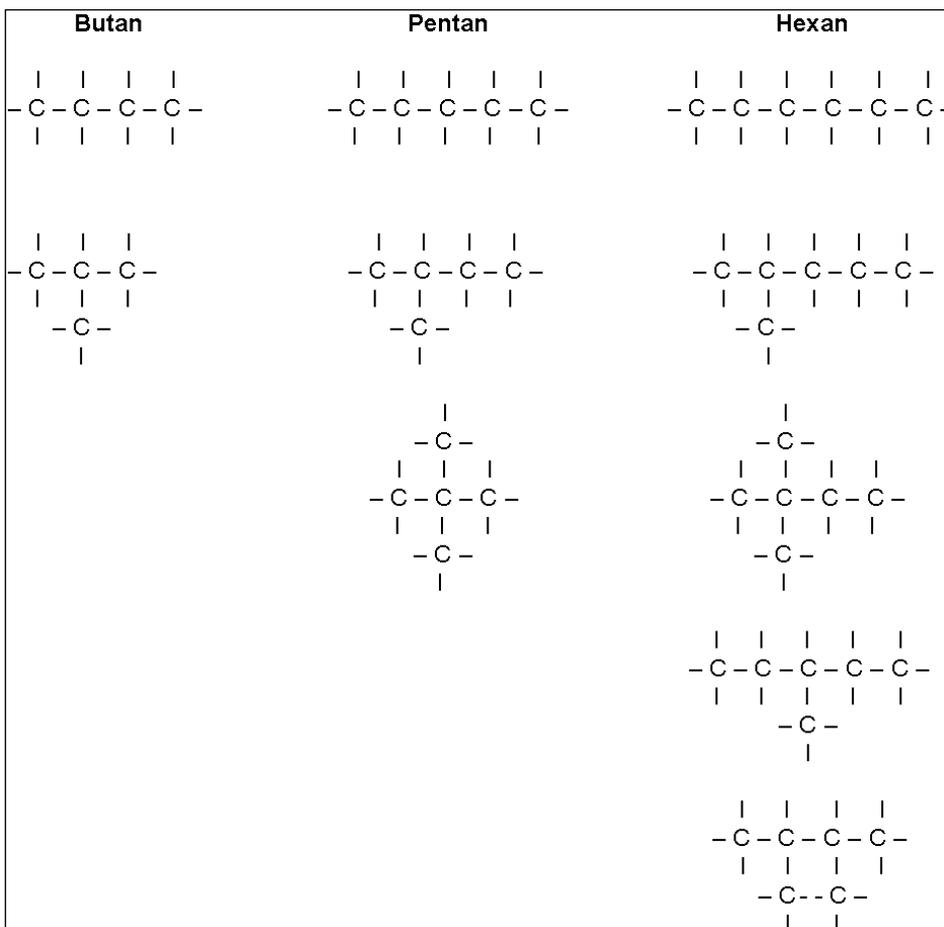
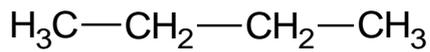
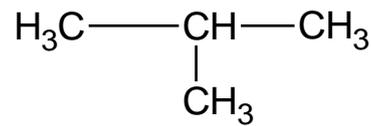


Abb. 34:
Struktur-Isomerie am
Beispiel verschiedener
Alkane



n – Butan
Sdp. $-0,5^\circ\text{C}$
Smp. -135°C



i – Butan (2 Methylpropan)
Sdp. 10°C , Smp. -145°C

Abb. 35: Einfluss der Strukturisomerie auf die Eigenschaften des Butans

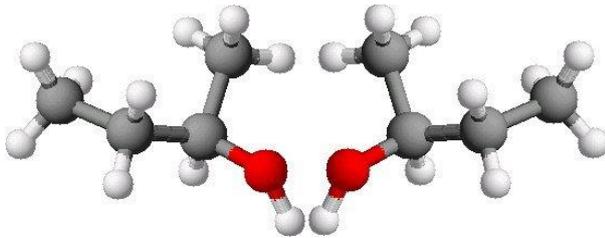


Abb. 36:
2-Butanol als Beispiel für ein Enantiomer
(Spiegelbild-Isomer)

Da die meisten physikalischen Eigenschaften, wie Schmelz- und Siedepunkte bei Enantiomeren identisch sind, sind sie für die Eigenschaften der Kunststoffe nicht von Bedeutung (wohl aber in der Medizin → Kontergan)

5.5 Taktizität

Die **Taktizität** (von griech. taxis = Anordnung) beschreibt die Art und Weise, wie vorhandene Reste an der Hauptkette von Kunststoffmolekülen hängen.

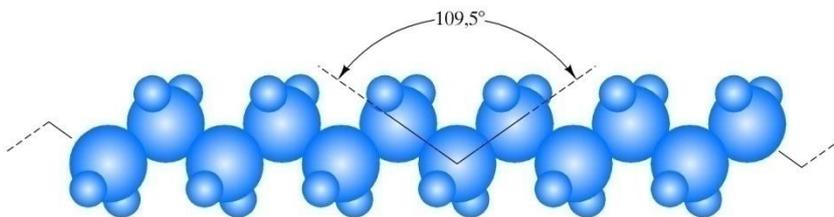


Abb. 37:
Die „sägezahnartige“ Geometrie eines vollständig gestreckten Moleküls. Die relativen Größen von Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen sind in der Polyethylen-konfiguration dargestellt.

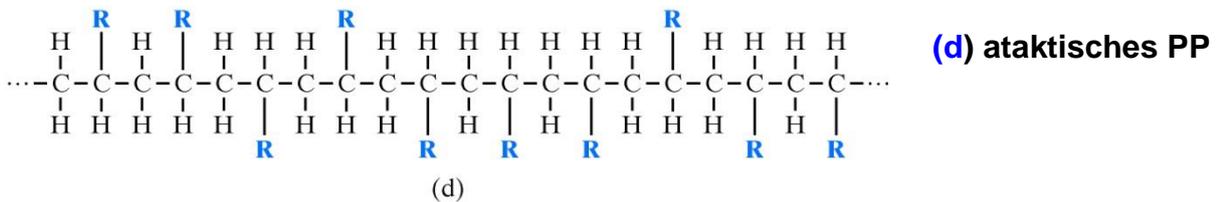
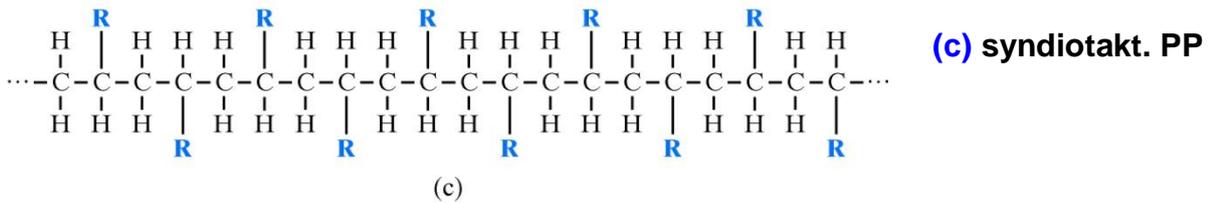
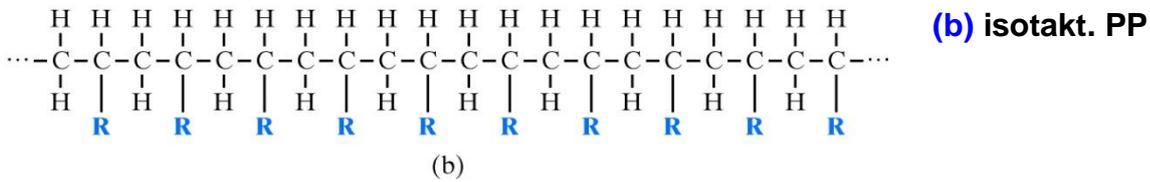
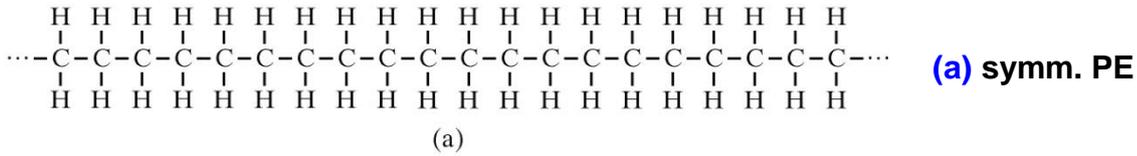


Abb. 38:

(a) Das symmetrische Polyethylen-Molekül. Ein unsymmetrisches Molekül entsteht, wenn ein H in jedem Mer durch eine große Seitengruppe *R* ersetzt wird.

In der isotaktischen Struktur (b) befinden sich alle *R* auf einer Seite. Bei der syndiotaktischen Struktur (c) sind die Seitengruppen *R* abwechselnd auf gegenüberliegenden Seiten angeordnet. Am unregelmäßigsten ist die ataktische Struktur (d), in der sich die Seitengruppen ungeordnet an beiden Seiten abwechseln.

Zunehmende Unregelmäßigkeit verringert die Kristallinität, während Steifigkeit und Schmelzpunkt steigen. Für $R = \text{CH}_3$ zeigen die Graphiken (b) bis (d) verschiedene Formen von Polypropylen. (Man kann sich diese Zeichnungen als „Draufsichten“ der eher räumlichen Darstellung von Abb. 37 vorstellen.)

Die Komplexität der Molekularstruktur kann weiter gesteigert werden, wenn statt einer Gruppe ein polymeres Molekül angelagert wird, s. Abb. 39.

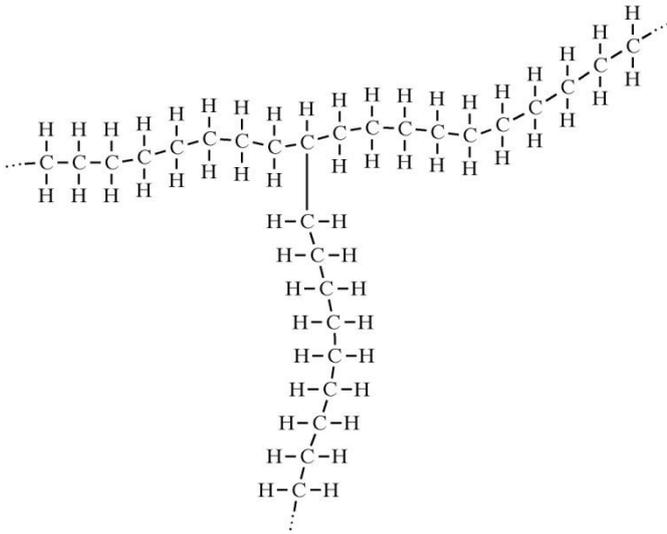


Abb. 39:

Bei der Verzweigung lagert sich ein polymeres Molekül an der Seite der Hauptmolekülkette an.

Allgemein gilt, dass die Kristallinität mit steigender struktureller Komplexität des Werkstoffes fällt, z.B.

symmetrisches PE:	Kristallinität bis	%
verzweigtes PE:	Kristallinität bis	%
isotaktisches PP:	Kristallinität bis	%
ataktisches PP:	Kristallinität <	%

Klassen und Aufbau der Kunststoffe, Kurzfassung

- **Thermoplaste**
-
- **Duroplaste**
-
- **Elastomere:**
- **TE =**

Isomerie und **Taktizität** sind Besonderheiten bei der Struktur der Kunststoffe



6. Kunststoffarten → Anwendungsbeispiele:

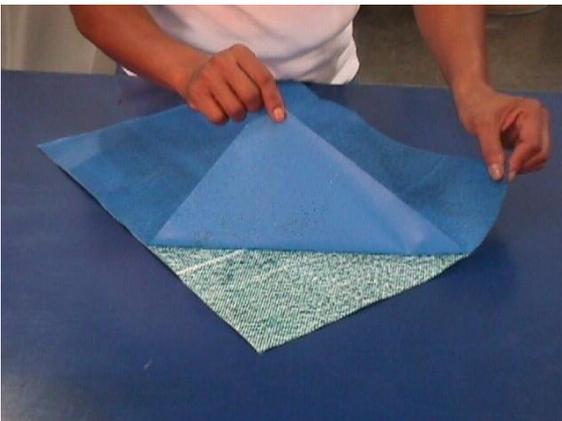
Homopolymere, Copolymere, Polymerblends

6.1 Duroplaste

- Oberbegriff für räumlich engmaschig vernetzte Kunststoffe.
- sind i.d.R. hart und lassen sich nicht thermoplastisch verarbeiten.
- die Formgebung erfolgt vor oder während der endgültigen Vernetzung (Härtung).
- weitere Bearbeitung: mechanisch oder durch kleben.
- sind i.d.R. Homopolymere.

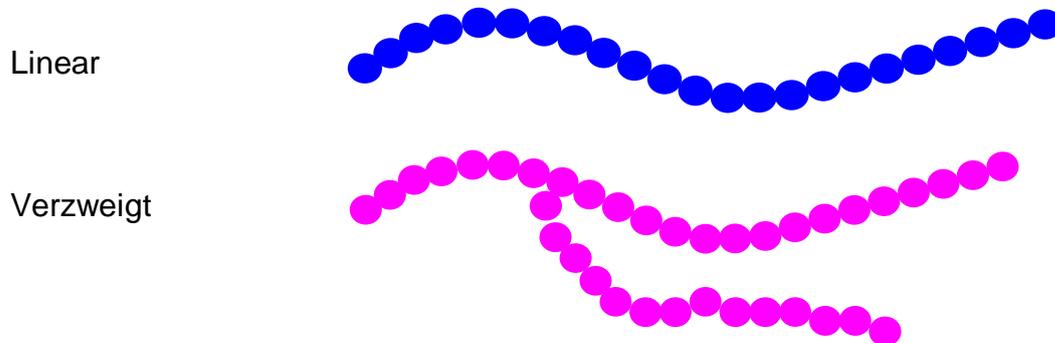


- Verarbeitung als:
 - Härtbare Formmassen (Vernetzung beim Verarbeiten)
 - Prepregs (Halbzeuge aus Fasermatten und ungehärteter Matrix)
- werden oft mit Füllstoffen (billig) angereichert.
- und/oder mit Verstärkungsstoffen (Fasern) optimiert.
- gehen mit zunehmender Temperatur vom harten Zustand in die Zersetzung über → ZSD (s.u.)
- z.B. EP-Harz, PU-Harz, Polyformaldehyd (Bakelit),...



6.2 Thermoplaste - 6.2.1 Homopolymere

- Zahlreiche Varianten
 - amorph, teilkristallin
- Homopolymere bestehen nur aus einer Monomerart, z.B. PP (Polypropylen), PS (Polystyrol)



Produktbeispiel Polystyrol: → Zugprobe

- Mechanische Eigenschaften
 - spröde, wenig dehnfähig, hart, fest
- Optische Eigenschaften
 - transparent, durchsichtig, Oberflächenglanz
- Chemische Eigenschaften
 - lebensmittelecht !!
 - geschmacksneutral, ungiftig, nicht abfärbend,
 - Sperrwirkung gegen Wasserdampf (Aus-trocknen), Luft (Zersetzung), Aromastoffe
 - lichtbeständig, beständig gegen Inhalt, säure- und laugenbeständig
- Elektrische Eigenschaften
 - keine statische Aufladung



6.2.2 Thermoplaste – Copolymere + Pfropfpolymerisate

Polymere können aus verschiedenen Sorten Monomeren aufgebaut sein.

Zusammenlagerung kann durch

- Polymerisation,
- Polyaddition oder
- Polykondensation erfolgen

Statistisches Copolymer



Alternierendes Copolymer



Blockcopolymer

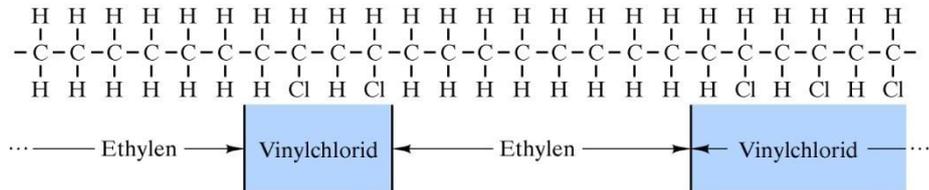


Abb. 40: Ein Copolymer aus Ethylen und Vinylchlorid ist mit einem Mischkristall bei Metallen vergleichbar, s. Metallkunde

- Die Ketten und/oder Seitenketten bestehen aus zwei oder mehr Monomeren
- z.B. Styrol + Butadienkautschuk (<5%) Pfropfcopolymer \Rightarrow schlagzähes PS
- Eigenschaften von Butadienkautschuk (BR)
 - hohe Elastizität bei geringer Festigkeit
 - gute Kälteflexibilität
 - gute Abriebfestigkeit
 - undurchsichtig, matt
- Die Beimischung von BR
 - reduziert die Sprödigkeit des PS
 - verbessert die Dehnfähigkeit und Schlagzähigkeit

Die schlechtere Optik wird durch Einfärben überdeckt



Produktbeispiel ABS (AcrylnitrilButadienStyrol)

- 3-Komponenten Copolymer ABS:
- AcrylnitrilButadienStyrol
- Eigenschaften von Acrylnitril
 - kratzfest und polierfähig
 - große Härte, Festigkeit, Steifigkeit
 - gute Alterungs-, Witterungs- und sehr gute Lichtbeständigkeit
 - gute Temperaturwechselbeständigkeit
 - gute optische Eigenschaften
 - gute elektrische und dielektrische Eigenschaften



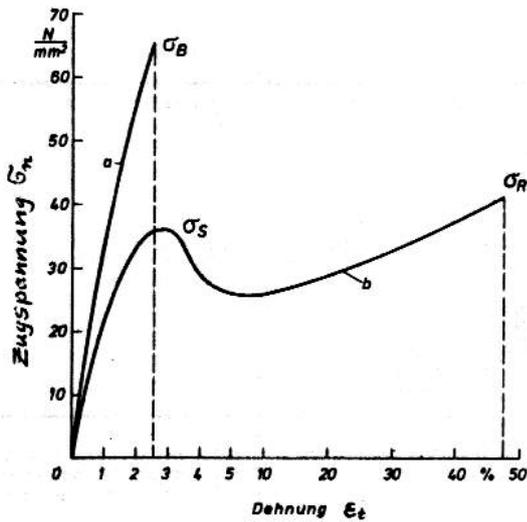


Abb. 41:
Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch Copolymerisation

- a) Normales PS
- b) Schlagzähes PS

Arbeitsaufnahmevermögen: $W = \int \sigma d\epsilon$

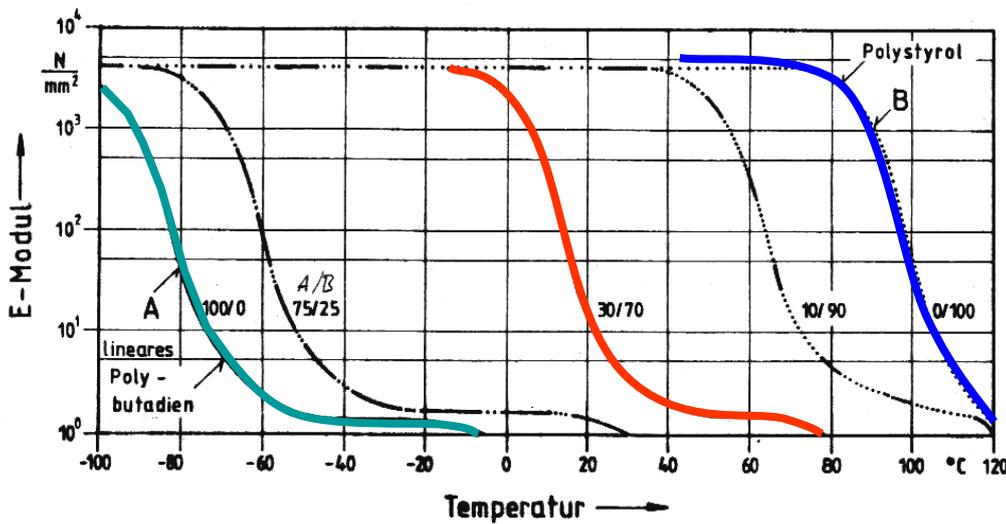
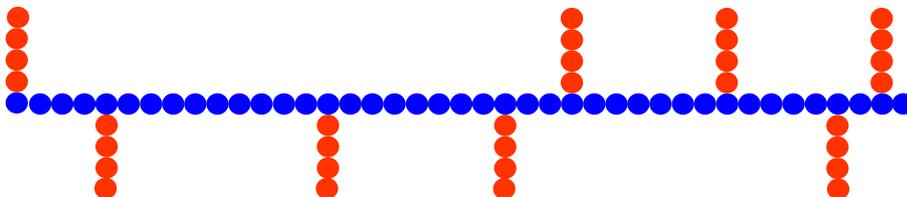


Abb. 42: Einfluss der Copolymerisation auf den Verlauf des E-Moduls über der Temperatur

Pfropfcopolymer

homogene Kette mit gepfropften Seitenketten



6.2.3 Thermoplastische Elastomere (TE)

- Als Ersatz für vernetzte Elastomere
- Unvernetzte Elastomere mit gummielastischen Eigenschaften
 - Einfacher zu verarbeiten
- Kürze Gewichtsersparnis, ½ Fertigungszeit)
 - Unmittelbares Anspritzen von Schuhsohlen an den Schuh
 - re Herstellungszeiten (etwa ½)
 - Geringeres Gewicht (etwa ½)
 - Bessere Maßhaltigkeit
- Bsp.: - Achslenkermanschetten (60%)

6.3 Polymerblends

- Physikalische Mischung verschiedener Polymersorten (im geschmolzenen Zustand)
- Polymerblends bieten die Möglichkeit die Eigenschaften der einzelnen Polymersorten zu kombinieren
- Polymermischung:
- Verarbeiter/Anwender beziehen die reinen Granulate und mischen während des Produktionsprozesses.

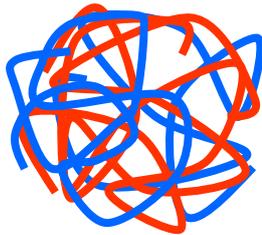


Abb. 43: Schematische Darstellung eines Polymerblends

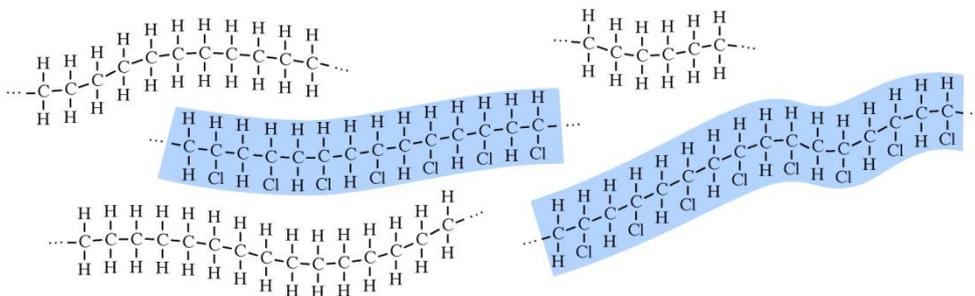


Abb. 44: Eine Mischung (Blend) aus Polyethylen und Polyvinylchlorid (blau) entspricht einer Metalllegierung mit begrenzter Löslichkeit im festen Zustand.

(s. Kristallgemisch, Mischungslücke bei Metalllegierungen, s. Metallkunde)

- **6.4 Flüssigkristalline Kunststoffe - Liquid Crystalline Polymers (LCP)**

- Thermoplastische Kunststoffe, die in der Schmelze stark geordnete Strukturen aufweisen (aufgrund starker Nebervalenzbindungen).
- Diese geordneten Strukturen führen zu anisotropen Eigenschaften.
 - z.B. sehr gute Festigkeitswerte in Orientierungsrichtung

→ Die Verarbeitung verschiedener Monomere in Copolymeren ...

- **6.5 Elastomere - Kautschuke**

- Schwach vernetzte Mischungen aus verschiedenen Monomeren
- Es werden eingesetzt:
 - Copolymere
 - Polyblends
 - Polymermischungen
- z.B. Kautschuk für PKW Reifen

6.6 Beispiele für verschiedene Kunststoffe und deren Anwendung (aus J.F Shackleford, s. Literaturangaben)

Tabelle 13.1

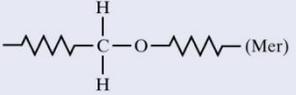
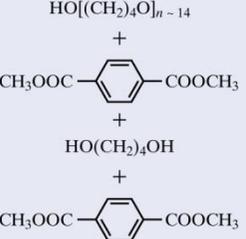
Ausgewählte thermoplastische Polymere				
Name	Monomer	typische Anwendung	Marktanteil (auf Gewichts-basis) ^a	
Standardpolymere				
Polyethylen	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} = \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$	Klarsichtfolien, Flaschen	29	
Polyvinylchlorid	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} = \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array}$	Fußbodenbelag, Gewebe, Filme	14	
Polypropylen	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} = \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array}$	Platten, Rohre, Abdeckungen	13	
Polystyrol ^b	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} = \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	Behälter, Schaumstoff	6	
Polyester, thermoplastischer Art [z.B. Polyethylen-Terephthalat (PET), Dacron ^c (Faser), Mylar ^d (Folie)]	$\text{HO}-\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} & - & \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array}-\text{O}-\text{H} \quad \text{HO}-\text{C}(=\text{O})-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(=\text{O})-\text{OH}$	Magnetbänder, Fasern, Filme	5	

Abb. 45: ausgewählte thermoplastische Polymere

Ausgewählte thermoplastische Polymere				
Name	Monomer	typische Anwendung	Marktanteil (auf Gewichts-basis) ^a	
Nylon	$\text{H}-\text{N}(\text{H})-(\text{CH}_2)_6-\text{N}(\text{H})-\text{H} \quad \text{HO}-\text{C}(=\text{O})-(\text{CH}_2)_4-\text{C}(=\text{O})-\text{OH}$	Gewebe, Seile, Getriebe, Maschinenteile	1	
Acryl (z.B. Polymethyl-Methacrylat, Lucite ^e)	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{CH}_3 \\ & \\ \text{C} = \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{C} = \text{O} \\ & \\ & \text{O} \\ & \\ & \text{CH}_3 \end{array}$	Fenster	1	
Cellulose	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{C} \\ / \quad \backslash \\ \text{H} \quad \text{O} \\ \quad \\ \text{C} - \text{C} - \text{C} - \text{C} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{OH} \quad \text{OH} \end{array}$ (Zellulose-Mer)	Fasern, Filme, Beschichtungen, Sprengstoffe	< 1	
Technische Polymere				
ABS	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} = \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{C} \equiv \text{N} \end{array}$ Acrylonitrile (graft) $\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \text{C} = \text{C} - \text{C} = \text{C} \\ & & \\ \text{H} & & \text{H} \end{array}$ Butadiene (chain) $\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} = \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$ Styrol (Pfcropf)	Koffer, Telefone	2	
Polykarbonat (z.B. Lexan ^f)	$\text{HO}-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{OH}$	Maschinenteile, Propeller	1	

Abb. 46: ausgewählte thermoplastische Polymere

Ausgewählte thermoplastische Polymere

Name	Monomer	typische Anwendung	Marktanteil (auf Gewichts-basis) ^a
Azetal		Haushalts- geräte, Getriebe	< 1
Fluoroplastik (z.B. Polytetrafluorethylen, Teflon ^g)		Labor- geräte, Dichtungen, Lager, Flansche	< 1
Thermo- plastische Elastomere (z.B. poly- esterartig)		Sport- schuhe, Kupplun- gen, Schläuche	1

^a Verkauf in USA und Kanada, aus Modern Plastics, Januar 1998
^b  ist Benzol C₆H₆.
^c Handelsname, Du Pont.
^d Handelsname, Du Pont.
^e Handelsname, Du Pont.
^f Handelsname, General Electric.
^g Handelsname, Du Pont.

Abb. 47: ausgewählte thermoplastische Polymere

Ausgewählte duroplastische Polymere

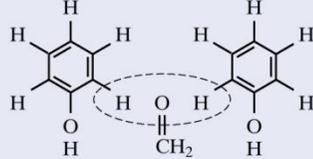
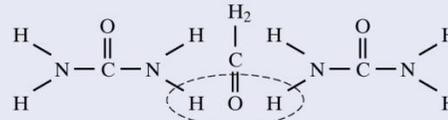
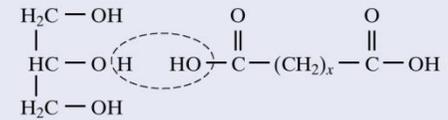
Name	Monomer	typische Anwendung	Marktanteil (auf Gewichts-basis) ^a
Duroplaste			
Polyurethan, auch thermo- plastisch	OCN—R—NCO + HO—R'—OH (Diisocyanat) <i>(R und R' sind komplexe polyfunktionale Moleküle)</i>	Folien, Rohre, Schaum- stoff, Elasto- mere, Fasern	5
Phenol (z.B. Phenol- Formaldehyd, Bakelit ^b)		elektrische Ausrüstung	4
Amino-Harze (z.B. Urea-Form- aldehyd)		Geschirr, Laminat	2
Polyester, Duroplast-Typ		Glasfaser- verbund- werkstoff, Beschich- tungen	2

Abb. 48: ausgewählte duroplastische Polymere

Ausgewählte duroplastische Polymere			
Name	Monomer	typische Anwendung	Marktanteil (auf Gewichts-basis) ^a
Epoxide	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{O} \quad \text{H} \\ \quad / \quad \\ \text{C} - \text{C} - \text{R} - \text{C} - \text{C} \\ \quad \backslash \quad \\ \text{H} \quad \text{O} \quad \text{H} \end{array}$ $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{N} - \text{R}' \\ \\ \text{H} \end{array}$ <p>(R und R' sind komplexe polyfunktionale Moleküle)</p>	Kleber, Glasfaser-verbundwerkstoffe, Beschichtungen	< 1
Elastomere			
Butadien / Styrol	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{C} = \text{C} - \text{C} = \text{C} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \quad \text{H} \end{array}$ <p>(Butadien; siehe Tabelle 13.1 für Styrol)</p>	Reifen, Formen	6
Isopren (Naturgummi)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{C} = \text{C} - \text{C} = \text{C} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \quad \text{H} \end{array}$	Reifen, Lager, Dichtungen	3
Chloropren (Neopren ^c)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{C} = \text{C} - \text{C} = \text{C} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \quad \text{H} \end{array}$	Lager, feuerfester Schaumstoff, Getriebeelemente	< 1
Isobuten / Isopren	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C} = \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$ <p>(Isobuten; siehe oben für Isopren)</p>	Reifen	< 1
Silikone	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{Cl} - \text{Si} - \text{Cl} \\ \\ \text{Cl} \end{array}$ <p>(Trichlorsilan)</p> $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H} - \text{O} - \text{Si} - \text{OH} \\ \\ \text{OH} \end{array}$ <p>(Trihydroxysilan)</p>	Dichtungen, Klebstoffe	< 1

Abb. 49: ausgewählte duroplastische Polymere

Ausgewählte duroplastische Polymere			
Name	Monomer	typische Anwendung	Marktanteil (auf Gewichts-basis) ^a
Vinylidenfluorid / Hexafluorpropylen (Viton ^d)	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{C} = \text{C} \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{H} \end{array}$ $\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \quad \\ \text{F} - \text{C} - \text{C} = \text{C} \\ \quad \quad \quad \\ \text{F} \quad \quad \quad \text{F} \end{array}$	Dichtungen, O-Ringe, Handschuhe	< 1
<p>^a Verkauf in USA, aus Modern Plastics und Rubber Statistical Bulletin. ^b Handelsname, Union Carbide. («Bakelit» wird auch für andere Verbundwerkstoffe wie z.B. Polyethylen verwendet.) ^c Handelsname, Du Pont. ^d Handelsname, Du Pont.</p>			

Abb. 50: ausgewählte duroplastische Polymere

Eine Liste häufiger Kurzzeichen von Kunststoffen mit Markennamen sowie eine Verlinkung für Detail-Informationen finden Sie unter http://de.wikipedia.org/wiki/Kurzzeichen_%28Kunststoff%29

7. Herstellung der Kunststoffe

- **Herstellung von Kettenmolekülen (Polymeren):**

Nach der Art der chemischen Reaktion unterscheidet man 3 Arten der Herstellung der Kunststoffe:

- Poly
- Poly
- Poly

Allen 3 Arten liegen die gleichen Herstellungsprinzipien zu Grunde.

Polymerherstellung – Prinzip

- **Mischen der Ausgangskomponenten**
 - Monomere, Lösungsmittel, Verdüner, Verdicker, Prozesshilfsstoffe
- **Aktivierung** (s. auch → Stoffumsatz-Diagramm, Abb. 64)
 - Einmischen von Reaktionssubstanzen (Initiatoren = Radikale),
 - Zufuhr von Aktivierungsenergie
- **Polymerbildung - Monomere lagern sich zu Ketten zusammen**
 - Exothermer Prozess (Wärme wird frei).
 - Reaktionssubstanz wird dickflüssiger und zäher.
 - Intensives, energieaufwendiges Mischen und Kneten.
 - Reaktionsgeschwindigkeit wird langsamer.
- **Abbruch der Reaktion**
 - Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen bei ca. 80-90% Polymeranteil.
 - Absaugen der Monomere und der dickflüssigen Lösungsmittel, damit gezielter Druckabbau.
 - Einarbeiten von Stoppersubstanzen.
 - Homogenisieren des Polymerisates
 - Entfernen der Restmonomere und sonstiger flüchtiger Bestandteile
 - Einarbeiten von Additiven (Füll, Verstärkungs- und Zusatzstoffen)
 - Granulieren
 - Herstellen von verkaufsfähigen Kunststoffgranulaten → Kap. 7.4
 - Versandfertig verpacken

7.1. Polymerisation

Beispiele: PVC, PE

- Ausgangsprodukt
 - Gleichartige niedermolekulare Reaktionspartner mit reaktionsfähiger Doppelbindung (z.B. Ethen (Ethylen) oder Vinylchlorid, s.u.).
- Aktivierung durch Aufbrechen der Doppelbindungen bei den meisten Monomeren durch Initiatoren (INI).
- Kettenreaktion ist gestartet
- Addition der Reaktionspartner ohne Abspaltung von Nebenprodukten
- Verknüpfung vorwiegend über C-C Bindungen.
- Abbruch der Reaktion (i.A. durch Zugabe eines Stoppers).

Anwendung 1: PVC

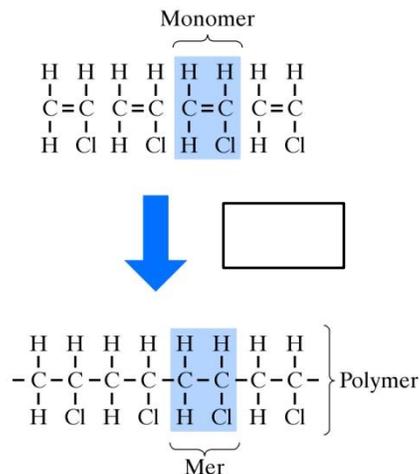
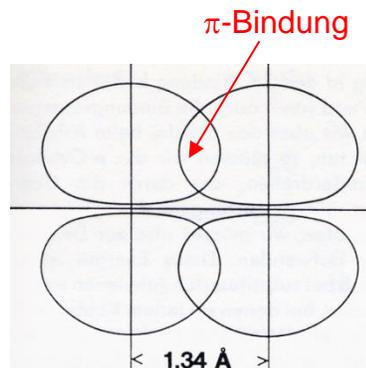
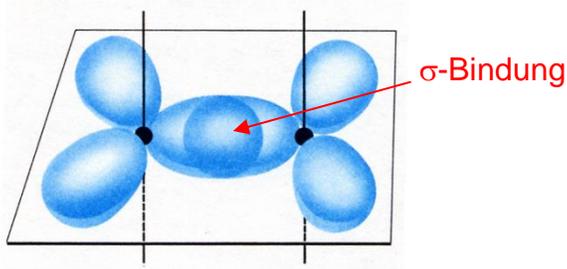


Abb. 51: Polymerisation ist die Verbindung von einzelnen Monomeren (z.B. Vinylchlorid, $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$), um ein Polymer zu bilden $[(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_n]$, das aus vielen Meren besteht (auch hier wieder $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$).

Zur Erinnerung: noch mal Abb. 20 + 21



Anwendung 2: PE

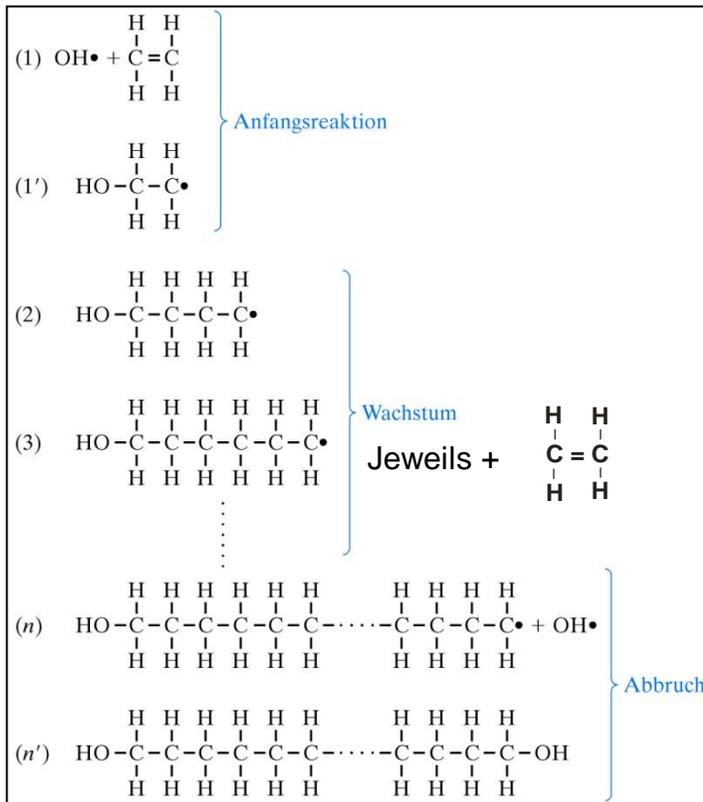


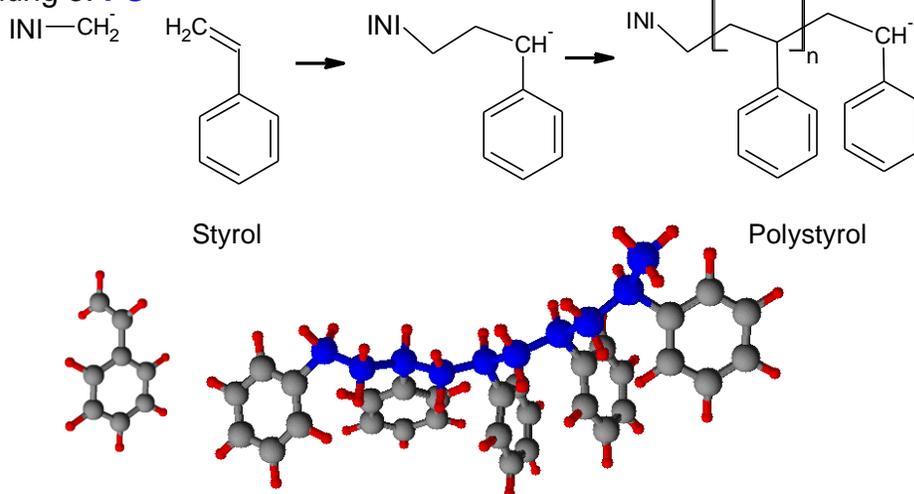
Abb. 52: Detaillierte Darstellung der Polymerisation durch Kettenwachstum. In diesem Fall liefert ein Wasserstoffperoxidmolekül zwei Hydroxyl-Radikale

($\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2 \text{OH}\cdot$), die die Polymerisation von Ethylen C_2H_4 zu Polyethylen $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$ einleiten (initiiieren) und abbrechen. (Die Schreibweise mit \cdot stellt ein ungepaartes Elektron dar. Die Verbindung oder Paarung von zwei derartigen Elektronen erzeugt eine kovalente Bindung, die als durchgezogene Linie — symbolisiert wird.

Je nach chemischer Natur des Initiators unterscheidet man zwischen radikalischer (s.o), anionischer und kathodischer Initialisierung.

Spezielle Initiatoren (Katalysatoren) können aufgrund chemischer Wechselwirkung besonders regelmäßige Strukturen erzeugen (bei Interesse \rightarrow Stichwort „Ziegler-Natta-Katalysatoren“)

Anwendung 3: PS



→ bei einer Polymerisation

Reaktionsverlauf bei einer Polymerisation

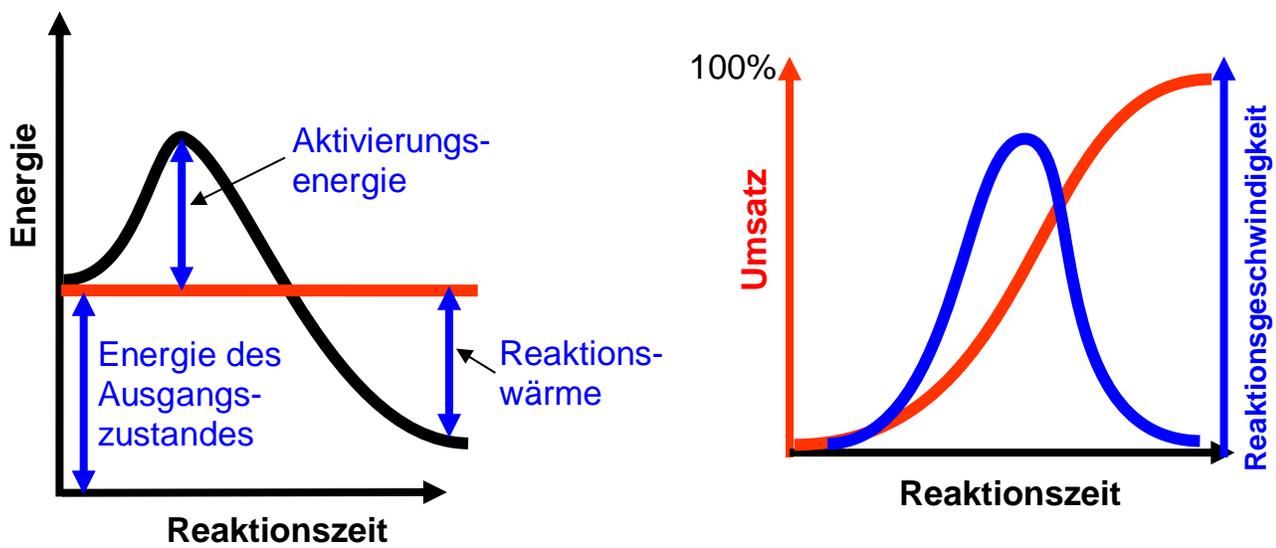
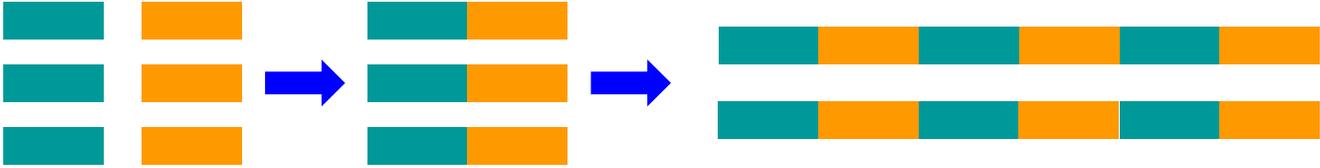


Abb. 53: Reaktionsverlauf bei einer Polymerisation

7.2 Polyaddition + Polykondensation → Stufenwachstumsreaktionen

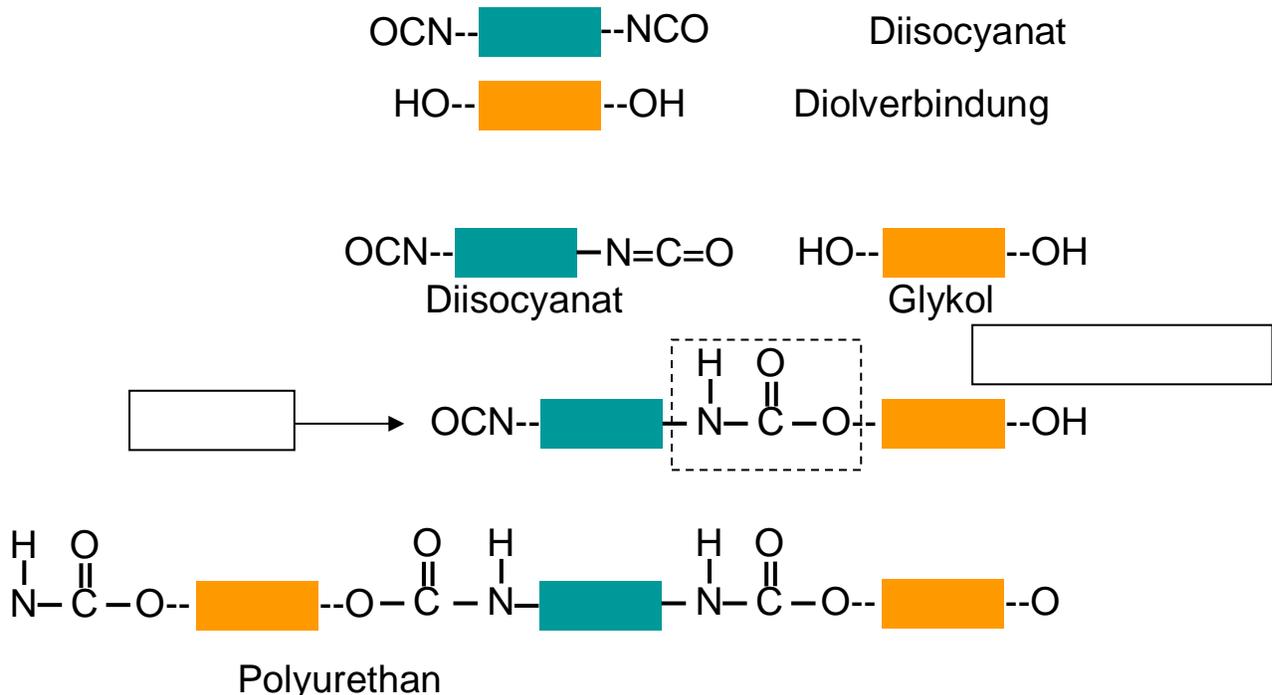
- Die Monomere lagern sich zuerst paarweise zusammen und reagieren dann weiter ⇒ Oligomere ⇒ Polymere.
- Um große Molmassen zu erhalten, müssen die Monomere im stöchiometrischen Verhältnis vorliegen.



A) Polyaddition:

- Ausgangsprodukt
Moleküle mit reaktionsfähigen Endgruppen (Di- oder Poly-Ole + Di- oder Poly-Isocyanat)
- Aktivierung
Evtl. Katalysator zugeben
- Addition der Reaktionspartner
- Verknüpfung über C-C Bindungen aber auch O, S oder N- Atome in der Hauptkette

Anwendung: PU:



In einer Nebenreaktion reagiert Wasser mit einigen Isocyanatgruppen, dabei wird Kohlendioxid frei, das den noch weichen Kunststoff aufquellen lässt → aufschäumen



B) Polykondensation:

- Ausgangsprodukt
 - Polyfunktionale niedermolekulare Verbindung
- Aktivierung
 - Evtl. Katalysator zugeben
- Addition der Reaktionspartner unter Abspaltung von niedermolekularen Verbindungen, i.A. H_2O
- Die Reaktionsprodukte müssen abgeführt werden, um die Reaktion vollständig ablaufen zu lassen
- Verknüpfung über C-C Bindungen aber auch O, S oder N- Atome in der Hauptkette

Anwendung: Poly-Phenolformaldehyd

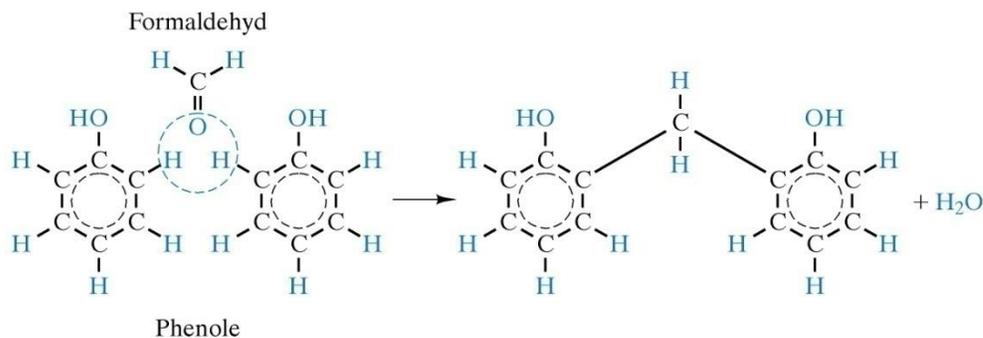


Abb. 54: Einzelner erster Schritt bei der Bildung von Poly-Phenol-Formaldehyd (= Phenolharz = PF) durch Stufenwachstum (Polykondensation). Das Kondensationsprodukt ist Wasser.

→ bei der Polyaddition und der Polykondensation werden Makromoleküle in einer Stufenwachstumsreaktion aus Monomeren mit reaktiven Endgruppen gebildet. Bei der Polykondensation entstehen niedermolekulare Nebenprodukte (meist H_2O), bei der Polyaddition nicht immer.

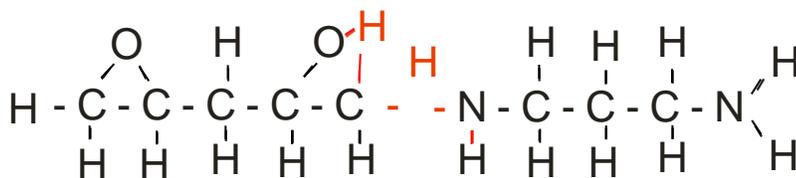
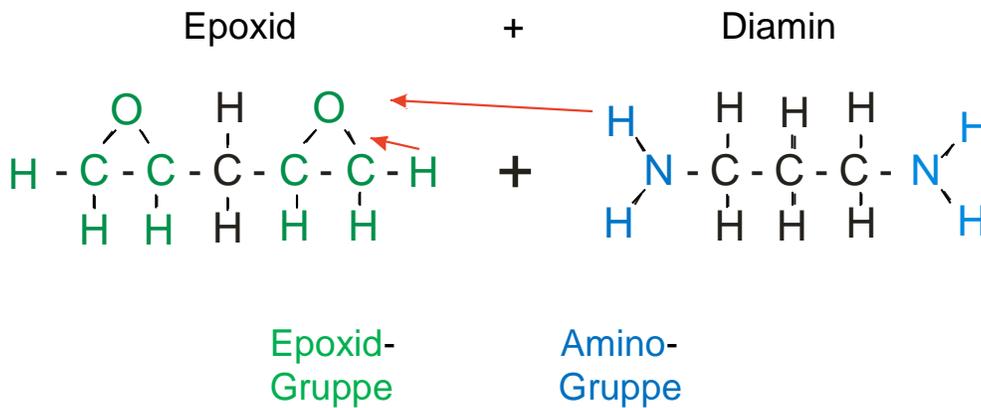
Unterschied zwischen Stufenwachstum und Kettenwachstum:

Polyaddition – Polykondensation:

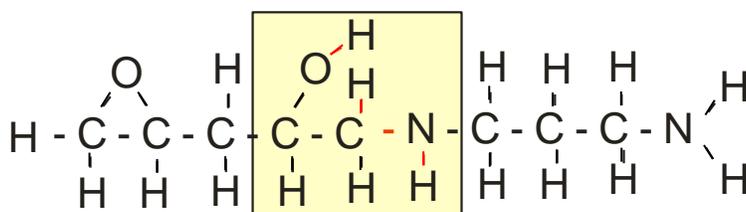
Weitere Beispiele für chemische Reaktionen:

Voraussetzung bei beiden Reaktionen: Monomere mit 2 reaktiven Gruppen

A) Polyaddition



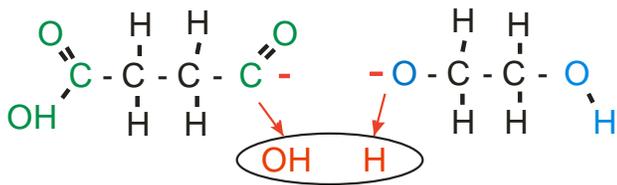
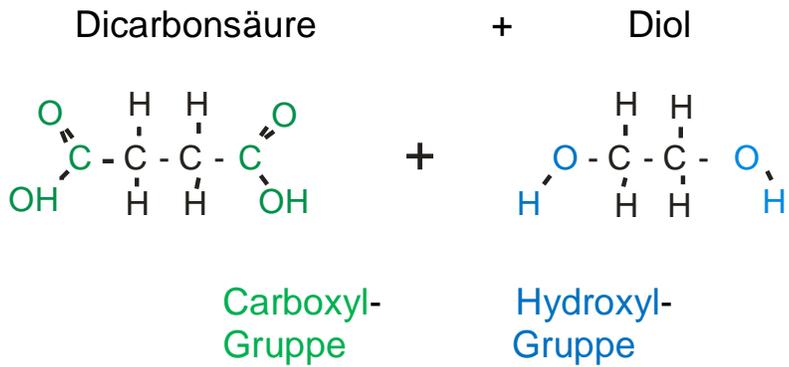
Zwischenschritt



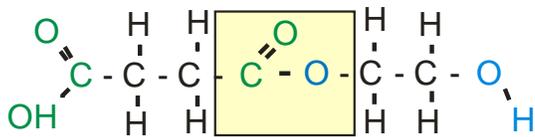
Endprodukt = Epoxidharz

Anwendung: Komponentenkleber, Lacke

B) Polykondensation



Zwischenschritt → H₂O-Bildung



Endprodukt = Polyester

Anwendung: GfK verstärkte Bauteile

7.3 Das Stoffumsatzdiagramm

Der Reaktionsverlauf der 3 Herstellungsarten der Kunststoffe ist prinzipiell ähnlich und kann mit Hilfe des Stoffumsatzdiagramms verdeutlicht werden:

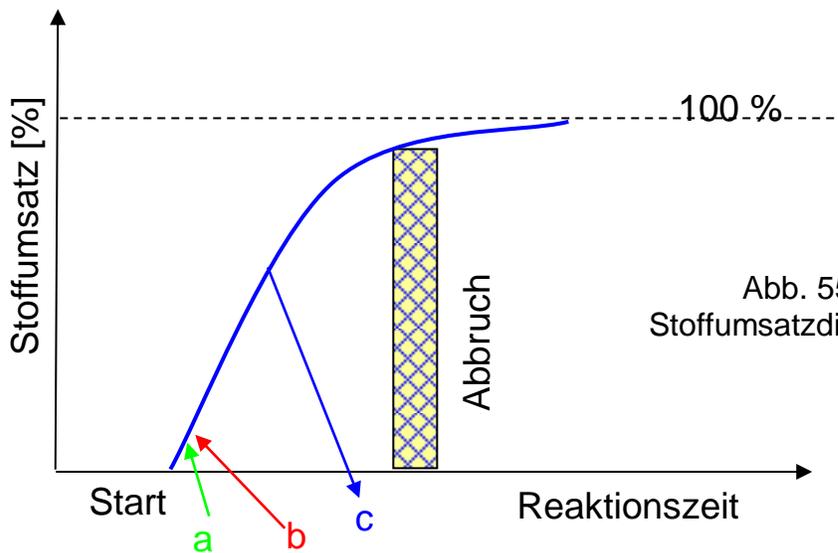


Abb. 55:
Stoffumsatzdiagramm

- Vor dem Start: Mischen der Ausgangskomponenten: Monomere, Verdüner, Verdicker, Lösungsmittel, zurückgeführte Komponenten (gasförmig + flüssig)
- Beim Start: $t = 0$, 100 % Monomer; 0 % Polymer
- Dann: Einmischen chemischer Substanzen wie Beschleuniger (Initiatoren, evtl. Katalysatoren), Härter () und Aufheizen (auf $T > 100\text{ °C}$) ()
- Problem: gleichmäßiges Einbringen der Substanzen in ein großes Volumen, z.B. VL-Saal. Lösung: km-lange Rohrbündel (d ca. 50 mm), die als Wärmetauscher dienen. In die Rohre werden mit Hilfe von Rohrstutzen die Stoffe eingebracht. Innerhalb der Rohre wird eine intensive Vermischung durch Anbringen von „Schmetterlingsflügeln“ erreicht. Pumpendruck bis 3000 bar.
- Danach: Die Reaktion geht los (ob man will oder nicht). Da die Bindungsenergie frei wird, schlägt die endotherme Reaktion jetzt in eine exotherme um. Energie wird frei, da eine Doppelbindung zu einer Einfachbindung wird.
- Aus Kap. 3: σ - π -Doppelbindung $C=C \approx 610\text{ kJ/mol}$ Bindungsenergie
 σ -Bindung (aus 2 π -Bindungen) $C-C \approx 350\text{ kJ/mol}$ Bindungs-E.
- d.h. beim Übergang von 2 π -Bindungen in eine σ -Bindung wird eine Energie von 260 kJ/Mol frei $1\text{ kcal} = 4,168\text{ kJ}$ (erwärmt 1 lit. Wasser um 1 °C)
 $260\text{ kJ/Mol} = 62,38\text{ kcal/Mol}$ Aus diesem Grund muss jetzt intensiv gekühlt werden ! ()
- Bei der Polykondensation ist dieser Prozess leichter zu beherrschen, da durch den gebildeten Wasserdampf viel Energie abgeführt wird.
- Kurvenverlauf: Am Anfang steil, d.h. die Reaktionsgeschwindigkeit (= Steigung der Kurve) ist hoch, da viele reaktionsfähige Monomere vorhanden sind und die Viskosität gering ist, dann entsprechend analog.
- Der Abbruch: Durch Einbringen von Stoppersubstanzen wird die Reaktion nach ca. 80 % Stoffumsatz abgebrochen. Der Abbruch erfolgt aus wirtschaftlichen Gründen: Reaktions-v gering (Produktausbeute↓) und Viskosität hoch (Kettenlänge..), d.h. Pumpenaufwand↑.

Der gesamte Prozess dauert ca. 2 – 8 h/Charge.

7.4 Die Herstellung verkaufsfähiger Granulate

Die Herstellung verkaufsfähiger Granulate ist ein 2-Stufenprozeß:

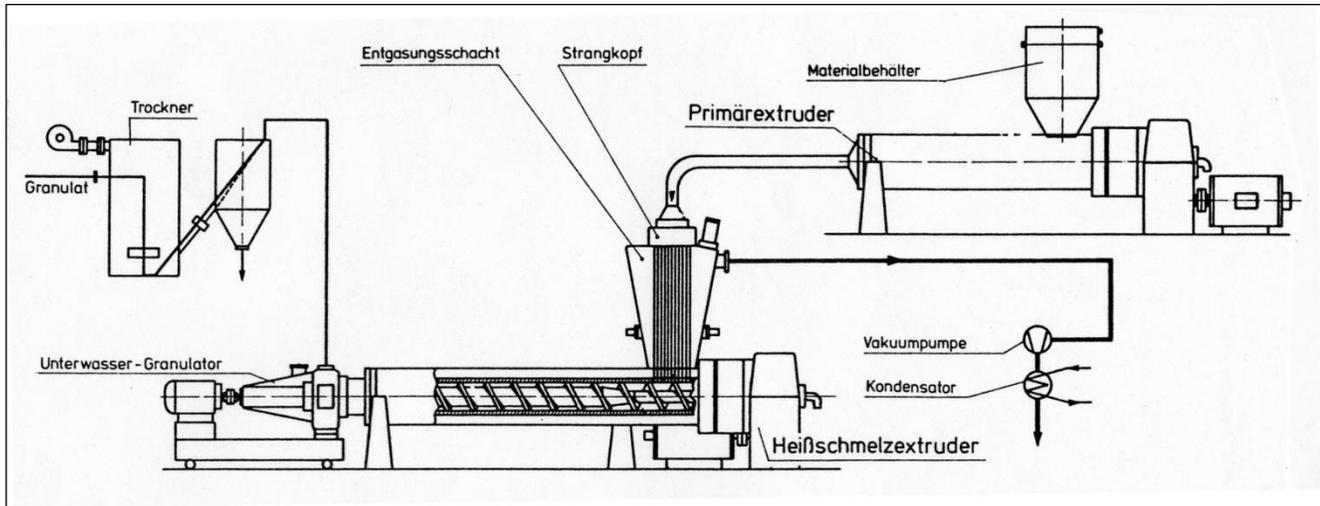


Abb. 56: Tandem-Entgasungs-Extruder für PE-Schmelze, Lösungsmittelentzug von 25% auf 0,5%

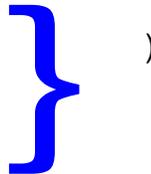
In den Materialbehälter (Trichter) kommt der vor Abbruch der Reaktion vorhandene Stoff, ein ca. 200°C heißer feuchter, stinkender Teig.

Stufe 1: homogenisieren der Masse

a) thermisch

b) stofflich

sowie Einarbeiten des Stoppers



Details: Masse wird durch Strangkopf (Fleischwolf) gedrückt. Durch ca. 250 Bohrungen entstehen Stränge von d ca. 3 mm. Diese fallen in einem Entgasungsschacht ca. 3 - 5 m nach unten. Aufgrund der großen Oberfläche treten die flüchtigen Stoffe weitgehend aus der Masse aus. Sie werden abgesaugt und in den Prozess zurückgeführt.

Stufe 2: Zusatzstoffe (Additive):

Flammhemmer, Antistatika,

Farbstoffe, Kreide etc.

werden zugeben



Details: Additive werden zugegeben und durch Kneten vermischt. Dann wird die Masse wieder durch einen „Fleischwolf“ gedrückt. Die herauskommenden Stränge von d = 2 - 3mm werden

a) durch fliegende Messer unter Wasser abgeschnitten (klebt nicht) → Heißgranulierung → Lin-sengranulat (noch trocknen! → s. Proben PP oder

b) zu langen Strängen (z.B. 20 m) verarbeitet, die an Luft abkühlen und dann in ca. 3,5 mm große Zylindergranulate zerteilt werden oder

c) zu dünnen Tafeln verarbeitet, die in Streifen zerschnitten werden, aus denen dann Würfelgranulat → s. Proben PS, entsteht.

Die Granulate unterscheiden sich durch ihr Schüttgewicht und durch die innere Reibung (Fließverhalten) wenn beim Weiterverarbeiten die Endprodukte entstehen.

Kunststoffproben als Beispiele:

PP:

**Granulat. Werkstoff ist teilkristallin (max. 70 %) → getrübt (Brieföffner) → zäh
KT ca. 165 °C (kristalline Bereiche werden amorph) → zerrissener Zugstab: wird milchiger wegen steigender Kristallisierung (Parallele Ketten)**

PS:

**(grünlicher Strang) zu wenig Farbstoff (s. Beispiel blau, 3% Zugabe → satte Färbung , mehr bringt nichts). Farbstoff ist in ein Granulat aus PS oder PE eingeschlossen.
Mehrere Zugstäbe, Normalspannungsbruch da amorph → spröde**

TPE:

weißes Knäuel: elastischer Thermoplast durch starke Nebervalenzen zwischen den Ketten, FT ca. 135 °C (oberhalb FT ist der Kunststoff flüssig → Schmelze → Thermoplaste)

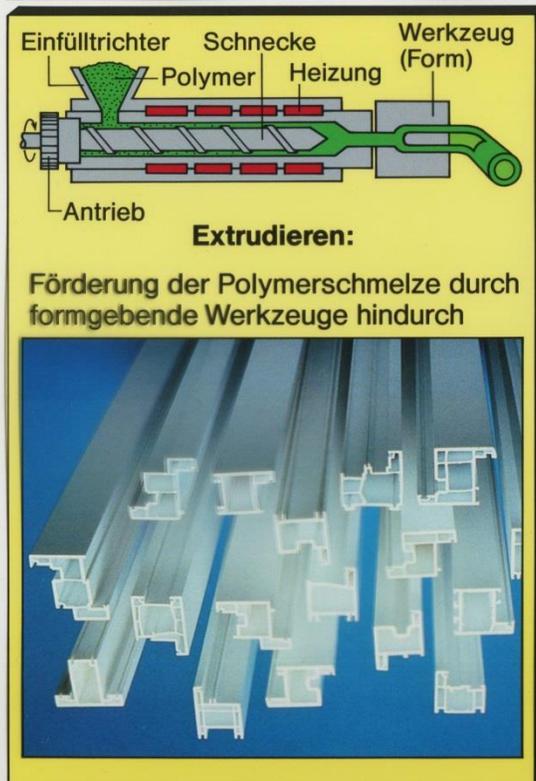
Hüpfgummi = Silikon..... → Modell später

Verarbeitung von Polymeren



25 Neue Werkstoffe

Verarbeitung von Polymeren

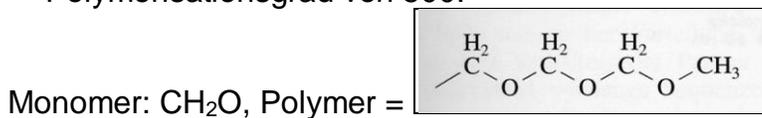


25 Neue Werkstoffe

Abb. 57 a, b:
Verarbeitung
von Polymeren
(Beispiele)

- 4) Ein regelmäßiges Copolymer aus Ethylen und Vinylchlorid enthält abwechselnd Meren jedes Typs. Wie hoch ist der Anteil von Ethylen (in Gewichts-%) in diesem Copolymer?
 Beachte: Es gibt für jedes Vinylchloridmolekül ein Ethylen-Mer. Deshalb lässt sich schreiben:
 Gew.-% Ethylen = (Mol-Gew. Ethylen / Mol-Gew. Gesamt) * 100 %
 →

- 5) Berechnen Sie das Molekulargewicht eines Polyazetal-Moleküls (Polyformaldehyd) mit einem Polymerisationsgrad von 500.



$$M_{\text{Polyazetal}} = M_{\text{C}} + 2 \cdot M_{\text{H}} + M_{\text{O}} = (12 + 2 + 16) \text{ g/Mol} = 30 \text{ g/Mol}$$

$$n = M_{\text{Poly}} / M_{\text{Mono}} \rightarrow M_{\text{Poly}} = n \cdot M_{\text{Mono}} = 500 \cdot 30 \text{ g/Mol} = 15000 \text{ g/mol}$$

- 6) Ein Blend aus PE und PVC enthält 10 Gew.-% PVC. Wie viel Mol-% PVC enthält der Kunststoff?

Stoff bis hierher:

- ❑ Grundlagen der Chemie → Aufbau der Atome, PSE, Bindungen, MO-Theorie zur Beschreibung von C-C-Doppelbindungen (wichtig für die Ausgangsprodukte bei der Herstellung der thermoplastischen Kunststoffe)
- ❑ alle Kunststoffe sind Kettenmoleküle (Makromoleküle, Polymere), die sich aus einzelnen Monomeren zusammensetzen
- ❑ es gibt 3 Kunststoffklassen: Thermoplaste
Elastomere
Duroplaste,
die sich in ihrem strukturellen Aufbau (keine, wenige, viele chemische Verbindungen zwischen den Ketten) unterscheiden
- ❑ alle Kunststoffe werden mit Hilfe von 3 chemischen Verfahren hergestellt:
 - Polymerisation (ohne Nebenprodukte)
 - Polyaddition (ohne oder mit Nebenprodukte)
 - Polykondensation (mit Nebenprodukten)Mischungen von Kunststoffen sind möglich
 - Blends = verschiedene Polymere nebeneinander (Kristall Gemisch.)
 - Copolymere: verschiedene Monomere in 1 Polymerkette (Mkr)
- ❑ Herstellung der Kunststoffe: Prinzipbeschreibung anhand der Stoffumsatzkurve sowie der Herstellung von verkaufsfähigem Granula → Extruder



→ nächstes Kapitel

8. Additive

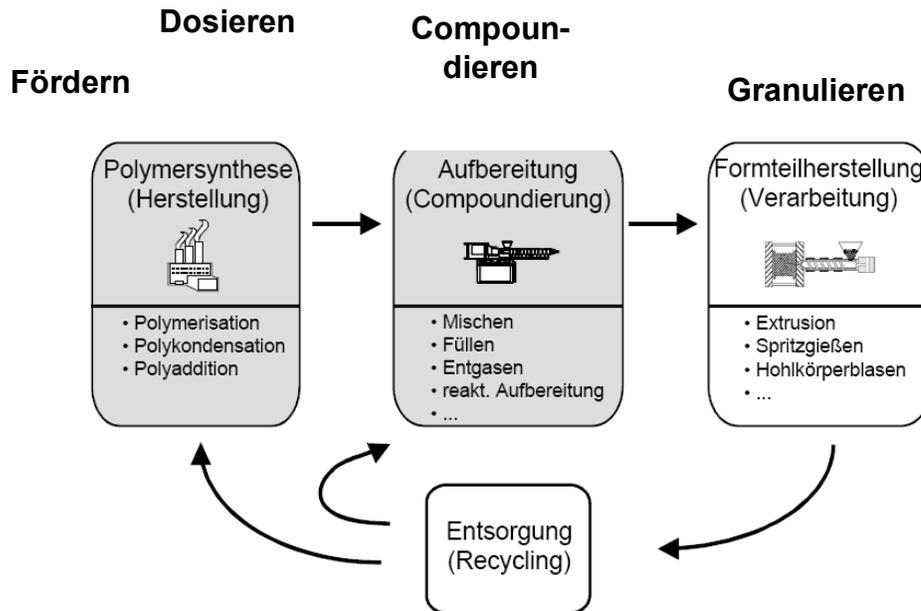


Abb. 58: Aufbereiten in der Kunststofftechnik

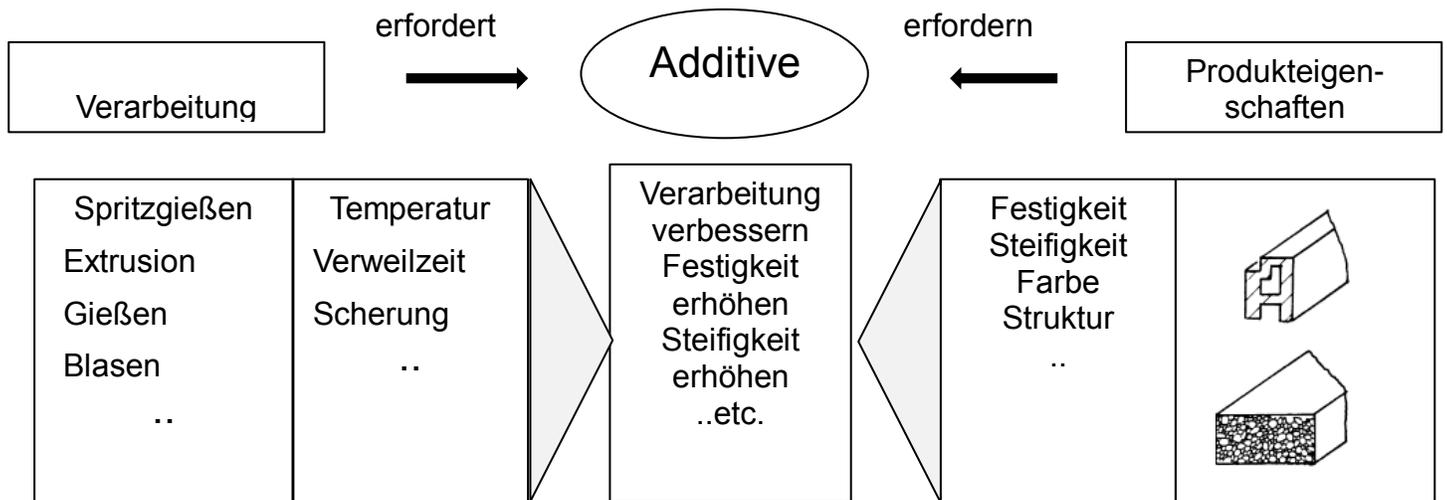
Aufbereiten von Kunststoffen

- Erst durch das Einarbeiten von Verarbeitungshilfsmitteln und Zuschlagstoffen erhält der Kunststoff die geforderten Eigenschaften. Diesen Prozessschritt bezeichnet man als Aufbereiten oder auch Compoundieren

Polymer + Additive = Kunststoff

- Zumeist erfolgt die Aufbereitung im schmelzeförmigen Zustand (Thermoplaste)

Additive: Zusatzstoffe und ihre Aufgaben



8.1 Zusatz und Füllstoffe - Einteilung

- Verbesserung der *mechanischen, optischen, chemischen* und *elektrischen* Gebrauchseigenschaften durch:
 - *Füllstoffe* (Holzmehl, Steinmehl, Ruß...)
 - *Zusatzstoffe* (Farben, UV-Stabilisatoren, Antistatika, Flammschutzmittel,...)
 - *Verstärkungsmittel*
 - Mineralisch (Kalk, Kreide, Gips,...)
 - Verstärkungsfasern, (Glas, Kohlenstoff, Kunststoff,...)

Zusatzstoff: (einige ppm bis 5 vol %)	Füllstoff: (10-65 vol %)
➔ Gleitmittel, Trennmittel	➔ Mineralische Füllstoffe (Calciumcarbonat, Aluminiumhydroxid)
➔ Stabilisatoren	➔ Glasfasern
➔ Antistatika	➔ Kohlenstofffasern
➔ Flammschutzmittel	➔ Polymerfasern
➔ Additive für die Laserbeschriftung	➔ Naturfasern
➔ Weichmacher	➔ Nanocomposites
➔ Haftvermittler	➔ magnetische Füllstoffe
➔ Treibmittel	➔ elektrisch leitende Füllstoffe
➔ Antibakterielle Mittel, Fungizide	➔ wärmeleitende Füllstoffe
➔ Farbstoffe	

Additive für Kunststoffe

Ziele	Additive
Reaktionsstoffe	Härter (Vernetzer), Katalysatoren, Treibmittel (für Schaumstoffe), Abbau bewirkende Zusatzstoffe
Verarbeitung fördernde Zusatzstoffe	Stabilisatoren (gegen Wärme), Antioxidantien, Gleitmittel, Trennmittel, Haftvermittler (bei Füllstoffen, Fasern usw.), Nukleierungsmittel, Antistatika
Festigkeit erhöhende Zusatzstoffe	Verstärkungen wie Fasern, Gewebe, Matten, Füllstoffe mit Verstärkerwirkung (z.B. Ruß, Kieselsäure bei Elastomeren), Harzträger bei Duroplasten (z. B. Holzmehl, Cellulose)
Steifigkeit erhöhende Zusatzstoffe	Verstärkungen wie Fasern, Gewebe, Matten, Füllstoffe ohne Verstärkerwirkung (z.B. Quarzmehl, Gesteinsmehl), Füllstoffe mit Verstärkerwirkung
Steifigkeit verringernde Zusatzstoffe	Weichmacher = kautschukartige Polymere, eingemischt in den weichzumachenden Kunststoff (sogen. Polyblends wie z.B. Nitrilkautschuk in PVC oder chloriertes PE in PVC)
Lebensdauer verlängernde Zusatzstoffe	Stabilisatoren (gegen Wärme, Licht, Oxidation) auch Alterungsschutzmittel genannt)
Färbende Zusatzstoffe	Pigmente, Farbstoffe, Aufhellungsmittel
Eigenschaften verändernde Zusatzstoffe	Flammhemmende Zusatzstoffe, wärmeleitungsverbessernde (z. B. Metallpulver), Antistatika, magnetische, stromleitende...
Verbilligende Zusatzstoffe	billige Füllstoffe (z.B. Schiefermehl, Kreide u. a. sogen. Streckmittel)

Aufbereiten - Zusatz-, Füll- und Verstärkungsstoffe

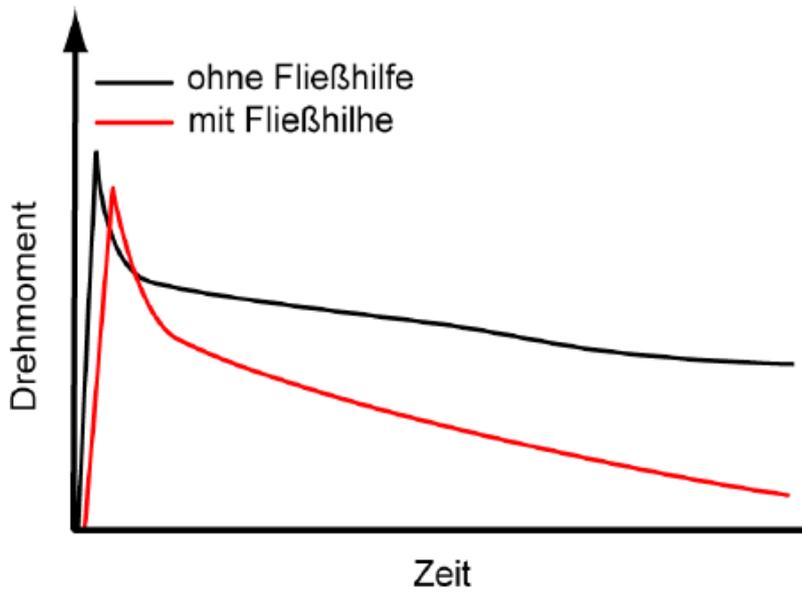
- **Zusatzstoffe**
 - Gleitmittel
 - Stabilisatoren
 - Weichmacher
 - (Flammschutzmittel)
 - Nukleierungsmittel
 - (Färbende Zusatzstoffe)
- **Füll-, und Verstärkungsstoffe**
 - Einfluss von Füll- und Verstärkungsstoffen auf das Eigenschaftsbild
 - Füllstoffdispersion
 - Füllstoffhaftung
 - Wärmeleitfähige Füllstoffe

Werden im Weiteren besprochen

8.1.1 Gleitmittel für Kunststoffschmelzen

Gleitmittel	Merkmale	Einsatzbeispiele
Niedermolekulare Fettsäureester	hohe Flüchtigkeit	PVC-U
Butylstearat	hohe Flüchtigkeit	
Glycerinmonooleat	hohe Flüchtigkeit	
Glycerindioleat	verringerte Flüchtigkeit	
Metallseifen, Calciumstearat		PO
Fettsäure Komplexester (oligomere Ester aus Fettsäuren, Dis-carbonsäuren und Polyolen)	relativ teuer	
Niedermolekulare Mischester	Neigung zu Düsen- u. Formbelag	PVC-Flaschen
Fettsäureester von Polyolen (Pentaerythrit-Tetrastearat, PETS)	keine Trübung	PC
Sorbitanester, Montansäure		PBT
Glycerinmonostearat		PO, techn. Thermoplaste
Fettsäureamide, Stearinsäure-Ethylendiamid	hochbrillante Folien	PVC-U, PP, PE
Ölsäureamid	Antiblockmittel	
Langkettiges Keton	Antiblockmittel (PP), hohe Temp.-Bes.	ABS, EVAC, PA, PP
Gemisch aliphatischer Nonocarbonsäuren (Montanwachse)	gute Wirkung, verträglich, hohe Temp.-Best.	viele Kunststoffe
Polypropylen-Wachs	Schmelzpunkt 160 °C	PVC-Profil
Hochmolekulares oxidiertes Polyethylen-Wachs	kurze Plastifizierzeiten	PVC-Profil
Fluorelastomere	Schmelzebruchverhinderung, Antiblock-/Haftmittel	PE-LLD-Folien PP-Kalenderfolie

Quelle: Saechtling Kunststoff Taschenbuch



Wirkung von Gleitmittel
Fließhilfe) während der Verar-
beitung

8.1.2 Stabilisatoren

- **Stabilisatoren - werden gegen den Abbau von Polymeren eingesetzt**
 - Abbau bei der Verarbeitung
 - Abbau im Einsatzbereich (Umgebungseinflüsse)

- **Stabilisatoren sind**
 - Antioxidantien
 - Wärmestabilisatoren
 - Lichtschutzmittel

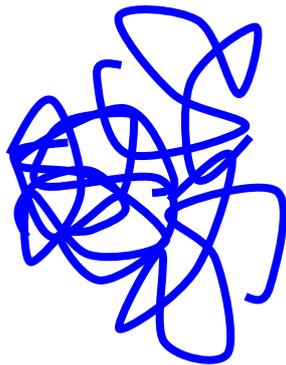
8.1.3 Weichmachung

- **Wirkung:**
 - *Erhöht:* Zähigkeit und Verformbarkeit
 - *Verringert:* Festigkeit, E-Modul, Schmelzviskosität
- **Innere Weichmachung**
 - Einpolymerisieren von weichmachenden Komponenten
z.B. Polymethylacrylat (PMA) $T_g = 5^\circ\text{C}$ wird in Polymethylmethacrylat (PMMA) $T_g = 105^\circ\text{C}$ einpolymerisiert \rightarrow Blend
- **Äußere Weichmachung**
 - Zumischung von niedermolekularen Substanzen, die den Zusammenhalt zwischen den Makromolekülen schwächen.
z.B.: niedermolekulare Stoffe, Oligomere \rightarrow Flüchtigkeit

Weichmachung von Thermoplasten – Beispiel

PVC – hart

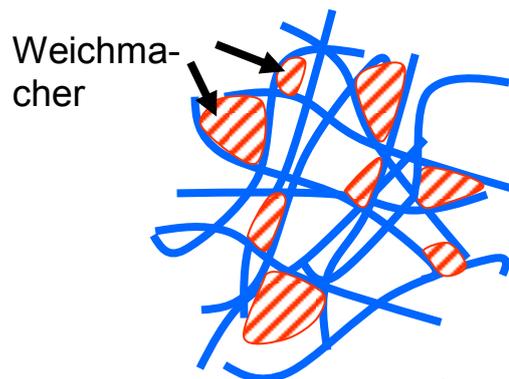
z.B.: Fensterprofil, Rolladenprofil



amorph
relativ gering
relativ groß
hoch
 \Rightarrow fest, hart

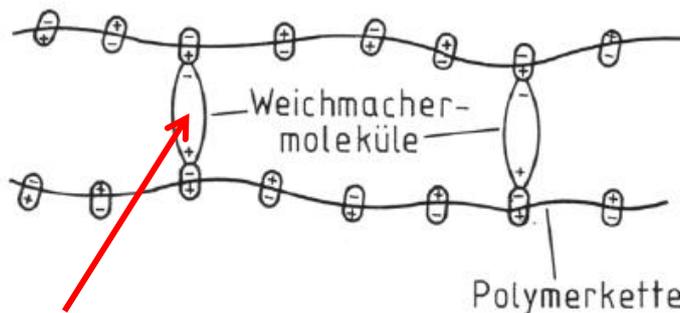
PVC – weich

z.B.: Fußbodenprofil, Dichtprofil



amorph
relativ groß
relativ gering
gering
 \Rightarrow flexibel, weich

Struktur
 Abstand der Moleküle
 Bindungskräfte zwischen den Molekülen
 Festigkeit



äußere Weichmachung:
physikalisch über Dipol

Abb. 59: Beispiel:

PVC ist bei RT ein harter Werkstoff

- Flexibilität tritt bei ca. 70°C auf
- Die Zugabe von Weichmachern verschiebt die Grenze zu tieferen Temperaturen, s. nächste Abb.

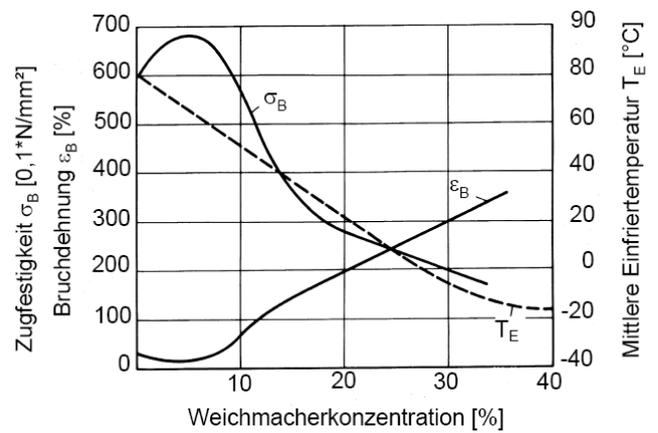
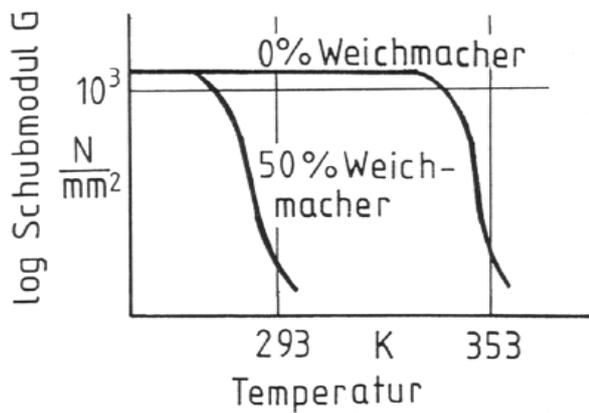
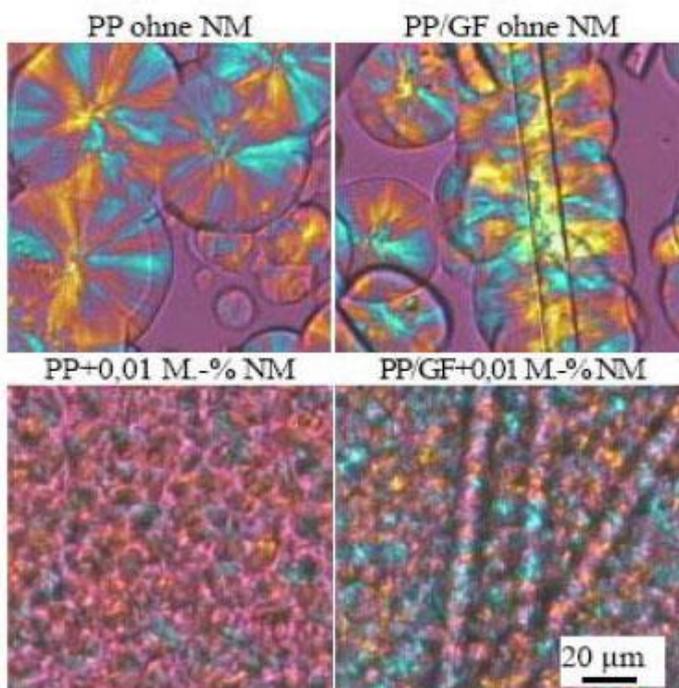


Abb. 60: Einfluss der Weichmachung bei PVC : Weichmacher Dioctylphthalat

8.1.4 Nukleierungsmittel

Tendenzielle Eigenschaftsänderungen durch Nukleierung

Kristallisationsgeschwindigkeit	+	Elastizitätsmodul	+
Kristallisationsgrad	+	Reißdehnung	-
Kristallisationstemperatur	+	Eigenspannung	-
Keimdichte	+	Schwindung	-
Nachkristallisation	-	Verzug	-
Sphärolithdurchmesser	-	Transparenz	-
Breite der Durchmesser- verteilung	-	Lichtabsorptionskoeffizient	+
Schlagzähigkeit	+	Wasserdampfdurchlässigkeit	-
Steifigkeit	+	Flüssigkeitsdiffusion	-
Streckspannung	+	Dichte	+
Vickershärte	+		



Veränderung des Kristallisations-
verhaltens durch Nukleierung: .

Polarisationsmikroskopische Aufnahme während der Kristallisation von nukleierten und nicht nukleierten PP-Werkstoffen

8.1.5 Laserbeschriftung

Der Laserstrahl beschriftet Kunststoffe rasch und flexibel durch:

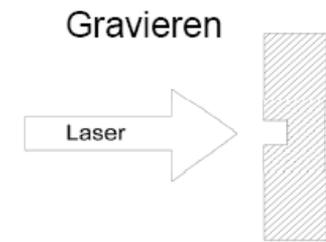
- Farbumschlag,
- definiertes Aufkohlen - Karbonisieren,
- Aufschäumen oder
- Schmelzen.

➤ Anwendungen:

- Labortechnik
- Medizintechnik
- Sanitärtechnik
- Elektronik-/Elektrotechnik

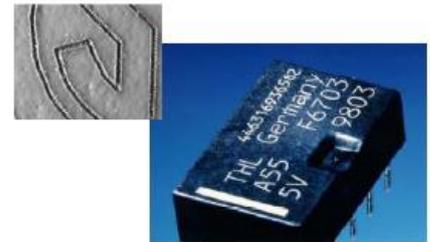


Quelle: TAMPOPRINT® AG

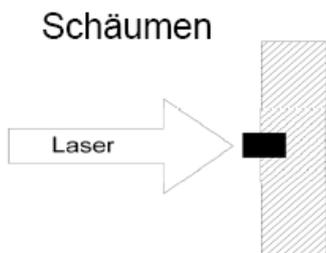


Gravieren

- Material verdampft teilweise
- Hohe Leistungsdichte
- Im Werkstoff entsteht eine Vertiefung



Relais

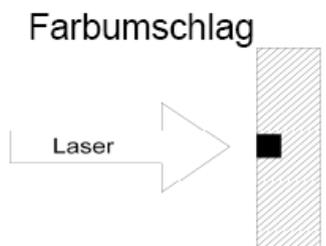


Schäumen

- Der Kunststoff schmilzt lokal
- Durch das Schmelzen entstehende Gasbläschen werden beim Abkühlen im Material eingeschlossen und reflektieren Licht diffus.
- Erhabene Markierung entsteht



Lichtmaschinenabdeckung



Farbumschlag

- Laser ermöglicht gezieltes Verändern von Moleküleigenschaften, und damit der optischen Eigenschaften
- Oberfläche bleibt annähernd unbeschädigt
- Material verdampft teilweise
- Hohe Leistungsdichte
- In Werkstoff entsteht eine Vertiefung



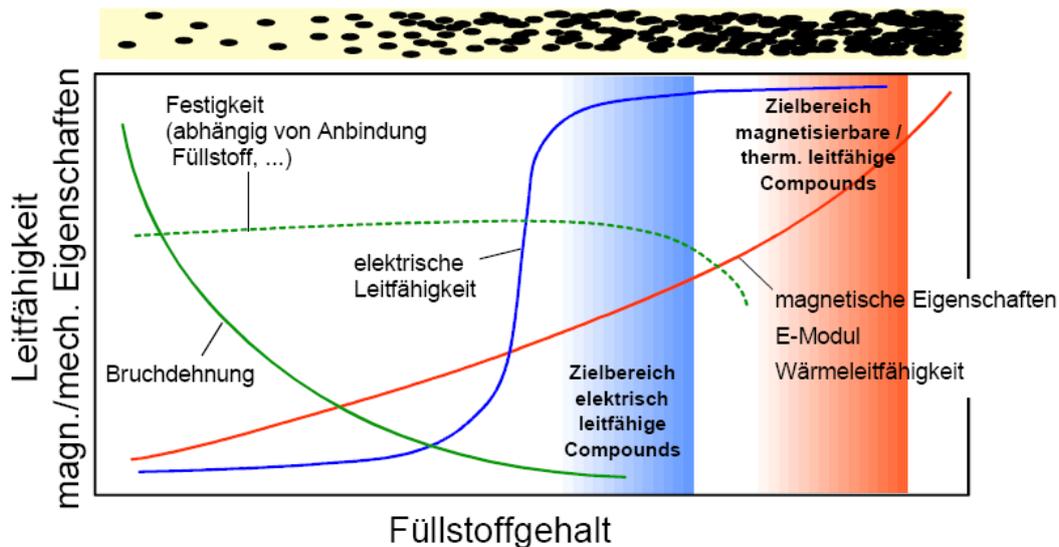
Abb. 61: Einsatz der Laserbeschriftung

8.1.6 Füll- und Verstärkungsstoffe

- Einfluss von Füll- und Verstärkungsstoffen auf das Eigenschaftsbild
- (Füllstoffdispergierung)
- Füllstoffhaftung
- Wärmeleitfähige Füllstoffe

Einfluss von Füll- und Verstärkungsstoffen auf das Eigenschaftsbild von Kunststoffen

Abb. 62: Kunststoffe + Füllstoffe → maßgeschneiderte Eigenschaften



Auszug an Füll- und Verstärkungsstoffen

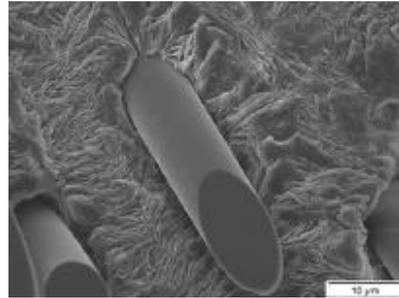
- faserförmige Füll- und Verstärkungsstoffe
 - Textilglas
 - C-Fasern
 - Whiskers
 - Synthesefasern
 - Cellulose
- plättchenförmige Füll- und Verstärkungsstoffe
 - Glimmer
 - Talkum
 - Graphit
- kugelförmige Füllstoffe
 - Sand/-Quarzpulver
 - Silica
 - Glaskugeln
 - Calciumcarbonat
 - Metalloxide
 - Ruß

8.1.6.1 Faserverstärkte Kunststoffe

• Verstärkungsfasern:

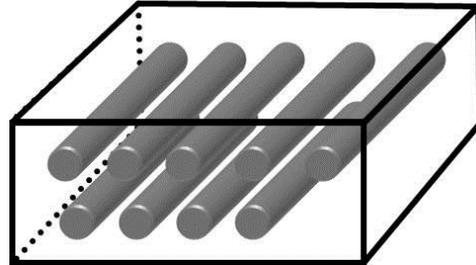
— Glasfasern

- relativ schwer
- preiswert
- E-Modul gering
- Zugfestigkeit gut - sehr gut



— Carbonfasern

- teuer
- E-Modul sehr gut
- Zugfestigkeit gut – sehr gut



— Synthetische Fasern

- Polyamidfasern, Polyaramidfasern (z.B. Kevlar)
- Leicht, relativ preiswert, E-Modul gut, Zugfestigkeit gut, Energieabsorptionsvermögen sehr gut

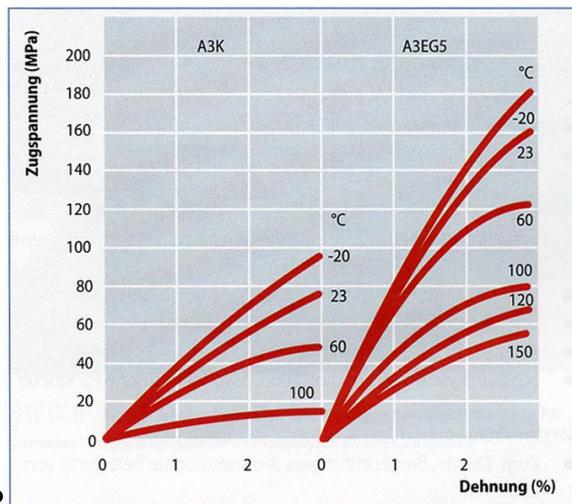


Abb. 63:

Wirkung einer Glasfaserverstärkung auf die Festigkeit von Polyamid (PA 66) als $f(T)$

A3K = PA 66, unverstärkt (Ultramid)

A3EG5 = PA 66, 25 % gasfaserverstärkt

TABELLE 1 Durch Substitution von Aluminium bzw. Stahl durch Polyamid können Gewichtsvorteile von mehr als 50 % bei Erfüllung aller Anforderungen aus den Lastenheften erreicht werden.

■ Sauganlage:	Aluminium 4314 g	→ Polyamid 2080 g
■ Getriebebrücke 1:	Aluminium 2010 g	→ Polyamid 980 g
■ Getriebebrücke 2:	Aluminium 3400 g	→ Polyamid 2400 g
■ Motorlager:	Aluminium 915 g	→ Polyamid 450 g
■ Ölwanne 1:	Aluminium 9030 g	→ Polyamid 8000 g
■ Ölwanne 2:	Stahlblech 2444 g	→ Polyamid 1236 g

Abb. 64:

Gewichtsvorteile bei PKW-Teilen durch Ersatz von Stahl bzw. Al-Werkstoffen durch PA 66

- **Matrix Kunststoffe:**
 - Duroplaste,
 - *UP-Harz: (Ungesättigte Polyester -)*
Spröde, ungünstig große Wärmedehnung, sehr große Schwindung, Quillt bei Wasseraufnahme
 - *EP Harz: (EPoxid -)*
Hohe Bruchdehnung, gute Wärmebeständigkeit (bis 350°C), Quillt bei Wasseraufnahme
 - Thermoplaste PP, PA,
 - Geringes Gewicht...
- Die Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen werden bestimmt:
 - von den Eigenschaften der Fasern
 - von den Eigenschaften der Matrix
 - vom Volumenanteil und der Orientierung der Fasern
 - von der Verbindung zwischen Faser und Matrix

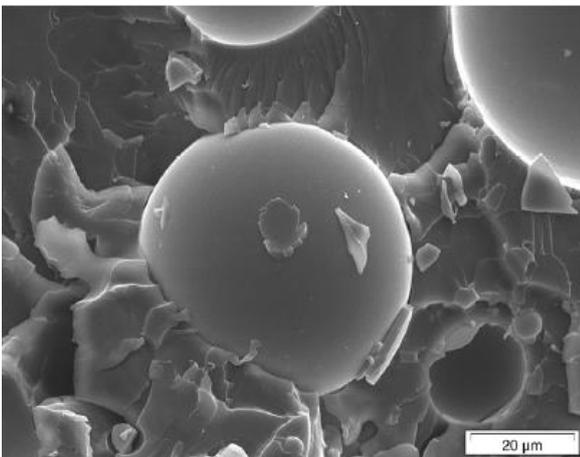
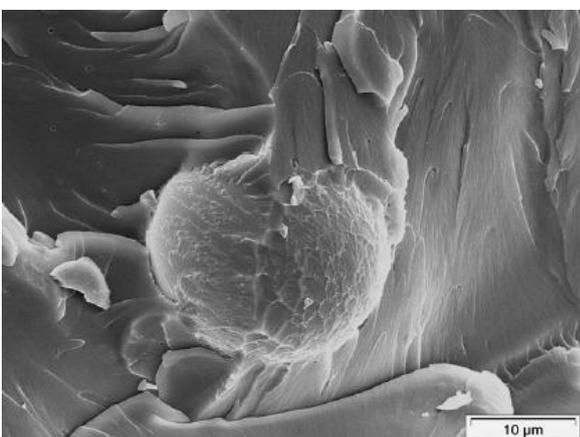


Abb. 65: Einfluss der Additive auf die Füllstoffhaftung
[EP-Harz + Glashohlkugeln (30 Vol.-%)]

REM Aufnahme nach Zugversuch:

ohne Haftvermittler



mit Haftvermittler

Herstellung und Verarbeitung von Faserverbundwerkstoffen

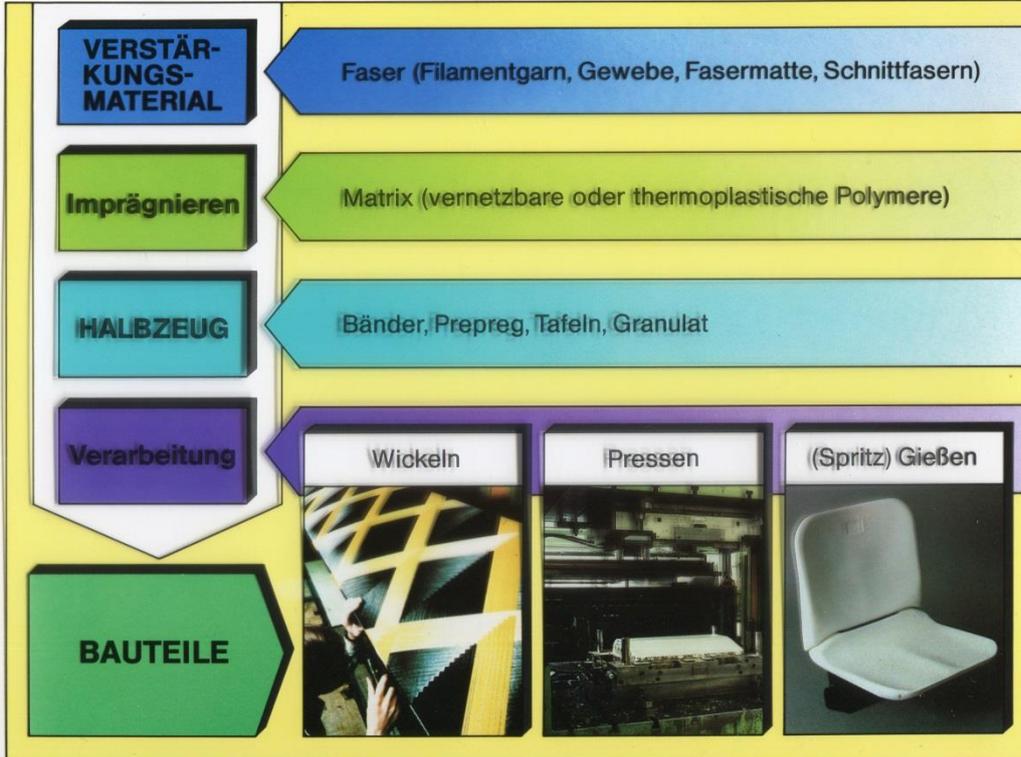


Abb. 66:
Herstellung und Verarbeitung von Faserverbundwerkstoffen

25 Neue Werkstoffe

Einsatz von Faserverbundwerkstoffen am Beispiel Flugzeugbau

Leitwerk-Mittelkasten		
Werkstoff	Teile	Gewicht
Metall	2072	652 kg
Faserverbund	96	500 kg



EIGENSCHAFT	NUTZEN
hohe Festigkeit bei geringem Gewicht	weniger Treibstoffbedarf, höhere Nutzlast
geringe Korrosion, niedrige Ermüdung	höhere Lebensdauer
integrale Bauweise	geringer Montageaufwand

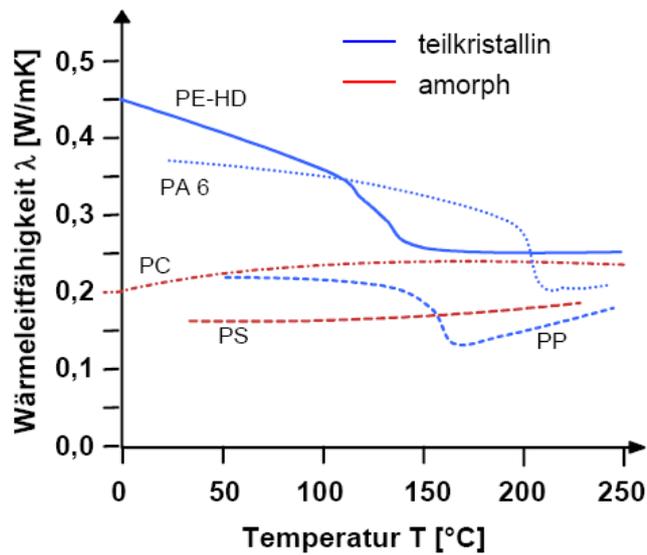
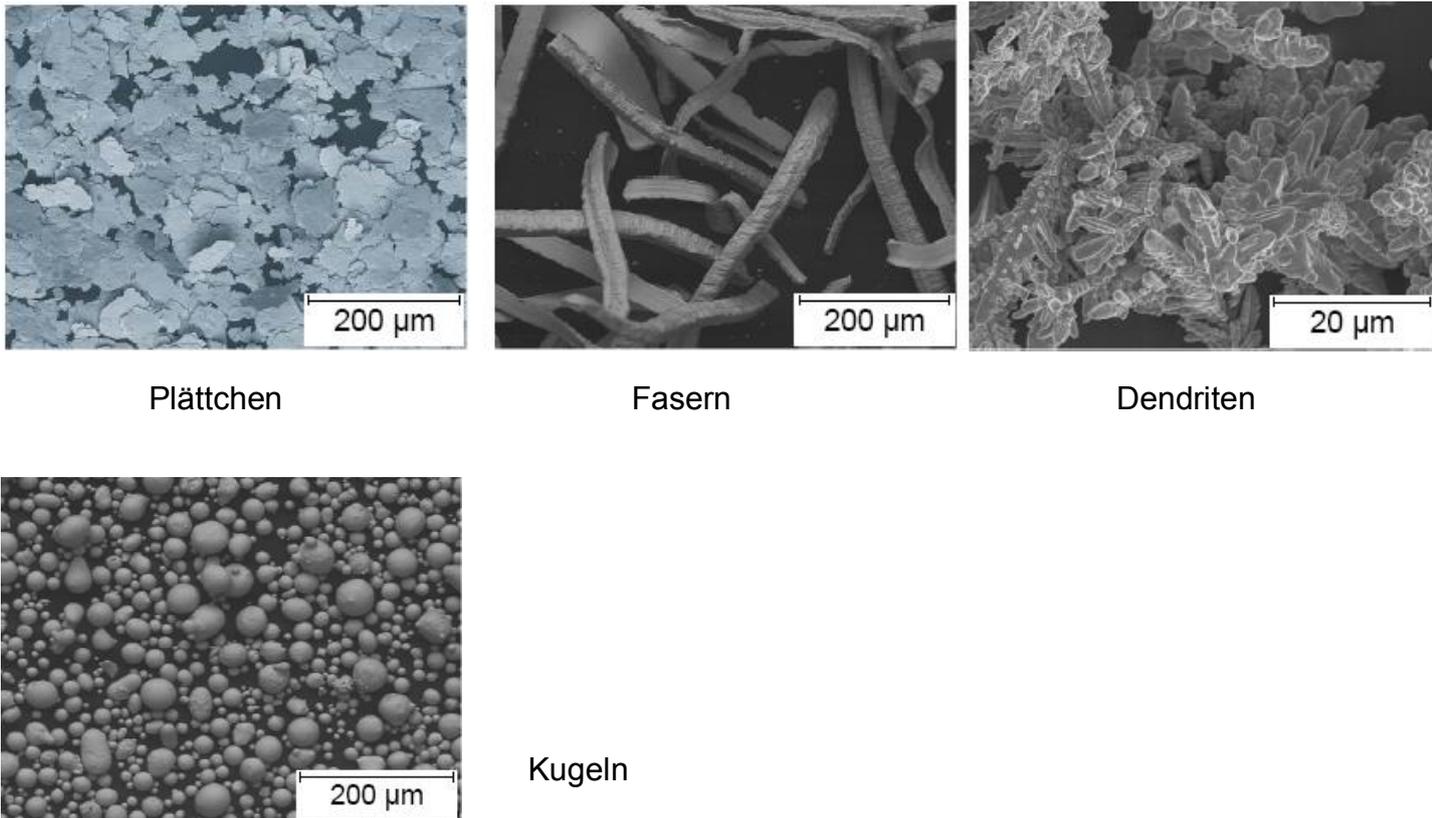
Hochleistungssegelflugzeug

Abb. 67:
Einsatz von Faserverbundwerkstoffen

25 Neue Werkstoffe

8.1.7 Wärmeleitfähige Füllstoffe

Abb. 68: Füllstoffformen – Kupfer



Werkstoff	λ [W/mK]
Kupfer	ca. 380
Aluminium	ca. 200
Aluminiumoxid	ca. 30
Messing	ca. 120
Kohlenstofffasern	20 – 600
Kunststoffe	0,1 - 0,5

Abb. 69: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Werkstoffe

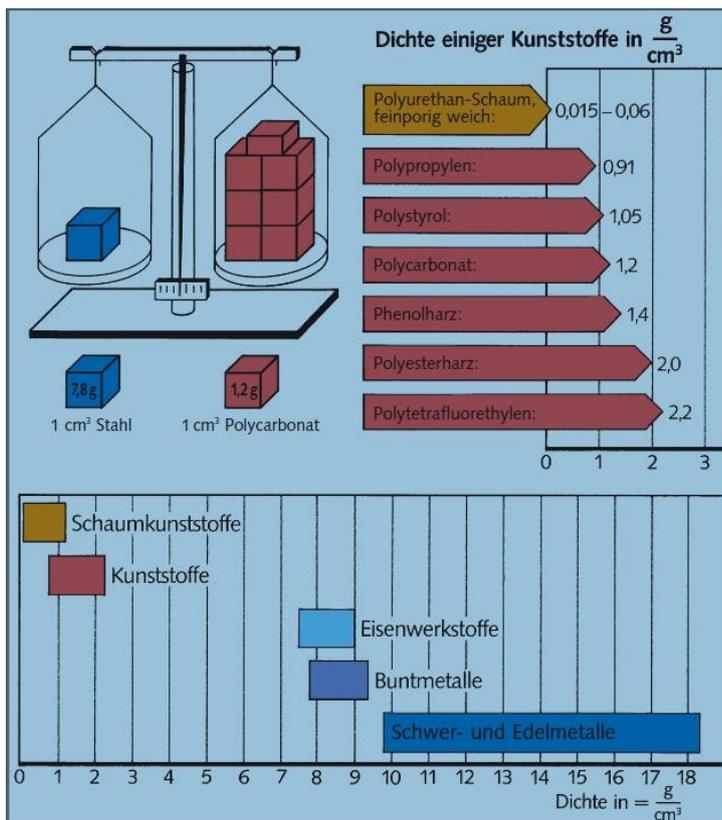
9. Die Eigenschaften der Kunststoffe

9.1 Übersicht

Kunststoffe haben ein ungewöhnlich breites und variables Eigenschaftsspektrum, das sich aus ihrem chemischen Aufbau und ihrer Struktur ergibt.

9.1.1 Kunststoffe sind leicht →

Die Dichten der Kunststoffe liegen zwischen $0,9 \text{ g/cm}^3$ (Polymethylpenten) und $2,2 \text{ g/cm}^3$ (Poly-tetrafluorethylen). Sie sind damit leichter als Metalle oder keramische Werkstoffe. Dieser Eigenschaft verdanken sie viele Anwendungen im Fahrzeug- und Flugzeugbau, bei Sportgeräten, Verpackung u. a. In Verbindung mit der relativ hohen mechanischen Tragfähigkeit, die durch die Einarbeitung von leichtgewichtigen Fasern erreicht wird, gehören sie daher in dieser Form auch zu den wichtigsten Leichtbauwerkstoffen (Carbon, CFK, GFK)



Neu: „Aerographit“ → Netzwerk poröser C-Röhrchen, die auf Nano- und Mikroebene verwachsen sind haben eine Dichte von $0,0002 \text{ g/cm}^3$

Eigenschaften: „stabil“, elektrisch leitfähig, verformbar, undurchsichtig

Abb. 70:

Dichte einiger Kunststoffe

9.1.2 Kunststoffe sind flexibel →

Die **Elastizitätsmodule** der Kunststoffe sind - ebenso wie die Festigkeiten - weit gespreizt. Sie reichen von denjenigen eines weichen Kautschuks (Elastomer) bis zu denjenigen von Metallen (Aluminium). Diese große Spannweite des Elastizitätsmoduls ist einer der besonderen Vorteile gegenüber anderen Werkstoffen. Was besonders die Elastomere (Gummi) betrifft, so ist deren Flexibilität eine für uns unverzichtbare, von keiner anderen Werkstoffgruppe gebotene Eigenschaft (aber: „Superplastizität bei Metallen“ → s. VL Fertigungsverfahren)

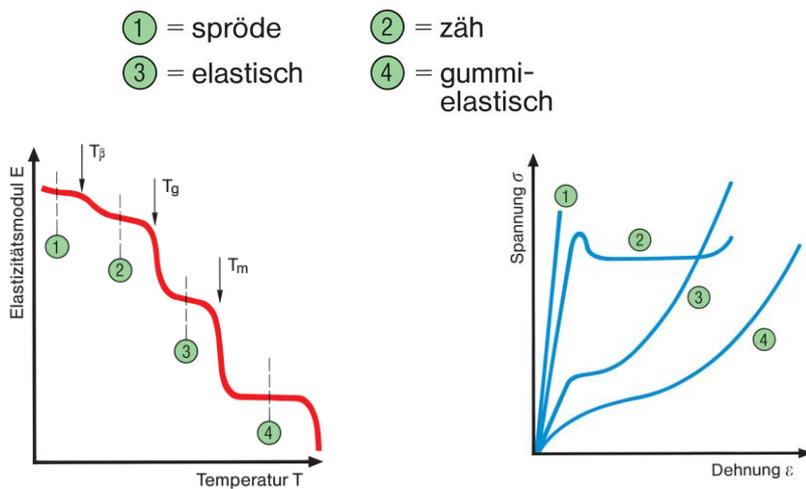


Abb. 71: E-Modul und σ - ϵ -Diagramm als f(T)

T_β = Sekundärerelaxations-T, T_g = Glasübergangs-T, T_m = Schmelz-T

Bei den für Kunststoffe typischen, kleinen bis mittelgroßen Formteilen kann man bereits durch werkstoffgerechtes Konstruieren der Formteile den niedrigen Modul überspielen und dank eines hohen Trägheitsmoments viele Anforderungen auch ohne Faserfüllung erfüllen. Bei großen Formteilen und höheren Ansprüchen an die Steifigkeit hilft die Einarbeitung von Füllstoffen, in erster Linie in Form von Fasern.

9.1.3 Kunststoffe haben eine niedrige Verarbeitungs-(Urform-) Temperatur und ihre Schmelzen sind oft zähflüssig: →

Die Temperatur, bei der Kunststoffe geformt werden können, erstreckt sich von Raumtemperatur bis ca. 250 °C bis 300 °C, in einigen Sonderfällen bis knapp 400 °C. Die gebräuchlichsten Kunststoffe (Thermoplaste) haben eine mit 200 °C bis 250 °C anzusetzende Verarbeitungstemperatur. Dies ist einer der Hauptgründe für die unkomplizierte Verarbeitung und die niedrigen Fertigungskosten, auch wenn die Teile eine komplizierte Gestalt besitzen. Gleichzeitig können dank dieser Eigenschaft sehr viele Füllstoffe in die Kunststoffe eingearbeitet und diese damit an die jeweiligen Anwendungen angepasst werden. Das gilt vor allem auch für Farbpigmente (s. Proben), welche es gestatten, die Formteile durchgehend einzufärben, sodass ein nachträglicher Anstrich nicht erforderlich ist. Neuerdings machen auch die Pharmaindustrie und medizinische Anwendungen hiervon vermehrt Gebrauch; man denke beispielsweise an Pflaster, die medizinische Wirkstoffe enthalten und die bei so niedrigen Temperaturen verarbeitet werden können, dass die Pharmaka nicht geschädigt werden.

Weiterhin erlaubt diese Eigenschaft das Einarbeiten von Treibmitteln und damit die Herstellung von synthetischen Schaumstoffen, deren Dichte - hier spricht man von Raumgewicht - sich bis auf ein Hundertstel des homogenen Werkstoffs, d. h. auf ca. $0,01 \text{ g/cm}^3$ (d. h. 10 kg/m^3 → Stahl: 7900 kg/m^3 !) erniedrigen lässt. Die Anwendungen nützen die gute Isolation von Schall und Wärme, andere das sehr geringe Gewicht bei großer Zähigkeit. Letzteres ermöglicht das Herstellen leichter Bauteile, die dank der großen Dicke trotzdem oft ausreichende Tragfähigkeit besitzen. In anderen Fällen ist auch die Kombination mit Kautschukelastizität gefragt.

Dank der hohen Zähigkeit der Schmelzen und ihrer damit verbundenen Klebrigkeit lassen sich Füllstoffe bis zu Volumengehalten von 60 % einarbeiten. Pulver oder Sand steigern beispielsweise den Elastizitätsmodul, was man ausnützt, um vor allem die Druckfestigkeit zu steigern. Ein gutes Beispiel sind Fußbodenbeläge aus gefülltem Weich-PVC.

Organische Füll- und Verstärkungsstoffe, wie Holzmehl, Fasern oder Zellulosebahnen, steigern die Schlagzähigkeit → Def., den E-Modul und die Festigkeit beispielsweise bei duroplastischen Harzen (Phenolharze). Gleichzeitig steigert man damit die Festigkeit und die

Schlagzähigkeit und vermindert Poren, die wegen der Wasserabspaltung bei der Härtung (Polykondensation) entstehen würden.

Kohlenstoff in Form von Graphit, Ruß oder als Faser wird ebenfalls in erheblichen Mengen ein-gearbeitet, z. B. Ruß in Elastomere bei Autoreifen. Hierdurch werden die mechanischen Eigenschaften und die Lichtbeständigkeit verbessert. In anderen Fällen dienen sie (z.B. Ag) zur Herstellung der Leitfähigkeit für elektrischen Strom und Wärme.

Durch Einarbeiten von Weichmachern (gewisse Ester) kann die Steifigkeit gewisser Kunststoffe von hart bis zu weich, d. h. hin zu einem Elastomer, verändert werden (z. B. PVC). Mit Hilfe von gezielt, d.h. unter Berücksichtigung des Spannungsverlaufs, eingearbeiteten Fasern lassen sich Steifigkeit und Festigkeit um ein Vielfaches steigern. Dies zeigt sich besonders deutlich in den auf die Dichte bezogenen Eigenschaften (σ/ρ und E/ρ), die als Kennzahlen für den Leichtbau benützt werden. Sie übertreffen diejenigen von Metallen weit (Bei diesen Anwendungen macht man noch von einer weiteren, besonderen Eigenschaft einiger Kunststoffe Gebrauch, die bei niedrigen Temperaturen, z. B. Raumtemperatur, als flüssige Vorprodukte sehr einfach das Tränken von solchen Fasern und Textilien erlauben und nach der Polymerisation (oft als Härten bezeichnet), eine hohe Haftfestigkeit zu diesen gleichzeitig mit einem hohen Elastizitätsmodul entwickeln. Mit dieser Methode kann man mit relativ geringem Aufwand auch in geringen Stückzahlen wirtschaftlich Bauteile bis zur Größe von Schiffen, Raketen, Sendetürmen u. a. (100 m Höhe) herstellen.

9.1.4 Kunststoffe haben niedrige Leitfähigkeiten →

Die Wärmeleitfähigkeit (1×10^{-1} bis 9×10^{-1} W/mK) liegt um etwa drei Größenordnungen unter derjenigen der Metalle. Dies erschwert zwar oft die Fertigung (Ursache für vergleichsweise lange Abkühlzeiten nach der Formgebung), macht jedoch viele Kunststoffe zu wichtigen Isolationswerkstoffen, was durch Schäumen noch weiter verbessert wird. Der elektrische Durchgangswiderstand liegt bei homogenen Kunststoffen zwischen 10^{10} und 10^{19} Ωcm , also mehr als 15 Größenordnungen höher als bei Konstantan (CuNi44, das am schlechtesten leitende Metall mit 5×10^{-5} Ωcm). Kunststoffe sind daher besonders wichtige elektrische Isolierwerkstoffe, die in Verbindung mit ihrer Flexibilität für die Isolierung von elektrischen Leitungen und Kabeln genutzt werden. Aber auch hier lässt sich durch Einmischen von z. B. Graphit oder Ruß der spezifische Durchgangswiderstand bis hinunter zu demjenigen von Konstantan anpassen.

Seit einem Jahrzehnt ist es auch möglich, durch speziellen Molekülaufbau hoch leitfähige, so genannte intrinsiacetylen, Polypyrrol, Polyanilin, Polytiophen). Sie erhalten ihre Leitfähigkeit durch eine regelmäßige Anordnung von Doppelbindungen, bei denen 1 Elektronenpaar leicht verschiebbar ist, s. Abb.

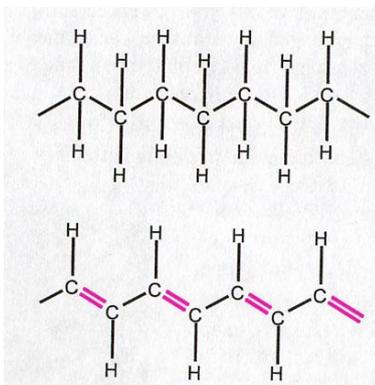


Abb. 72: Struktur von Polymerleitern

PE

Konjugierte Doppelbindung

Die Leitfähigkeit beruht hauptsächlich auf der e^- -Bewegung entlang der Ketten, nicht aber auf Sprüngen von Kette zu Kette. Der exakte Mechanismus ist aber noch nicht bekannt (2012).

Da diese Werkstoffe beim Umformen ihre Leitfähigkeit verlieren, werden sie bisher als Füllstoffe, z. B. in antistatische Lacke eingearbeitet und eingesetzt (Polyanilin). Polypyrrol wird in Form von Folien in Sensorelektroden, Knopfzellen und Kondensatoren eingesetzt, s. Abb.

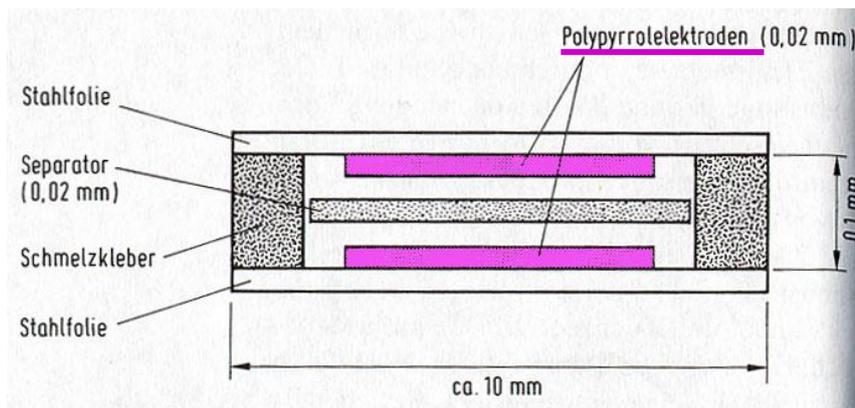
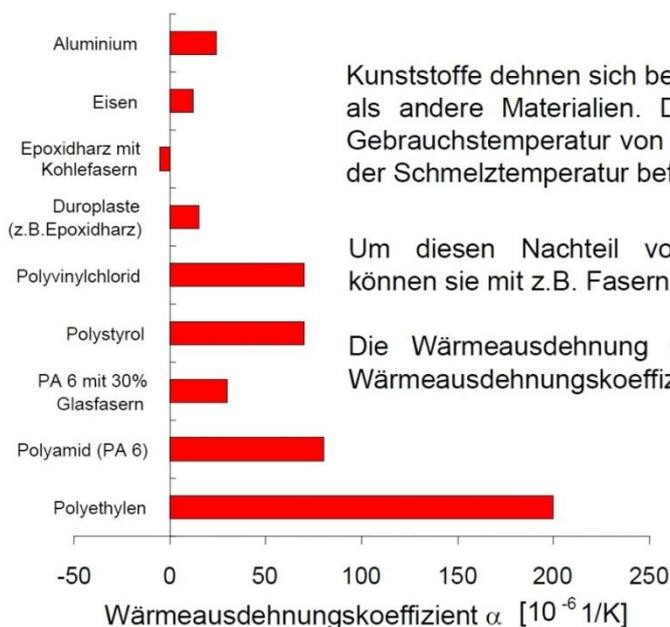


Abb. 73:
Querschnitt durch einen Polypyrrol Superkondensator

9.1.5 Wärmeausdehnung



Kunststoffe dehnen sich bei Erwärmung deutlich stärker aus als andere Materialien. Dies liegt daran, dass sich die Gebrauchstemperatur von Kunststoffen nicht weit unterhalb der Schmelztemperatur befindet.

Um diesen Nachteil von Kunststoffen auszugleichen, können sie mit z.B. Fasern o.a. gefüllt werden.

Die Wärmeausdehnung wird charakterisiert durch den Wärmeausdehnungskoeffizienten α .

Abb. 74:
Wärmeausdehnung verschiedener Werkstoffe

9.1.6 Kunststoffe sind teilweise transparent →

Einige amorph erstarrende Kunststoffe haben den mineralischen Gläsern vergleichbare optische Eigenschaften bei gleichzeitig weit verbesserter Zähigkeit. Daher werden sie schon länger im Bauwesen und mehr und mehr auch im Automobilbau für Verglasungen eingesetzt (Acrylglas, Polycarbonat).

9.1.7 Kunststoffe haben eine hohe chemische Beständigkeit →

Infolge des von Metallen sehr verschiedenen atomaren Bindungsmechanismus (Atombindung anstelle der metallischen Bindung) leiden sie nicht unter der als Korrosion bekannten Zerstörungsform von Metallen (s. Korrosion und Oberflächentechnik → 7. Sem. MB), wenn sie mit entsprechenden Medien in Berührung kommen. Die meisten Kunststoffe sind beständig gegen Mineralsäuren, Laugen und wässrige Salzlösungen, welche die meisten Metalle angreifen. Dies ist auch die Ursache für die pflegeleichte Handhabung, was ihren Einsatz bei Haus- und Elektrogeräten, Spielzeugen, Fahrzeugausstattungen u. a. in sehr unterstützt. Ebenso basiert hierauf die hohe Beständigkeit gegen Einflüsse durch Bewitterung.

Andererseits sind viele Kunststoffe durch organische Lösungsmittel lösbar (Metalle aber nicht!). Da diese jedoch nur spezifisch wirken, kann man dies für jeden Einsatzfall berücksichtigen

und jeweils beständige Werkstoffe aussuchen (Benzintank aus Polyethylen). Die Löslichkeit ist andererseits oft eine Möglichkeit einfacher Verarbeitung, z. B. sind Lacke gelöste Polymere.

9.1.8 Kunststoffe sind durchlässig →

Die infolge größerer Atomabstände, was gleichbedeutend ist mit niedriger Dichte, höhere Durchlässigkeit für Gase und manchmal auch Flüssigkeiten, kann nachteilig sein. Jedoch gilt das nicht generell, denn auch die Durchlässigkeit wirkt sich spezifisch aus, d. h. gewisse Polymerwerkstoffe sind nur gegenüber chemisch ähnlich aufgebauten Gasen und Flüssigkeiten leicht durchlässig; man kann somit die für das jeweilige Anwendungsgebiet am besten geeigneten Kunststoffe aussuchen. Andererseits ist die Durchlässigkeit für manche Anwendungen erforderlich, z. B. für Membranen für Meerwasserentsalzungsanlagen oder Kunststoffe, die als Organersatz eingesetzt werden.

Wasserdampf- und Sauerstoffdurchlässigkeit

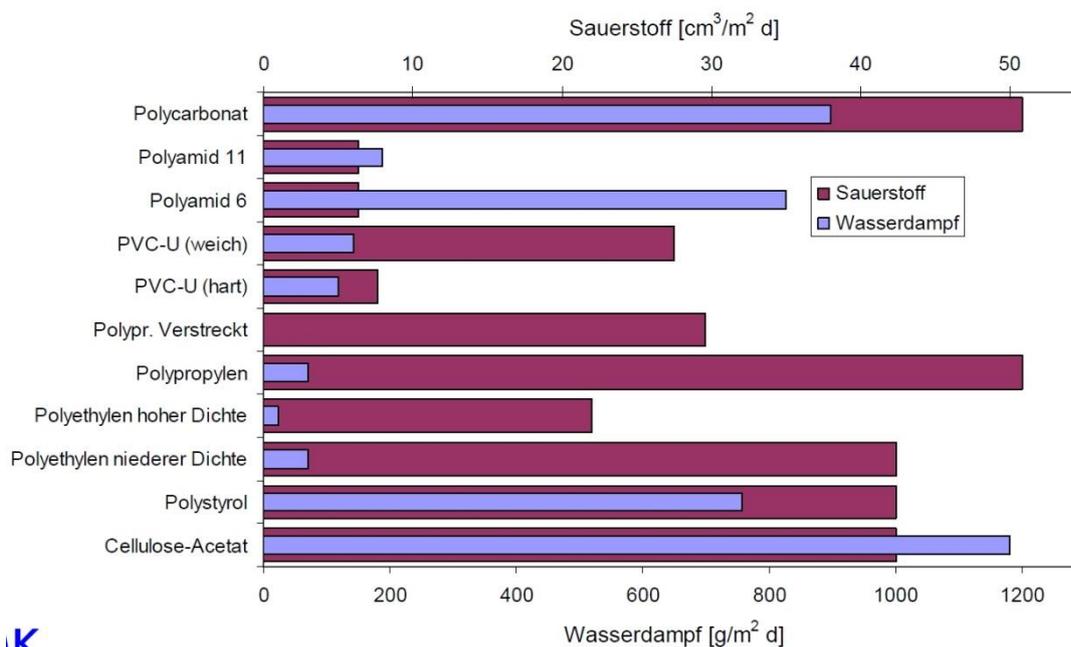


Abb. 75: Durchlässigkeit verschiedener Werkstoffe



9.1.9 Löslichkeit und Quellbarkeit

Beim Eindringen kleiner Fremdmoleküle (Lösungsmittel) werden die Nebenvalenzen vermindert. Das Material erweicht unter Quellung und kann teilweise oder ganz gelöst werden. Bei weichgemachten, amorphen Kunststoffen und Lacken wird dies technisch ausgenutzt. Bei Benzinkanistern oder Öltanks ist der Effekt unerwünscht, man setzt hier beständige teilkristalline oder eng vernetzte Kunststoffe ein.

9.1.10 Kunststoffe lassen sich mit Hilfe unterschiedlicher und vielseitiger Methoden wieder verwenden bzw. verwerten →

Kunststoffe sind bereits von ihrer Erzeugung her umweltfreundliche Werkstoffe; sie benötigen nur wenig Energie zu ihrer Herstellung, wie die Energieäquivalente einiger Werkstoffe im Vergleich mit Kunststoffen zeigen (s. Abb. 59). Auch für die Herstellung von Formteilen werden nur geringe Energiemengen benötigt, wie im Vergleich einiger Erzeugnisse, die üblicherweise sowohl aus Kunststoffen, wie aus anderen Werkstoffen hergestellt werden, leicht erkennbar ist.

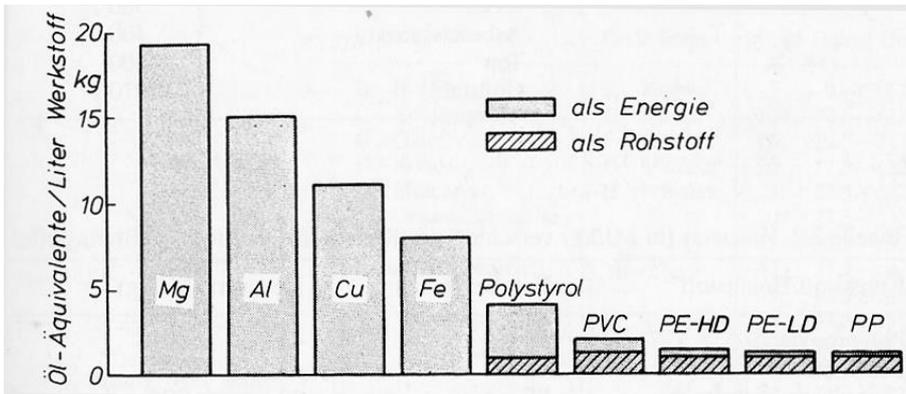


Abb. 76:

E-Bedarf bei der Herstellung von Werkstoffen

Falls ein wirtschaftliches Wiederverwerten nicht möglich sein sollte, können Kunststoffabfälle, die mit anderen Stoffen gemischt vorliegen, problemlos, z. B. durch Verbrennen (unter Energiegewinnung), beseitigt und somit nützlich verwertet werden. Dank ihres organischen Aufbaus sind Kunststoffe mit ganz wenigen Ausnahmen gut brennbar; dies kann man durch gewisse Füllstoffe beschränken und so eine schnelle Entzündung erschweren, aber nie völlig verhindern. Durch Verbrennen werden die Polymerwerkstoffe zunächst in Kohlenwasserstoffe depolymerisiert; diese verbrennen dann zu Kohlendioxid und Wasserdampf. Damit schließen sich die Kunststoffe in den biologischen Kreislauf des Kohlenstoffs zwanglos ein. .

Die **physikalischen Eigenschaften** der Polymere werden entscheidend durch ihre Kettenlänge bestimmt. Ein Maß für diese Kettenlänge ist der (*mittlere*) *Polymerisationsgrad* n . Dieser bezeichnet die Anzahl an Monomereinheiten, die in der Kette enthalten sind. Im Falle der Polyethylens können dies bis zu 10^4 Einheiten sein. Aufgrund des Mechanismus der Kettenbildung sind nicht alle Ketten gleich lang, sodass man einen Mittelwert für den Polymerisationsgrad angibt.

Die wichtigste Größe zur Charakterisierung der Kettenlänge ist die Molmasse oder das Molekulargewicht. Sie sind definiert als Produkt der Molmasse der Wiederholungseinheit und des mittleren Polymerisationsgrades. Im Falle des Polyethylens erhält man so Werte zwischen 29000 und 290000 (Masse der Wiederholungseinheit = $2 \cdot 12 \text{ g mol}^{-1} + 4 \cdot 1 \text{ g mol}^{-1} = 29 \text{ g mol}^{-1}$ für PE. Da - wie gesagt - nicht alle Ketten gleich lang sind, wird auch hier ein Mittelwert angegeben, im Gegensatz zu den niedermolekularen chemischen Verbindungen, die in der Regel ein definiertes Molekulargewicht besitzen. Da es sich um einen Mittelwert handelt, fügt man der Angabe des Molekulargewichts keine Einheit hinzu (die Einheit der Molmasse ist g mol^{-1}).

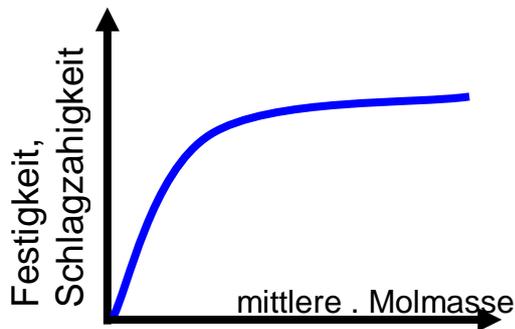
- Die Größe eines Makromoleküls (Kettenlänge eines thermoplastischen Kunststoffs, Achtung bei Seitenketten) wird durch die Molmasse bzw. den **Polymerisationsgrad** n ausgedrückt
- n = Zahl der Monomere, die zu einem Makromolekül vereinigt werden

$$n = \frac{M_{\text{Polymer}}}{M_{\text{Monomer}}} \rightarrow (10^9 \gtrsim n \gtrsim 10^2)$$

Da die Polymere unterschiedliche Kettenlängen aufweisen, ist n der mittlere Polymerisationsgrad.

Die **Molmasse** M ist die Summe der in einem Molekül enthaltenen Atomgewichte (nur bei nicht räumlich vernetzten Polymeren sinnvoll).

Die Abb. 77, s. rechts, zeigt schematisch wie die Festigkeit mit der mittleren Molmasse – und damit der Kettenlänge – steigt



Beispiele:

1) Polyethylen (PE)

Molmasse des Polymers = Molmasse des Monomers • mittlerer Polymerisationsgrad (Polymerisationsgrad $1000 < n < 10.000$)

Molmasse des Monomers: $2 \cdot 12 \text{ (C)} + 4 \cdot 1 \text{ (H)} = 29 \text{ g mol}^{-1}$

Molmasse des Polymers: $29.000 - 290.000 \text{ g mol}^{-1}$

PE – LD $n \sim 10^3$ rel. niedermolekular (low density)

PE – LLD $n \sim 5 \cdot 10^4$ rel. hochmolekular (linear low density)

PE – UHMW $n \sim 5 \cdot 10^5$ ultra hochmolekular (ultra high molecular weight)

2) Polystyrol (PS)

Molmasse	Polymerisationsgrad	Aussehen nach Umfällen der Lösung	Aussehen nach Schmelzen und Abkühlen	Technische Verwendung
200-1.000	2 – 10	füssig – fest	z.T. kristallisierend brüchig spröde	-
1.000 – 20.000	10 – 200	pulverig	weniger brüchig, fester, schwach filmbildend	Lacke
20.000 – 95.000	200 – 950	etwas faserig	zäh, glasig	thermoplastische Spritzgussmassen
95.000 – 1.500.000	950 – 15.000	langfaserig	sehr zähe Gläser, in der Wärme elastisch	Folien und Bänder

Tab. : Zusammenhang zwischen dem Aussehen, der technischen Verwendbarkeit und der Molmasse bei einem technischen Polystyrol

Da synthetische Polymerisate polydispers sind, liegt eine kontinuierliche Verteilung an Molekülketten mit verschiedenen Molmassen vor, s. Abb. 65. Diese hat neben dem Molekulargewicht auch einen erheblichen Einfluss auf die Eigenschaften des Polymers:

Will man gezielte Eigenschaften erreichen, so muss man eine enge Molmassenverteilung (Abb. 76, blaue Kurve), d.h. eine geringe Schwankungsbreite der Kettenlänge, einstellen
 → Katalysatoren

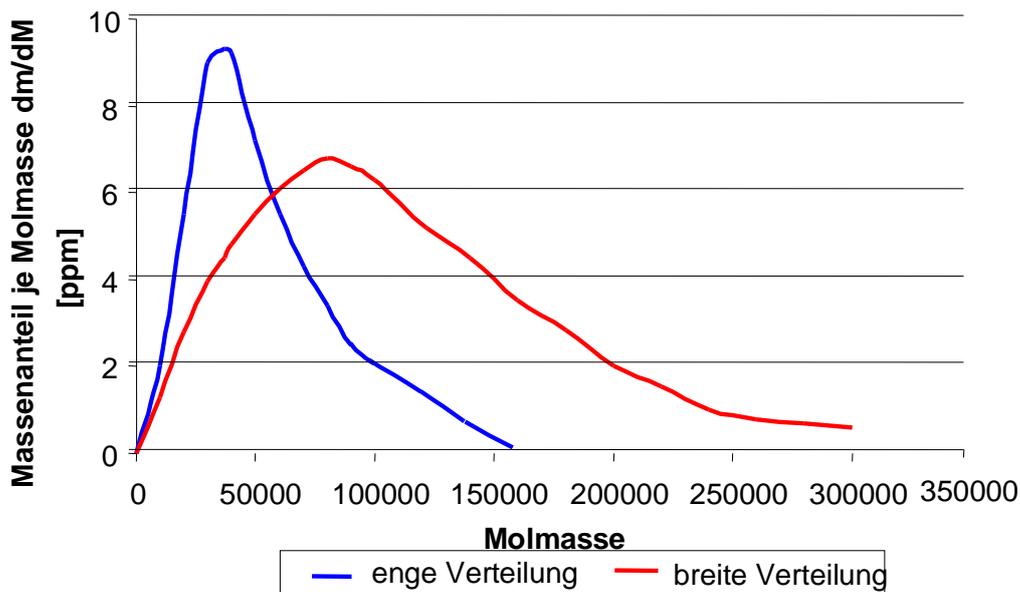


Abb. 78: Typische Molmassenverteilung am Beispiel Polystyrol

Einfluss des chemischen Aufbaus

Als Kohlenstoffverbindungen weisen die Kunststoffe folgende allgemeine Merkmale auf:

1. geringe Dichte:

Die Dichte liegt meist zwischen 0,9 und 1,4 g/cm³. Bei fluorierten Kunststoffen kann sie bis auf 2,3 g/cm³ ansteigen.

2. relativ hohe chemische Beständigkeit gegenüber anorganischen Medien

Je nach ihrem chemischen Aufbau unterscheiden sich die Kunststoffe in ihrer Beständigkeit gegen Chemikalien wie Säuren, Laugen, Lösungsmittel usw. und allgemein in ihrer Wetter- und Gebrauchsfestigkeit sowie Alterungsbeständigkeit. Bei hohen Temperaturen (100 bis 250 °C) erfolgt meist Zersetzung.

3. hohes elektrisches + thermisches Isoliervermögen

besonders bei speziell als Isolierstoffe entwickelten Kunststoffen. meist elektrostatische Aufladung. S. auch intrinsisch leitfähige Kunststoffe (s.o.)

Einfluss von Gestalt, Größe, Ordnung und Nebervalenzen

Die Abhängigkeit der Nebervalenzen von Molekülstruktur und -ordnung ergibt

4. ein vielfältiges mechanisches Verhalten

Es können flüssige, plastische, weichelastische, hartelastische oder spröde Kunststoffe erzeugt werden. Die Abhängigkeit der Nebervalenzen von äußeren Einflüssen ergibt

5. begrenzte Temperaturstandfestigkeit

Bei Temperatursteigerung werden die Nebervalenzen durch die Wärmeschwingungen der Moleküle geschwächt, das Material erweicht und kann gegebenenfalls schmelzen. Einige Beispiele zeigt die Abb. 66.

6. Optik, Wärmedehnung, Durchlässigkeit

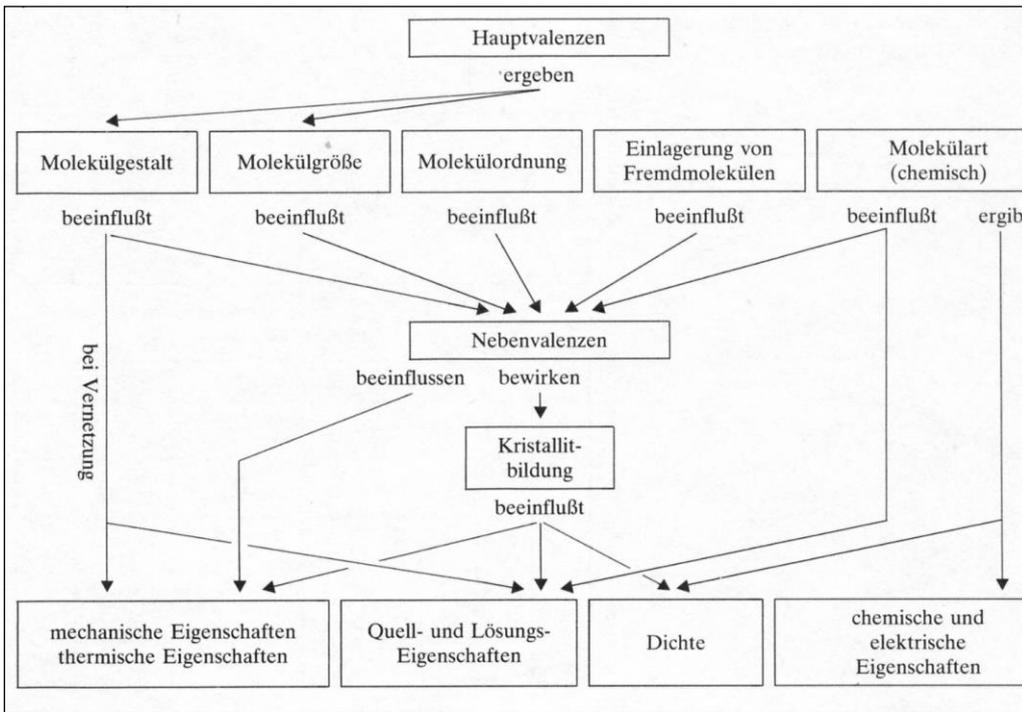


Abb. 79:
Zusammenhang zwischen Moleküleigenschaften und Werkstoffeigenschaften

Beispiele:

a) Thermoplastische Kunststoffe der BASF

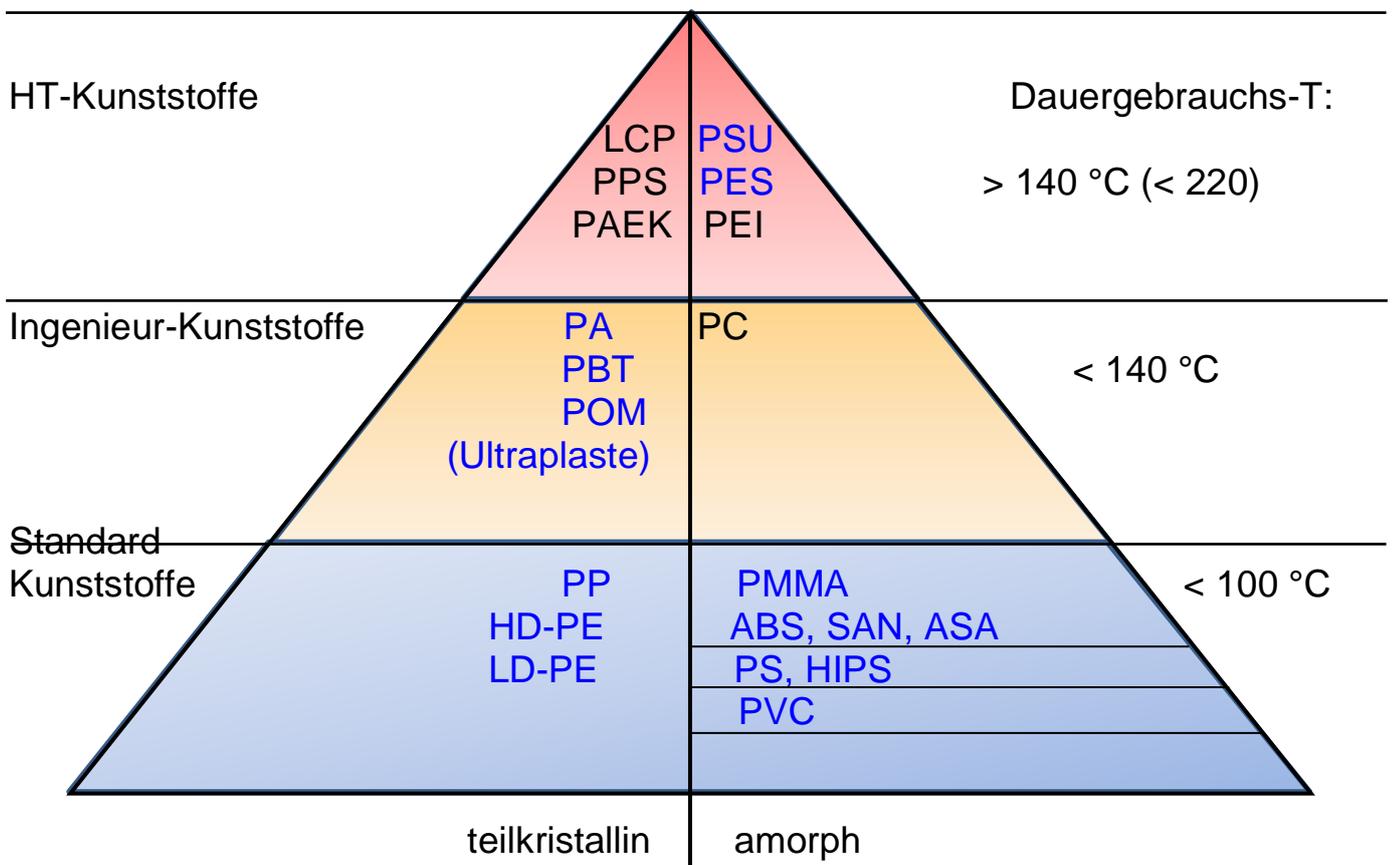


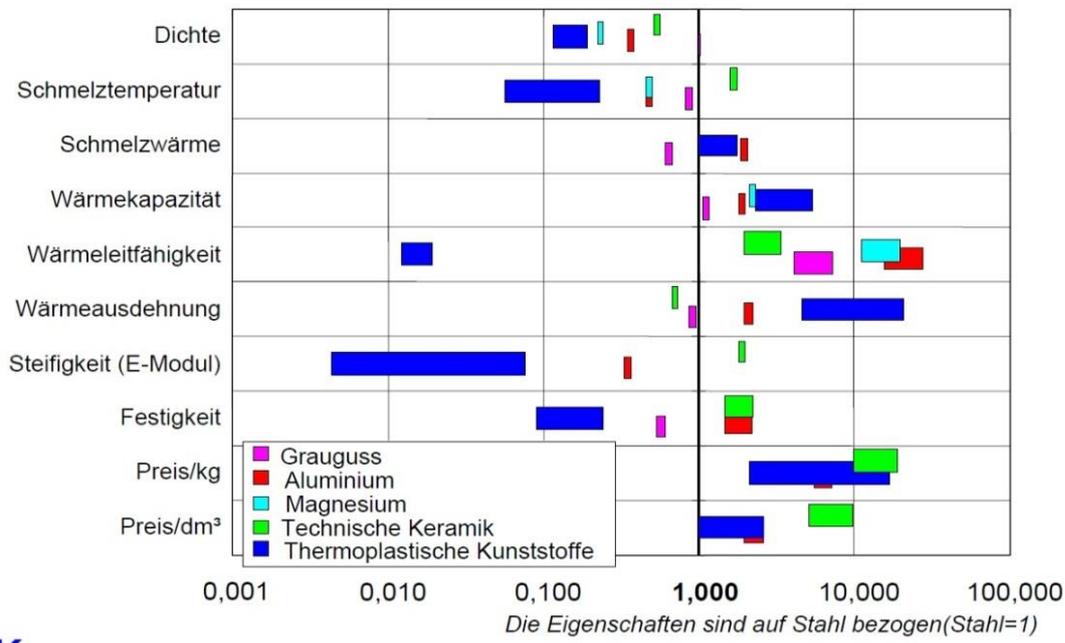
Abb. 80: Dauergebrauchstemperaturen thermoplastischer Kunststoffe

Beziehungen von Herstellung, Molekülstruktur und mechanischem Verhalten bei Polymeren

b) Abb. 81:

Kategorie	Herstellungsverfahren	Molekülstruktur	Mechanische Wirkung
Thermoplastische Polymere			
	Zusatz von Bindemitteln	Verzweigung	erhöhte Festigkeit und Steifigkeit
	Vulkanisierung	Vernetzung	erhöhte Festigkeit und Steifigkeit
	Kristallisierung	erhöhte Kristallinität	erhöhte Festigkeit und Steifigkeit
	Weichmacher	verringertes Molekulargewicht	verringerte Festigkeit und Steifigkeit
	Füllstoff	eingeschränkte Kettenbeweglichkeit	erhöhte Festigkeit und Steifigkeit
Duroplastische Polymere			
	Verfestigen bei erhöhten Temperaturen	Netzwerkbildung	starr (bleibend beim Abkühlen)

Abb. 82: Einordnung der Eigenschaften von Kunststoffen



Nach den praktischen Erfordernissen lassen sich die **Eigenschaften der Kunststoffe abwandeln**

1. durch

2. durch

z.B. Polyblends

3. durch

z.B. Copolymerisation

4. durch

5. durch

Recken, Verstrecken von Fasern

6. durch

9.1.11 Eigenschaften: Zusammenfassung

Die Eigenschaften der Kunststoffe werden bestimmt von:

- Art und Größe der Bindungskräfte (→ chemischer Aufbau, s.o.)
- Verzweigungen der Ketten, Kristallisationsgrad
- Polymerisationsgrad n (Kettenlänge)
- Isomeren, d. h. vom chemischen Aufbau und von der Struktur (Verarbeitung)

Da diese Faktoren sehr variabel sind, haben die Kunststoffe das besprochene ungewöhnlich breite Eigenschaftsspektrum.

10. Morphologie der Kunststoffe (Morphologie = Lehre von der Gestalt)

10.1 Allgemeines

Die Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften auf Basis der Veränderung der Struktur bei den verschiedenen Kunststoffklassen

- Amorphe Thermoplaste
- Teilkristalline Thermoplaste
- Elastomere
- Duroplaste

lässt sich durch Zustands-Diagramme (ZSD) erklären. Die darin enthaltenen Informationen geben wichtige Hinweise auf die Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften.

Dies Kunststoff-ZSD unterscheiden sich deutlich von den ZSD bei Metallen (wichtig für Legierungen, s. WT-VL Teil 1).

Für Kunststoff-ZSD gilt:

- sind Temperaturintervalle, in denen sich physikalische Eigenschaften wenig ändern.
 - Glaszustand, erstarrt, hart, spröde
 - Thermoelastisch, zäh bis weichelastisch
 - Thermoplastisch, schmelzflüssig
- Übergangsbereiche zwischen den Zustandsbereichen \Rightarrow starke Änderung physikalischer Eigenschaften (beim Aufheizen)

Erweichungstemperatur [ET] (= Glastemperatur T_g)
Übergang von spröde-hart zu zäh(flüssig) beim Aufheizen

Kristallitschmelztemperatur [KT]
Auflösung der kristallinen Bereiche (nur bei teilkristallinen Thermoplasten)

Fließtemperatur [FT] (Schmelztemperatur)
Übergang von weichelastisch-zäh zu niedrigviskos fließend (beim Aufheizen)

Zersetzungstemperatur [ZT]
Hauptvalenzbindungen brechen auf.
Wird bei der Verarbeitung die Zersetzungstemperatur überschritten, wird der Werkstoff irreversibel geschädigt.

10.2 Dichte - Spezifisches Volumen:

- **Partialvolumen** \Rightarrow Schwingungsausdehnungsvolumen der Kettenmoleküle

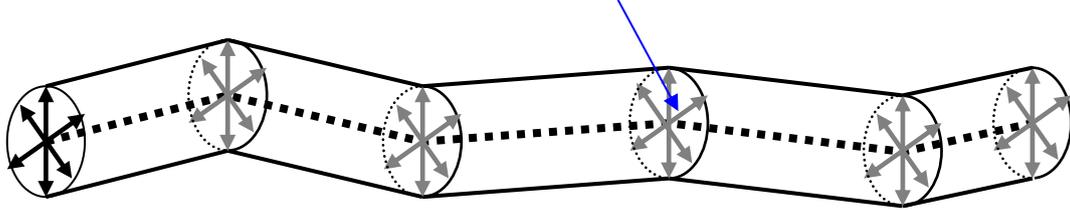


Abb. 83: Schwingungsausdehnungsvolumen (schematisch)

- **Leerstellenvolumen** \Rightarrow Freies Volumen zwischen den Kettenmolekülen (durch Baufehler wie Kettenenden, Faltungen, Verhakungen,)

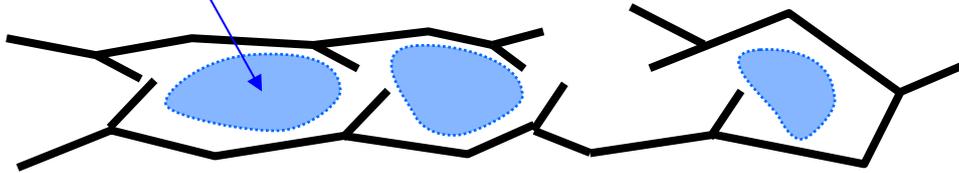


Abb. 84: Leerstellenvolumen (schematisch)

- **Mikrobraunsche Bewegung**
 - Thermische Bewegung von Kettensegmenten und Seitenketten zwischen Erweichungs- und Fließtemperatur
- **Makrobrownsche Bewegung**
 - Oberhalb der Fließtemperatur bewegt sich das ganze Molekül. Platzwechsellvorgänge können stattfinden

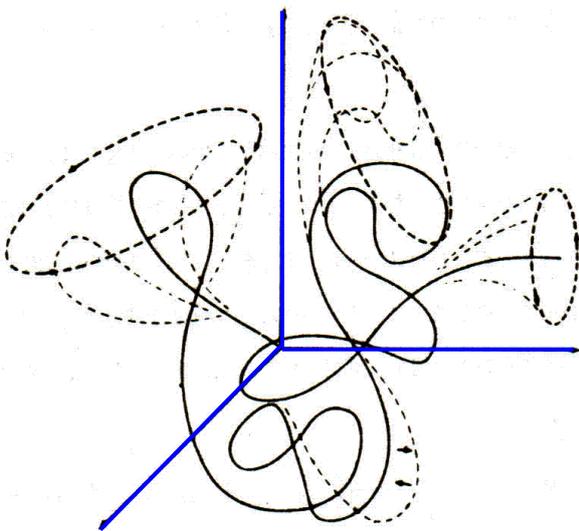


Abb. 85: Schematische Darstellung der Makrobrownschen Bewegung im Raum

10.3 Zustandsdiagramme (ZSD)

10.2.1 Amorphe Thermoplaste:

Der innere Aufbau und die Auswirkungen der Strukturen der verschiedenen Kunststoffklassen lassen sich über die Zustandsdiagramme gut erläutern. Diese ZSD unterscheiden sich deutlich von den ZSD der Metalllegierungen, s. VL.

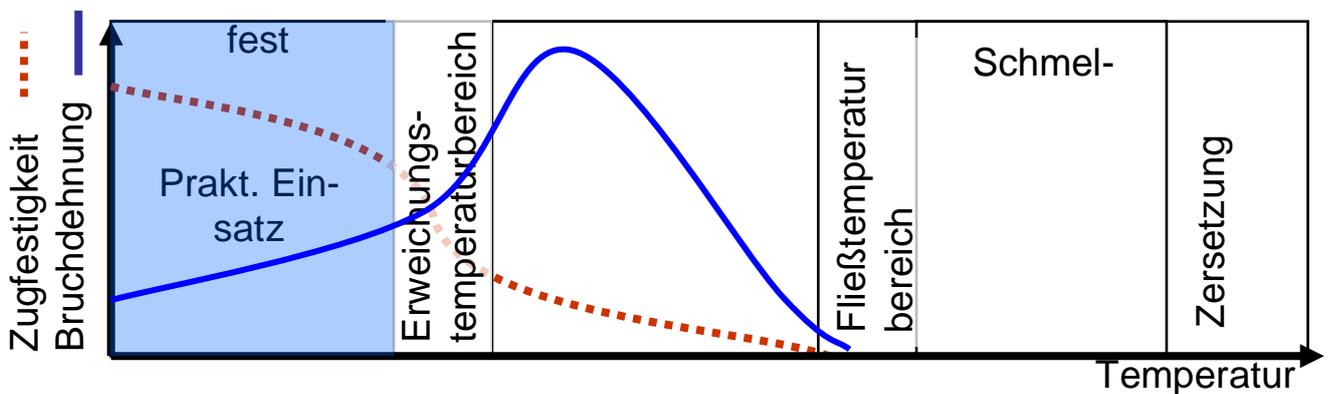
Durch Aufheizen und Abkühlen lassen sich die drei Zustände (Zustandsbereiche)

- Glaszustand
- thermoelastisch
- thermoplastisch

wiederholt einstellen ⇒ Wiederverwertung.

- **Einsatztemperatur** unterhalb der Erweichungstemperatur, s. ZSD
- Alterung des Werkstoffs durch die Prozesstemperatur, s. ZSD

Bsp.: PVC, PS, ABS, PMMA, PC, ...

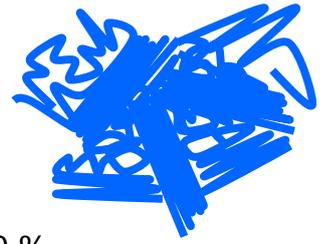


Zustandsform	fest, glasartig spröde bis zähhart	Kautschukartig, thermoelastisch, Körper großer elastischer Dehnung	thermoplastisch, zähviskoses Fließen	Zersetzung
Molekulare Struktur	Verknäulte Makromoleküle;	noch weitgehende Knäuelstruktur der Makromoleküle,	Makromoleküle gegeneinander verschiebbar; Verschlaufungen gelöst;	Zerfall der Makromoleküle
Verarbeitung	Spanendes und spanloses Formen lösbares und unlösbares Fügen Oberflächenveredelung	Spanlose Formgebung: Biegen, Tiefziehen, Biaxiales Orientieren	Urformen: Spritzgießen, Extrudieren, Kalandrieren, Fügen, Schweißen	Keine

Abb. 86: ZSD amorpher Thermoplaste

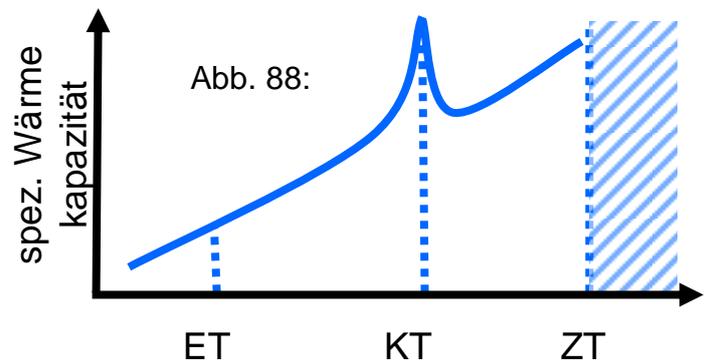
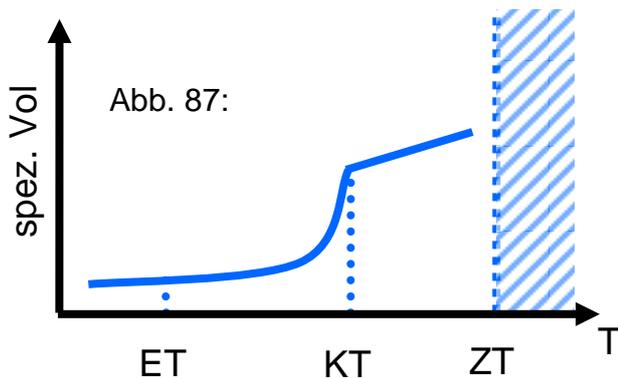
10.2.2 Teilkristalline Thermoplaste

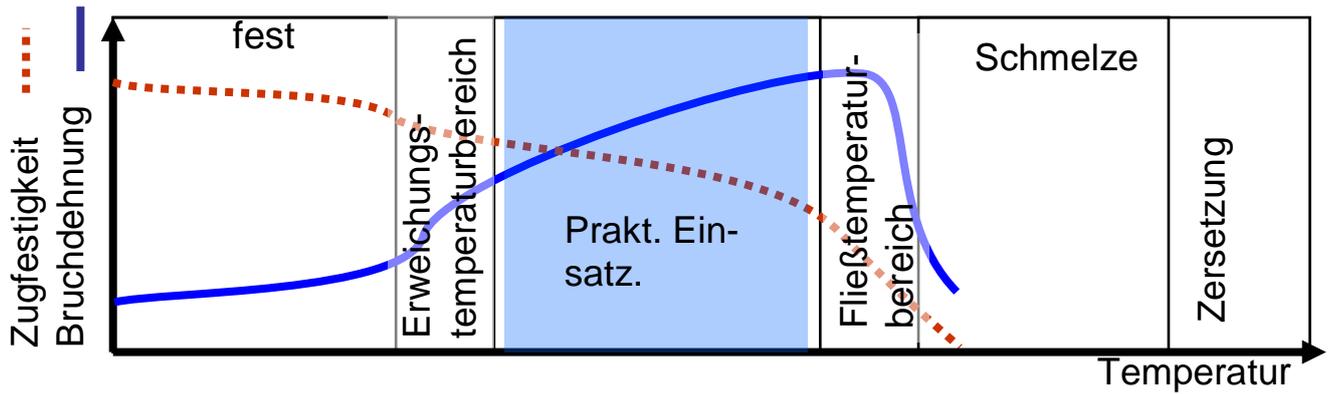
- Teilkristalline Thermoplaste bestehen aus kristallinen Bereichen, die von einer amorphen Matrix umgeben sind. Diese Bereiche gehen stufenlos in einander über, ein Teil der Makromoleküle durchzieht beide Bereiche.
- Typische Kristallisationsgrade sind 40-60% (abhängig z.B. von den Erstarrungsbedingungen, z.B. langsam: 60 %, schnell 40 %).



Zustandsbereiche

- Glaszustand, hart + spröde
 - Thermoelastisch, zäh-hart (amorphe Phase erweicht, Kristalle hart)
 - Thermoplastisch, schmelzflüssig
- **Einsatztemperatur** oberhalb der Erweichungstemperatur, s. ZSD
 - Bsp.: PE, PP, PA, PBT, PET
 - Beim Überschreiten der Kristallitschmelztemperatur ordnen sich alle Moleküle in einer amorphen Struktur an.
 - Große Änderung des spez. Volumens (Dichte)
 - Schwindung, Verzug und Eigenspannungen bei der Herstellung von Bauteilen
 - Große Änderung der spez. Wärmekapazität
 - Energiebedarf bei der Verarbeitung (Ermittlung, Bereitstellung)





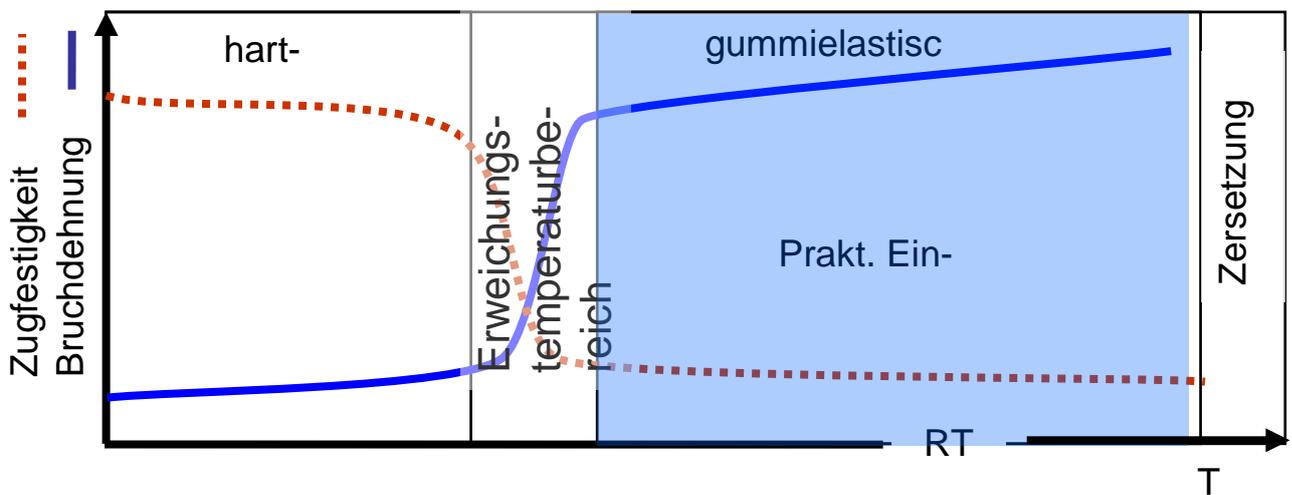
Zustandsform	fest, glasartig spröde	fest, zähelastisch	thermoelastisch	thermoplastisch, hochviskose Flüssigkeit	Zersetzung
Molekulare Struktur	Amorphe und kristalline Bereiche fest.	Amorphe Bereiche zunehmend beweglicher, Kristallite nicht beeinflusst	Kristalline Bereiche beginnen sich aufzulösen	Kristalline Strukturen weitgehend aufgelöst;	Molekularer Abbau der Thermoplaste
Verarbeitung	Keine	Spanendes und spanlose Formen, lösbares und unlösbares Fügen, Oberflächenveredelung	Umformen, Biegen, Tiefziehen	Urformen Spritzgießen, Extrudieren, Blasformen Fügen, Schweißen	Keine

Abb. 89: ZSD teilkristalliner Thermoplaste

10.2.3 Elastomere:

- Zustandsbereiche
 - Hart bis zähelastisch
 - Gummielastisch
- Elastomere werden bei der Herstellung vernetzt.
- Vorprodukt unvernetzte, kurzkettige Substanzen
- Die Vernetzungsreaktion bestimmt den Zeitbedarf bei der Produktion.
- Umformen und Schweißen sind nicht möglich
- Die vernetzte Struktur erschwert das Recycling.
 - Verwendung als Füllstoff für andere Produkte
 - Verbrennung

ZSD von Elastomeren



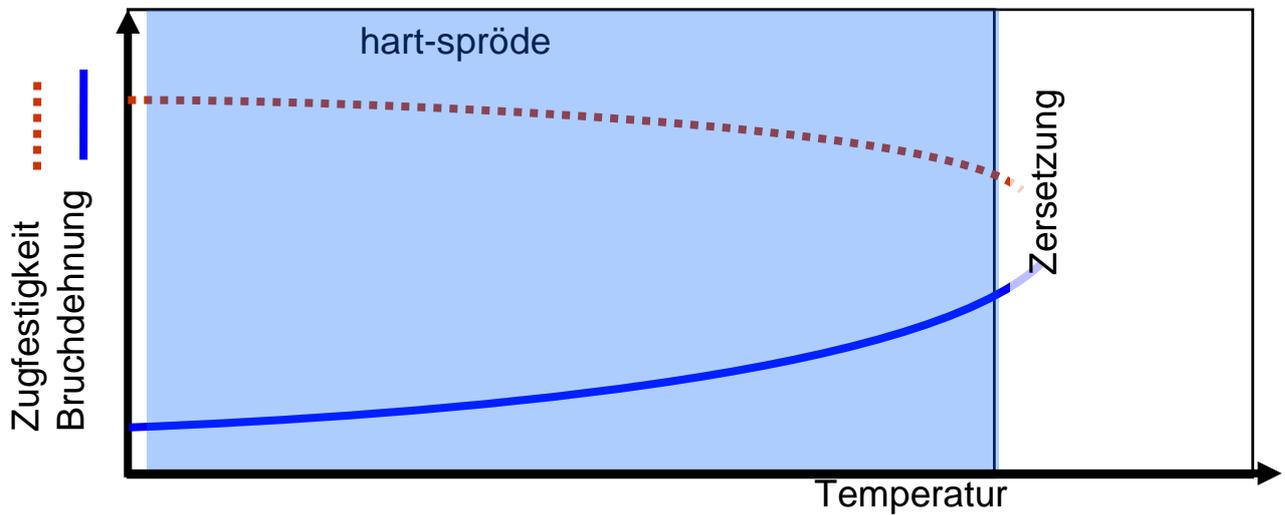
Zustandsform	Glasartig, fest, hart bis zähelastisch	gummielastisch	Zersetzung
Molekulare Struktur	Weitmaschig vernetzte Makromoleküle		Molekularer Abbau
Verarbeitung	in diesem Bereich nicht üblich	Spanendes und spanloses Trennen, lösbares und unlösbares Fügen, Oberflächenveredelung	

Abb. 90: ZSD von Elastomeren

10.2.4 Duroplaste:

- Zustandsbereiche
 - hart
- Duroplaste werden bei der Herstellung vernetzt.
- Umformen ist nicht möglich

ZSD von Duroplasten

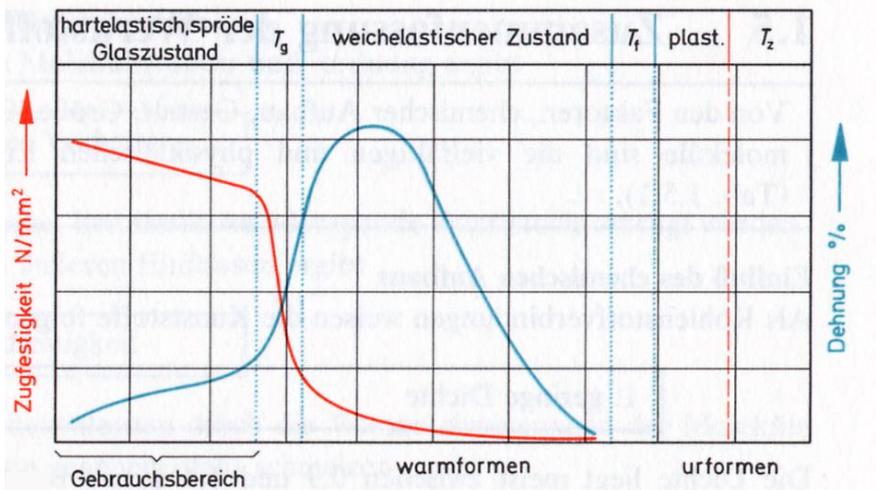


Zustandsform	fest, glasartig spröde	Zersetzung
Molekulare Struktur	vernetzte Makromoleküle	Molekularer Abbau
Verarbeitung	spanendes und spanloses Trennen, lösbares und unlösbares Fügen Oberflächenveredelung	

Abb. 91: ZSD von Duroplasten

10.2.5 Wiederholung von Kap 10 (aus Franck/Biederbeck, s. Literaturangaben)

Charakteristische Zustandsdiagramme der vier chemisch einheitlichen Kunststoffgruppen



a) Amorphe Thermoplaste

Die Zugfestigkeit ist unterhalb des Erweichungsbereichs relativ hoch und nimmt mit steigender Temperatur allmählich ab. Bei T_g aber fällt sie durch plötzlich einsetzende Molekülbeweglichkeit stark ab. Die Bruchdehnung ist im Glaszustand gering, sie nimmt bei T_g rasch zu und sinkt im weichelastischen Zustand nach Durchlaufen eines Maximums durch den wachsenden Anteil an plastischem Fließen ab.

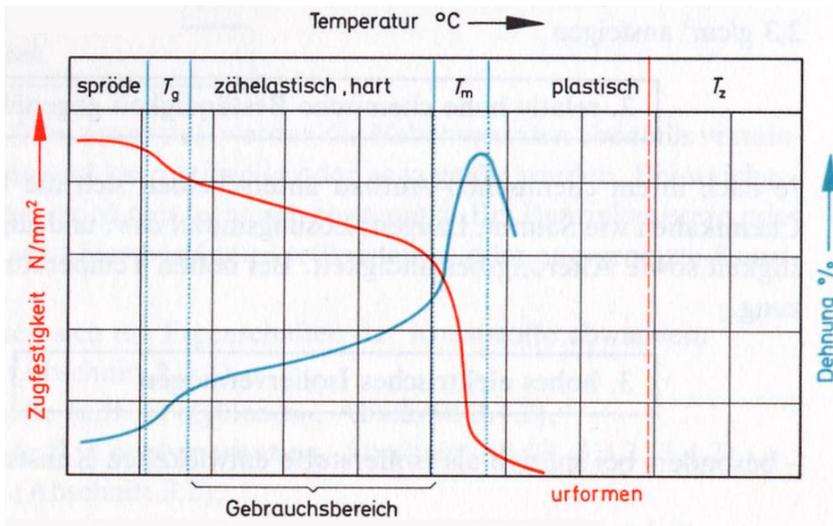
Der Gebrauchsbereich liegt unterhalb der T_g .

T_g , Glastemperatur

T_f Fließtemperatur

T_m Kristallitschmelztemperatur

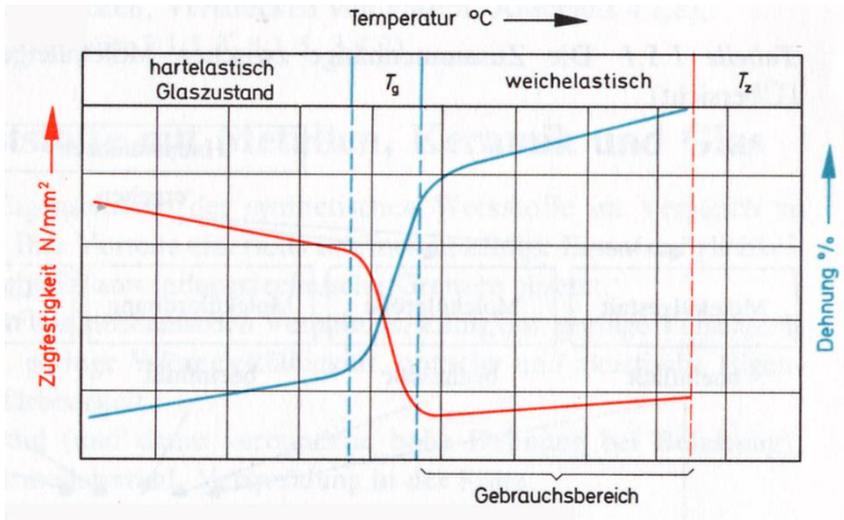
T_z Zersetzungstemperatur



b) Teilkristalline Thermoplaste

Bei T_g tauen nur die amorphen Bereiche auf, was eine geringe Unstetigkeit (Dispersion) im Verlauf der Zug- und Dehnungskurven zur Folge hat. Oberhalb der T_g ist das Material durch den Molekülzusammenhalt in den Kristalliten fest und formsteif, durch die als «Gelenke» wirkenden amorphen Bereiche aber zugleich flexibel und zäh. Erst im Schmelzbereich der Kristallite nimmt die mechanische Festigkeit sprunghaft ab und die Verformbarkeit zu.

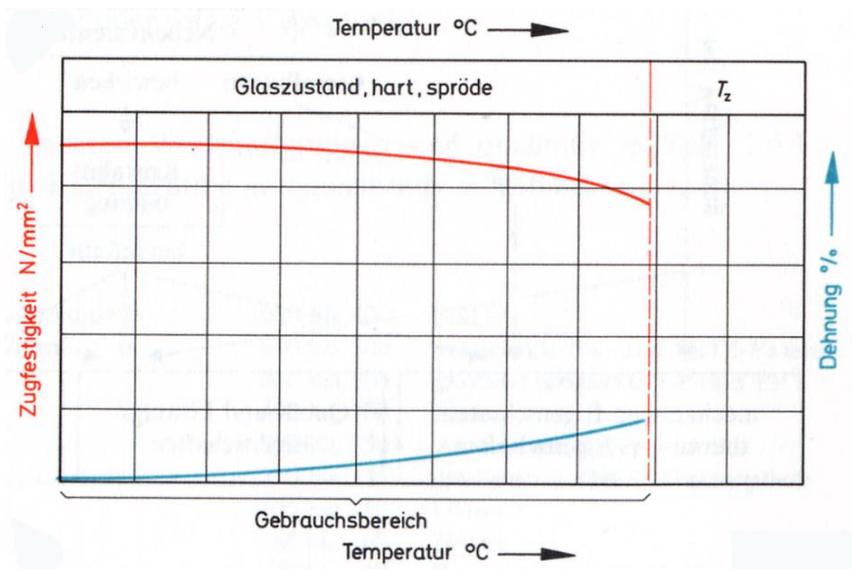
Der Gebrauchsbereich liegt zwischen T_g und T_m .



c) Elastomere

Die weit vernetzten und amorphen Elastomere befinden sich wie die amorphen Thermoplaste unterhalb der T_g im Glaszustand. Sie sind dann hart und spröde. Bei T_g , erfolgt unter sprunghaftem Ansteigen der Dehnbarkeit und Abnahme der Zugfestigkeit der Übergang zum gummielastischen Zustand. Im Unterschied zu den amorphen Thermoplasten steigt im elastischen Zustand die Dehnbarkeit mit der Temperatur an, da das Abgleiten der Moleküle durch die Quervernetzungen verhindert wird.

Der Gebrauchsbereich der Elastomere liegt oberhalb T_g .



d) Duroplaste

Bei den (ausgehärteten) Duroplasten treten mit der Temperaturerhöhung keine sprunghaften Eigenschaftsveränderungen auf. Ursache ist die allseitige Verknüpfung durch Hauptvalenzbindungen.

Die temperaturabhängigen Nebervalenzbindungen spielen hier eine sehr untergeordnete Rolle. Erst mit dem Aufreißen der Hauptvalenzbindungen bei T_z , bricht die mechanische Festigkeit zusammen.

11. Mechanisches Verhalten: Werkstoffmodelle

- Inhalt:
- Druck, Temperatur \Leftrightarrow Dichte, Volumen
- Werkstoffmodelle

11.1 V-T-Diagramm

Dichte - Spezifisches Volumen:

- **Partialvolumen** \Leftrightarrow Schwingungsausdehnungsvolumen der Kettenmoleküle ändert sich über den gesamten Temperaturbereich

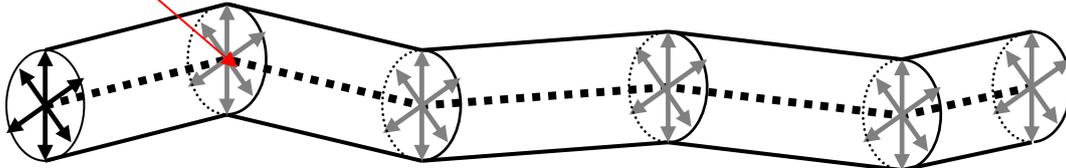


Abb. 92: Partialvolumen (schematisch)

- **Leerstellenvolumen** \Leftrightarrow Freies Volumen zwischen den Kettenmolekülen (durch Baufehler wie Kettenenden, Faltungen, Verharkungen,); ändert sich nur bei Thermoplasten und oberhalb von T_{FT} und T_{ET}

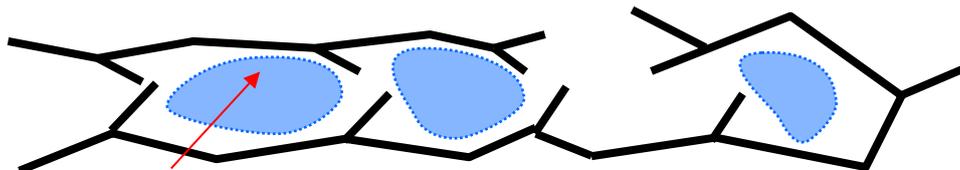


Abb. 93: Leerstellenvolumen (schematisch)

Diagramme zur Abhängigkeit des Volumens von p und T \rightarrow s. nächste Seite

V-T-Diagramm:

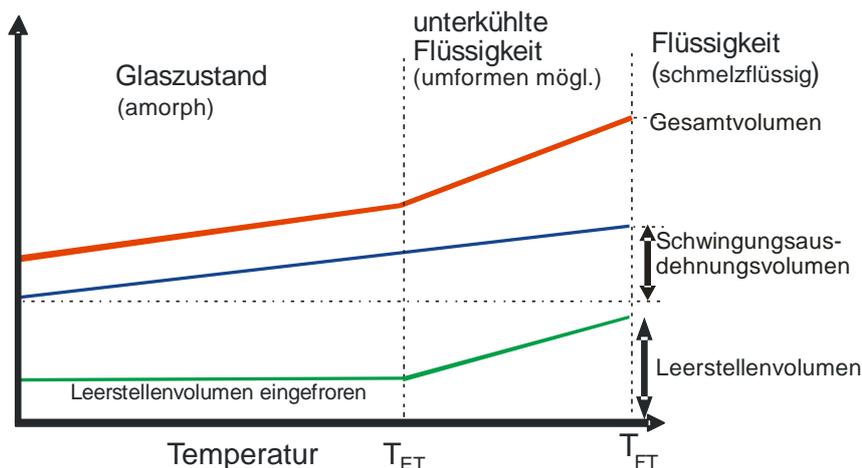


Abb. 94: $V = f(T) \rightarrow$ Wärme-Volumen-Ausdehnungsmodell für Thermoplaste

Das Eigenvolumen (auch Partial- oder Schwingungsausdehnungsvolumen) der Kettenmoleküle ändert sich über den gesamten T-Bereich (Mikro-Brownsche Bewegung)

\rightarrow Kurve.

Das Leerstellenvolumen („freies Volumen“ zwischen den Ketten) ist unterhalb von T_{ET} eingefroren. Es ändert sich erst ab T_{ET} , d.h. im thermoplastischen Zustand, da erst dort die Ketten ihre relative Lage verändern können (Makro-Brownsche Bewegung) → Kurve

Die Gesamtausdehnung als $f(T)$ → Kurve, ergibt sich als Überlagerung (Addition) der T-Abhängigkeit beider Volumina.

11.2 p-V-T-Diagramm

Bedeutung der p-V-T-Diagramme:

Kunststoffschmelzen sind kompressibel → $V, \rho = f(p)$. Bei zunehmendem Druck reduziert sich V_{sp} und T_{ET} nimmt zu. Deshalb kommt es bei der Fertigung ($p \uparrow, T \uparrow$) und dem nachfolgenden Entspannen und Abkühlen zu Maßänderungen, die mit Hilfe der p-V-T-Diagramme vorausgesagt werden können.

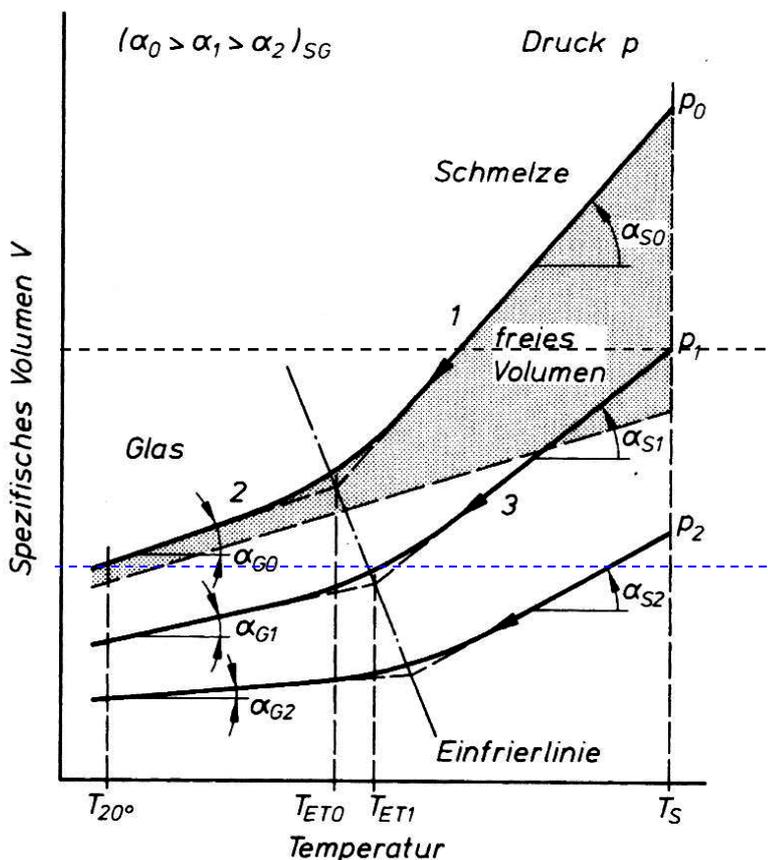


Abb. 95: p-V-T-Diagramm eines amorphen Thermoplasten

$$\rightarrow V = f(T, p) \\ (p_2 > p_1 > p_0)$$

Durch die p-Erhöhung beim Verarbeiten (p bis 2500 bar) kommt es zur Kompression der Schmelze; gleichzeitig führt die erhöhte T zur Vergrößerung des Volumens, s. Abb. 94 + 95.

Die p-V-T-Diagramme erlauben eine Voraussage der genauen Abmessungen der Produkte trotz p- und T-Änderung während des Herstellungsprozesses, denn:

- Die Differenz zwischen dem spezifischen Volumen zum **Siegelzeitpunkt** und dem spezifischen Volumen bei Raum-T gibt im p-V-T-Diagramm die Volumenschwindung wieder („heiße Seele“ → s. Probe).
- Teilkristalline Thermoplaste haben eine größere Schwindung als amorphe.

Auch die Abkühl-v ist von praktischer Bedeutung: $v_{Abk} \uparrow \rightarrow$ freies $V \uparrow \rightarrow$ Zähigkeit \uparrow , Durchlässigkeit \uparrow .

Nähere Erläuterungen zu obigem Sachverhalt:

Der Einspritzdruck beim Spritzgießen beträgt bis zu 2500 bar. Dadurch würde die Luft im Werkzeug auf der dem Anspritzkanal abgewandten Seite (z.B. der Spitze des Brieföffners) extrem komprimiert und dadurch so heiß, dass der Kunststoff verbrennen würde. Deshalb ist im Werkzeug dort ein Spalt von $s < 5 \mu\text{m}$ eingearbeitet, durch den die Luft (aber nicht der Kunststoff) entweichen kann.

Der maximale Einspritzdruck wird aber nur so lange aufrechterhalten, bis die Form gefüllt ist. Dann kühlt der Kunststoff ab, wodurch das Volumen der Schmelze verringert wird (Schwindung). Damit das Produkt keine Kavitäten (im Volumen) und keine Einfälle (der Flächen) zeigt \rightarrow s. PP-Zug-Proben ($t_{\text{Nachdruck}}$ zu kurz), muss, [solange der Werkstoff (zäh-)flüssig ist] nachgedrückt (nachgespeist) werden (einige s). Beim Nachdrücken beträgt der Druck ca. 40 % bis 90 % des maximalen Einspritzdrucks.

p_1 und p_2 in Abb. 92 stellen die Höhe des Druckes beim **Nachdruck** dar!
 p_0 ist der normale Umgebungsdruck.

Wie wird die Schwindung ermittelt? (s. Abb. 92):

Betrag der Nachdruck p_1 , so vermindert sich der Druck der heißen Schmelze beim Abkühlen durch Zusammenziehen (Luftballon). Wird die Form geöffnet, beträgt der Druck p_0 . Die Differenz zwischen p_1 und p_0 , die man auf der Ordinate ablesen kann (rote Linie), entspricht der Schwindung.

Je größer der Druck, umso mehr Werkstoff wird in die Form gedrückt, so dass die mögliche Schwindung sich verringert s. blaue Linie in Abb. 91 \rightarrow Schwindung bei p_2 . Wird der Druck zu groß, kann das Werkzeug aufgehen und in den Spalt fließt Kunststoff \rightarrow „Fischhäute“, s. Probe.

\rightarrow Schwindung $_{\downarrow}$ bei p^{\uparrow} aber Werkzeugbelastung $^{\uparrow}$

„**Siegelzeitpunkt**“: wenn nach dem Spritzvorgang die T so weit gesunken ist dass der **Angußpunkt** (s. auch Flaschen) an der Grenze Anspritzstutzen/Produkt fest geworden ist \rightarrow es kann keine weitere Schmelze ins Werkzeug gedrückt werden.

11.3 Werkstoffmodelle

Kunststoffe werden fast immer unter Auftreten einer schmelzflüssigen Phase hergestellt und verarbeitet. Bei der Betrachtung des Fließverhaltens dieser Schmelze ist vor allem die Abhängigkeit von Spannungen und Deformationen von Interesse. Es wird grundsätzlich zwischen zwei Deformationsarten unterschieden: **Scherdeformation** und **Dehndeformation**.

Eine wichtige Eigenschaft von Polymerschmelzen ist ihre Fähigkeit, Spannungen zeitlich verzögert abzubauen, (was sich deutlich in verschiedenen Bereichen der Verarbeitung bemerkbar macht, sobald die Schmelze eine instationäre Deformation erfährt.) Man nennt dieses Verhalten **Viskoelastizität**, da die Eigenschaften der Polymerschmelzen zwischen denen eines rein viskosen Fluids und denen eines elastischen Festkörpers liegen, d.h. Anteile von beiden enthalten.

Das Werkstoffverhalten bei Beanspruchung kann phänomenologisch durch **4 Grund-Werkstoffmodelle** veranschaulicht werden:

11.3.1 ideal elastischer Stoff (Hookescher Körper)

a) Symbol:

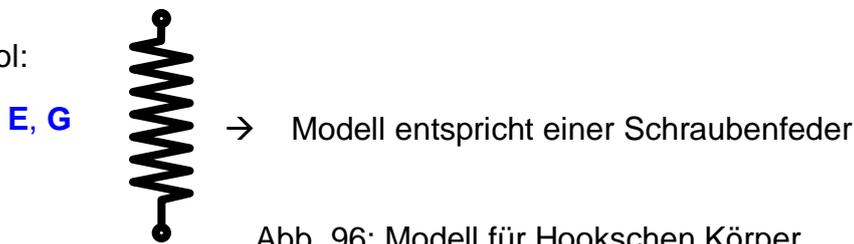


Abb. 96: Modell für Hookeschen Körper

b) Stoffwerte (die den Stoff beschreiben):

- Zugbeanspruchung: Elastizitätsmodul (E)
- Schubbeanspruchung: Schubmodul (G)

c) beschreibende Gleichungen:

- Zugbeanspruchung: mit $\sigma = \text{Zugspannung [N/mm}^2\text{]}$
(Hookesches Gesetz) $\varepsilon = \text{Dehnung [\%]}$
- Schubbeanspruchung: mit $\tau = \text{Schubspannung [N/mm}^2\text{]}$
 $\gamma = \text{Schiebung (Scherung) [\%]}$

Beispiele für **1)**: Stahl, Kunststoffe unter ET bei geringsten Dehnungen

d) Werkstoffreaktion (d.h. Verformung) bei Vorgabe einer Spannung

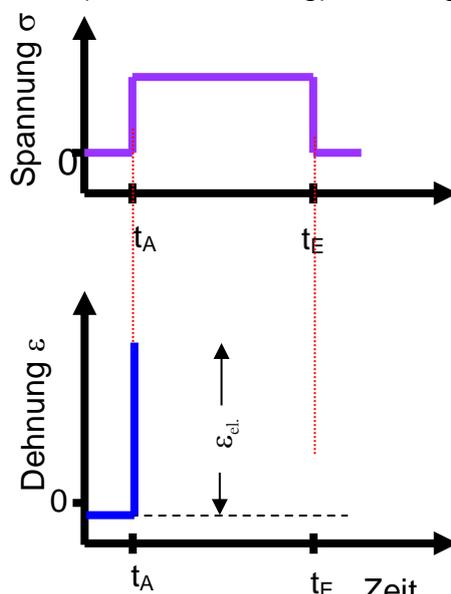
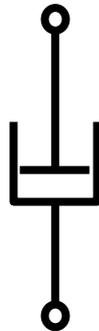


Abb. 97: σ -t-Verlauf für Hookeschen Körper

Der ideal-elastische Stoff verformt sich bei Belastung (t_A) spontan; unter Belastung (t_A bis t_E) behält er seine Verformung $\epsilon_{el.} = \frac{\sigma}{E}$ bei \rightarrow die Verformung ist $f(\sigma, E)$; beim Entlasten (t_E) geht die eingebrachte Verformung schlagartig zurück. Der ideal-elastische Stoff ist nur unter Spannung verformt \rightarrow Feder.

11.3.2 ideal viskoser Stoff (Newtonsche Flüssigkeit)

a) Symbol:



\rightarrow Modell entspricht einem Stoßdämpfer

Abb. 98: Modell für Newtonschen Körper

b) Stoffwerte (die den Stoff beschreiben):

- Zugbeanspruchung: Dehnaviskosität: (μ)
- Schubbeanspruchung: Scherviskosität (η)

c) beschreibende Gleichungen:

- Zugbeanspruchung: mit $\dot{\epsilon}$ = Dehngeschwindigkeit = $\frac{d\epsilon}{dt}$

- Schubbeanspruchung: mit $\dot{\gamma}$ = Schergeschwindigkeit = $\frac{d\gamma}{dt}$

(Newtonsches Fließgesetz)

Beispiele für **2**): Öl, Luft, Wasser, Metallschmelzen d) Werkstoffreaktion (Verformung) bei Vorgabe einer Spannung

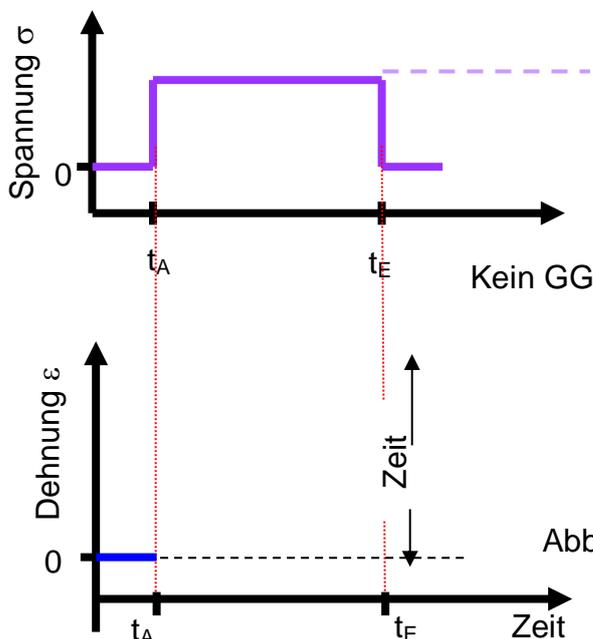


Abb. 99: σ - t -Verlauf für Newtonschen Körper

Der ideal-viskose Stoff beginnt bei Belastung (t_A) zu fließen; und fließt unter Belastung (t_A bis t_E) weiter; beim Entlasten (t_E) bleibt die viskose Verformung erhalten.
 Unter Belastung verformt sich dieser Stoff ständig; wird er entlastet, bleibt er verformt (ähnlich wie Stahl oberhalb der Streckgrenze).

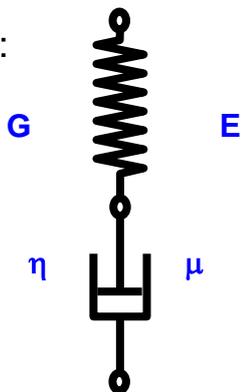
Die Steigung $\dot{\varepsilon}$ des Verformungsverlaufs $\varepsilon = f(t)$ ist konstant, da μ und σ konstant sind und

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\mu}$$

Hilfe: Flüssigkeit muß durch engen Spalt fließen \rightarrow t nötig \rightarrow kein GG möglich (innerhalb der Grenzen des Stoßdämpfers) \rightarrow gestrichelte Linien

11.3.3 der visko-elastische Stoff (Maxwell-Körper)

a) Symbol:



Entspricht Kombination (Hintereinanderschaltung von **1**) und **2**)

Abb. 100: Modell für Maxwell Körper

b) Stoffwerte (die den Stoff beschreiben):

- Zugbeanspruchung: Dehnviskosität: (μ) + Elastizitäts-Modul (E)
- Schubbeanspruchung: Scherviskosität (η) + Schubmodul (G)

c) beschreibende Gleichungen:

- Zugbeanspruchung:

- Schubbeanspruchung:

Beispiele für **3**): Stahl (Kunststoffschmelzen)

d) Werkstoffreaktion bei Vorgabe einer Spannung

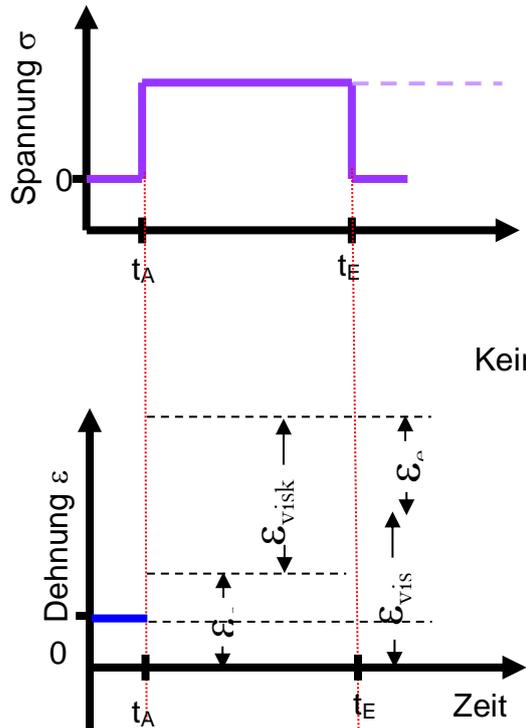


Abb. 101: σ - t -Verlauf für Maxwell Körper

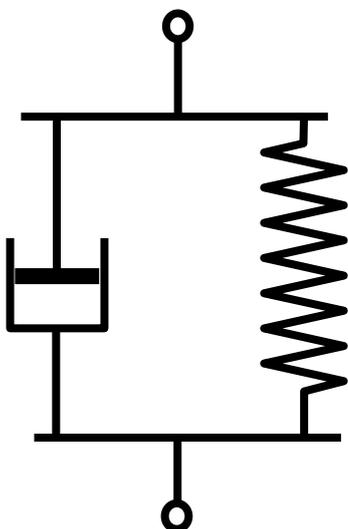
Bei Belastung (t_A) verformt sich die Feder elastisch; unter Belastung (t_A bis t_E) fließt der Stoßdämpfer ständig weiter; beim Entlasten (t_E) geht der spontan elastische Anteil ϵ_{el} direkt zurück, der viskose Anteil der Verformung ϵ_{visk} bleibt erhalten.

Der viskoso-elastische Stoff verformt sich unter Belastung ständig \rightarrow kein GG; Dabei addieren sich seine Verformungen:

Nach der Entlastung bleibt der viskose Anteil der Verformung übrig.

11.3.4 der elasto-viskose Stoff (Voigt-Körper)

a) Symbol:



Entspricht Kombination (Parallelschaltung) von **1)** und **2)**

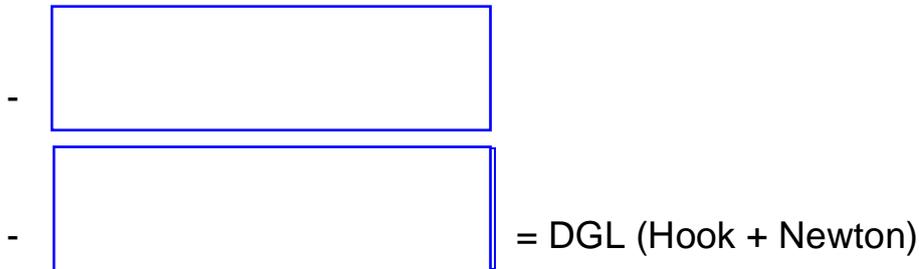
Abb. 102: Modell für Voigt Körper

b) Stoffwerte (die den Stoff beschreiben) → wie **3)**

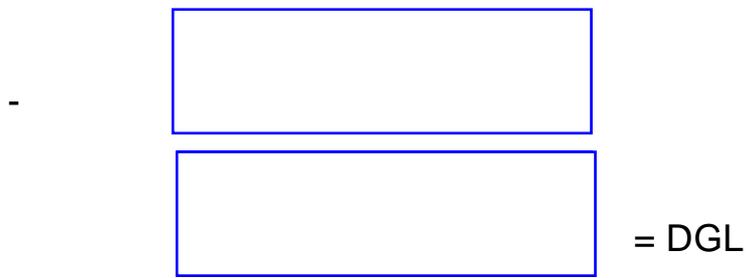
- Zugbeanspruchung: Dehnaviskosität: (μ) + Elastizitäts-Modul (E)
- Schubbeanspruchung: Scherviskosität (η) + Schubmodul (G)

c) beschreibende Gleichungen:

c1) Zugbeanspruchung:

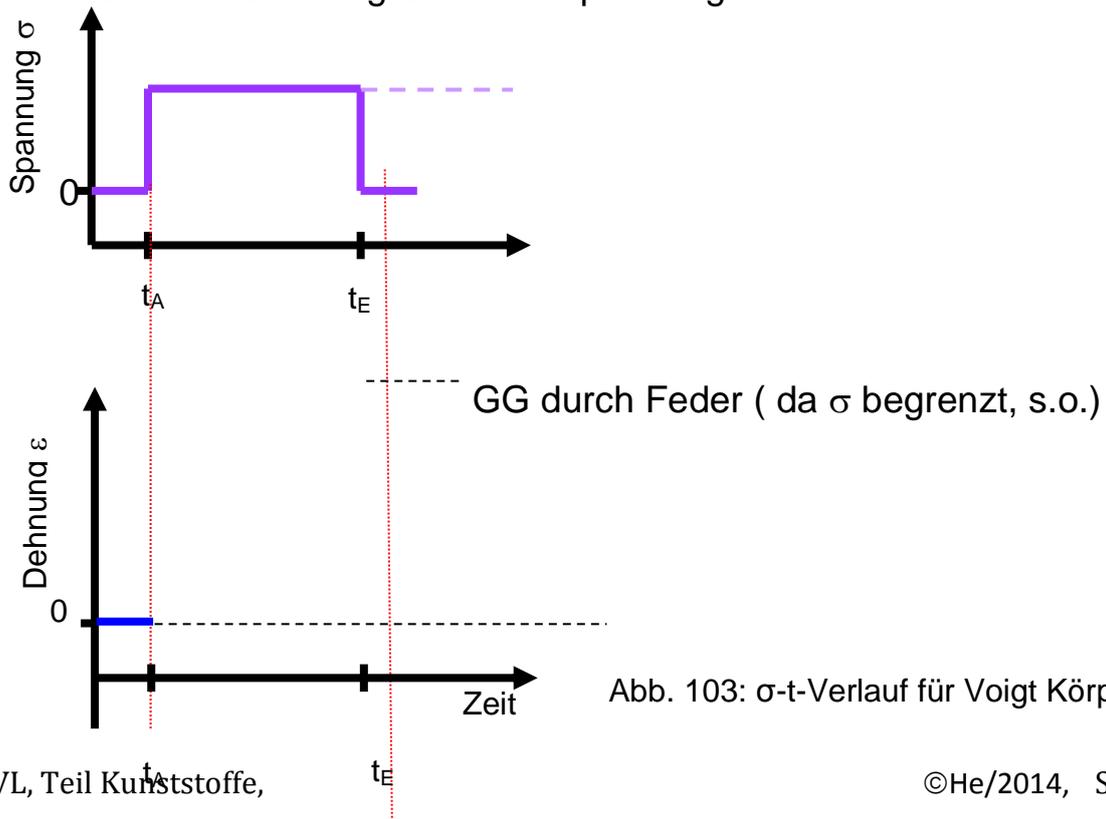


c2) Schubbeanspruchung:



Beispiele für **4)**: ideale Elastomere

d) Werkstoffreaktion bei Vorgabe einer Spannung



Bei Beginn der Belastung (t_A) beginnt der elasto-viskose Stoff sich zu verformen. (Eine spontane Aufweitung wie unter **3**) ist nicht möglich, da die Feder-
verformung durch den Stoßdämpfer verzögert wird); unter Belastung (t_A bis t_E)
verformt sich der Stoff so lange, bis ein GG-Zustand erreicht ist.

Dieser GG-Zustand wird durch die Eigenschaften der Feder bestimmt:

$$\boxed{\varepsilon_{ges} = \frac{\sigma}{E}} \rightarrow \text{der E-Modul der Feder bestimmt den elastischen Anteil}$$

→ elasto-viskos.

Beim Entlasten (t_E) geht die Verformung auf den Wert 0 zurück. Der Rückgang
der elastischen Verformung wird durch die viskosen Eigenschaften des Dämpfers
zeitlich verzögert → retardiert.

Retardation bedeutet: zeitlich verzögerter Rückgang von Verformungen

Relaxation bedeutet: zeitlich verzögerter Rückgang von Spannungen

Beim elasto-viskosen Stoff addieren sich die Spannungen → s. Formeln unter
c).

11.3.5 Grundmodell für das Verhalten aller Kunststoffe

a) Symbol:

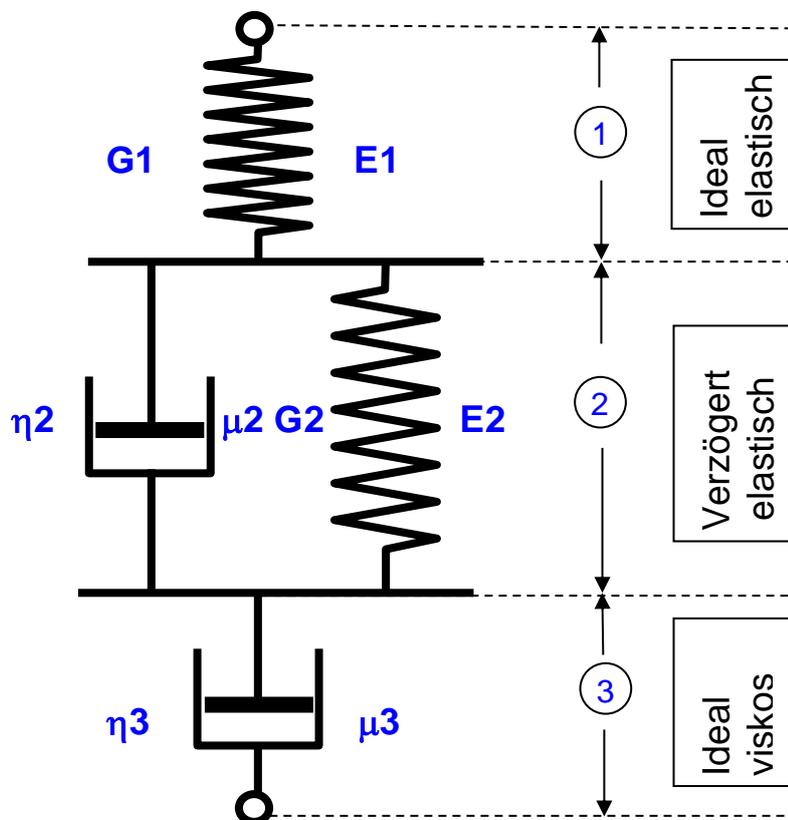


Abb. 104: Grundmodell für das Verhalten der Kunststoffe

b) Stoffwerte (die den Stoff beschreiben) → wie **3)**

- | | | | |
|-----------------------|---------------------|---------------------------|---|
| - Zugbeanspruchung: | Dehnaviskosität: | (μ_2 und μ_3) | + |
| | Elastizitäts-Module | (E_1 und E_2) | |
| - Schubbeanspruchung: | Scherviskosität | (η_2 und η_3) | + |
| | Schubmodule | (G_1 und G_2) | |

c) beschreibende Gleichungen:

c1) Zugbeanspruchung:

E_1, E_2, μ_2, μ_3

c2) Schubbeanspruchung:

G_1, G_2, η_2, η_3



4 Stoffwerte (2 Module, 2 Viskositäten)

→ den Unterschied zwischen **5)** und **4)** macht **3)**

Beispiele für **5)**: reale Kunststoffe

d) Werkstoffreaktion bei Vorgabe einer Spannung

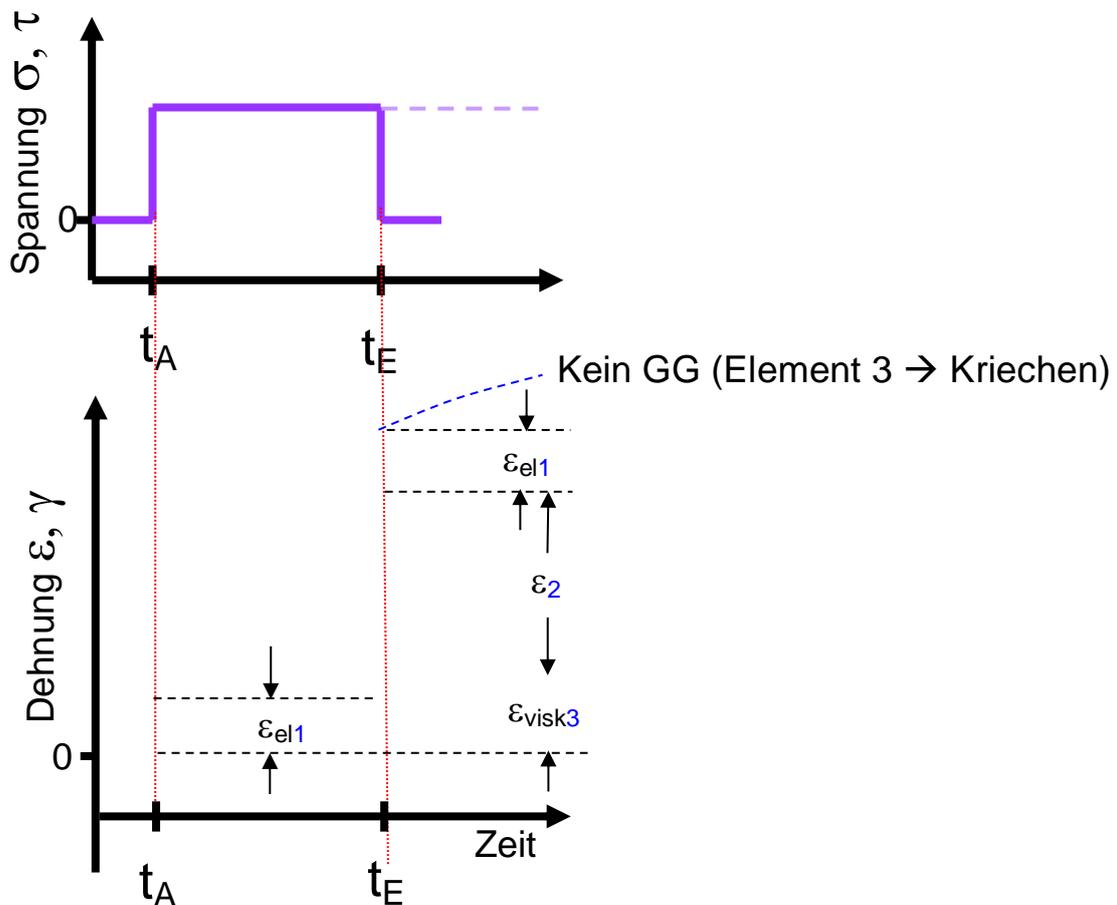


Abb. 105:
 σ - t -Verlauf (Grundmodell für Kunststoffe)

Das Werkstoffmodell für reale Kunststoffe zeigt spontan-elastische (1) $\rightarrow \epsilon_{el1}$, verzögert-elastische (d.h. retardierte) (2) $\rightarrow \epsilon_2$, und viskose (3) $\rightarrow \epsilon_{visk3}$ Deformation.

Bei Beginn der Belastung (t_A) dehnt sich die Feder (1) spontan.

Unter Belastung (t_A bis t_E) bestimmen die viskosen Anteile von (2) und (3) die Verformungsgeschwindigkeit. Es addieren sich die ideal-elastische, die verzögert-elastische und die ideal-viskose Verformung:

$$\epsilon_{ges} = \epsilon_{el1} + \epsilon_{el2} + \epsilon_{visk2+3} \quad \epsilon_{ges} = \epsilon_{el1} + \epsilon_2 + \epsilon_{visk3}$$

Beim Entlasten (t_E) geht die spontan-elastische Verformung direkt zurück. Der elastische Anteil von (2) (die Feder) zieht dann den viskosen Anteil (den Dämpfer) wieder zeitlich verzögert (retardiert) zurück. Übrig bleibt der viskose Anteil von (3).

Abhängig von Element (3) stellt sich unter Belastung kein GG ein \rightarrow Kriechen von Kunststoffprodukten, Ermüden von O-Ringen.

Berechnungen (z.B. Festigkeiten von Kunststoffbauteilen) können heute mit Rechenprogrammen, die auf obigem Modell basieren, durchgeführt werden.

Voraussetzung: Kenntnis der 4 Stoffwerte, s.o.

Dieses Modell ist sehr hilfreich bei der Erklärung von kunststoffspezifischen Eigenschaften wie Strangaufweitung (s.u.) oder Schmelzbruch. Es verdeutlicht auch sehr schön den Abbau von Spannungen (Relaxation) und Verformungen (Retardation) in Kunststoffprodukten.

11.4 Strangaufweitung

\rightarrow Beispiel für Anwendung des Modells 5

Beschreibung:

Das Modell 5 für reale Kunststoffe gilt auch für Kunststoffschmelzen. Die Schmelzen thermoplastischer Kunststoffe haben neben ihren viskosen Eigenschaften (Fließeigenschaften) auch elastische Komponenten, welche sich bei der Verarbeitung (z.B. Extrudieren, Spritzgießen, Hohlkörperblasen) bemerkbar machen. Die bekanntesten Erscheinungen sind die sog. Strangaufweitung S (s. Graphik) und der sog. Schmelzbruch.

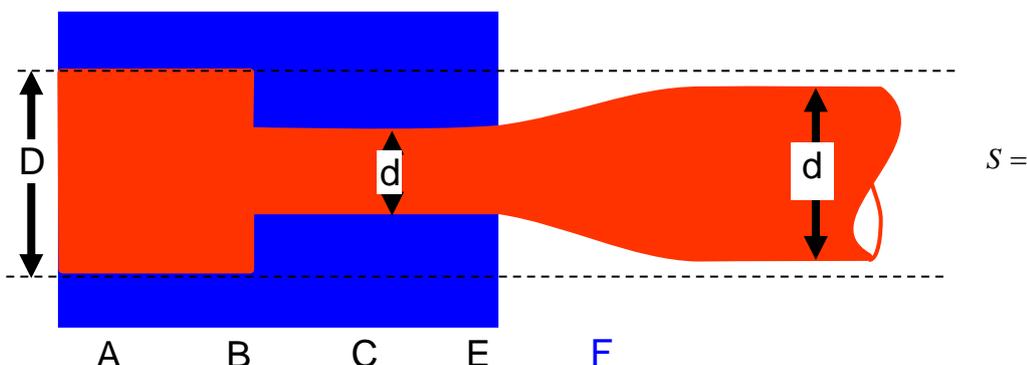


Abb. 106: Schematische Darstellung der Strangaufweitung

Erklärung:

- A - im Ausgangszustand (entspannt); Durchmesser = D
→ keines der 3 Elemente des Modells **5**, s.o., ist zusammengedrückt.
- B - Schmelze wird beim Übergang auf den kleineren Durchmesser d zusammengedrückt. Diese Stauchung kann nur durch die spontanelastische Deformation von Element  zustande kommen. Die Elemente  und  sind noch entspannt. Wenn die Düse unmittelbar nach der Engstelle B enden würde, käme es zu einem schlagartigen Rückgang der elastischen Deformation des Elementes , und der extrudierte Strang hätte den Durchmesser des Zufuhrkanals D (größtmögliche Strangaufweitung).
- C - Verformung der viskosen Elemente. Anteil der hartelastischen Verformung nimmt ab. Näheres: Die Schmelze bleibt gestaucht. Die Elemente  und  sind etwas zusammengedrückt worden. Um diesen Betrag hat sich das Element  entspannt. Endete die Düse an der Stelle C, dann würde sich die Strangaufweitung zusammensetzen aus den Elementen  und 
Die viskose Verformung des Elementes  bleibt erhalten, d.h. führt nicht zur Aufweitung des Stranges. Daraus folgt, dass die Strangaufweitung an der Stelle B am größten ist und mit der Länge der Düse abnimmt!
- E - Das für die Stelle C gesagte gilt prinzipiell auch für die Stelle E. Nur ist das Feder-element  noch weiter entspannt; entsprechend stärker zusammengedrückt sind die Elemente  und . Endete die Düse direkt hinter D, so ginge das Element  evtl. noch etwas auseinander und nur das Element  trüge überwiegend zur Strangaufweitung bei; d.h. die Strangaufweitung ist noch geringer als an der Stelle C.
- F - Nach Austritt aus der Düse weitet sich der Strang entsprechend der noch in Element  und  vorhandenen Feder-Rückstellkraft ( spontan,  verzögert) auf.

Aus obigen Betrachtungen folgt, daß eine geringere Strangaufweitung erreicht werden kann durch:

- Verlängerung der Düse (aber...)
- Vergrößerung des Düsendurchmessers D
- Querschnittsprung nicht abrupt
- Verringerung des Stoffdurchsatzes → Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit → längere Verweilzeit in der Düse (längere Möglichkeit zur Entspannung)
- Erhöhung der viskosen Anteile (Element ) durch
 - höhere Schmelztemperatur
 - niedrig-viskosen Kunststoff
- Erhöhung des Anteils an Zusatzstoffen (Füllstoffe, Glasfasern). Dadurch wird der elastische Anteil der Kunststoffschmelze verringert.

Schmelzebruch: Bei hohem Stoffdurchsatz und kurzer Düse kann es durch T-Inhomogenitäten in der Schmelze zum unregelmäßigen Aufspringen des Stranges nach Verlassen der Düse kommen. Im Modell ist die Ursache das

Element .

12. Rheologie

(Wissenschaft vom Verformungs- und Fließverhalten von Materie)

Die Kenntnis der Fließeigenschaften von polymeren Werkstoffen ist für den Bereich der Polymerverarbeitung von besonderer Bedeutung, da in nahezu allen Verarbeitungsverfahren der Werkstoff im schmelzflüssigen Zustand verarbeitet wird. Fließ- und Viskositätsfunktionen sind wichtige Grundlagen zur Ermittlung von Strömungs- und Spannungsverhältnissen in den Schmelze führenden Teilen von Kunststoffverarbeitungsmaschinen. Aufgrund des molekularen Aufbaus von Polymeren ergibt sich z. T. ein sehr komplexes Fließverhalten, dem sich ein eigener Wissenschaftszweig - die Rheologie - widmet.

Strömungsmodelle:

- Die Kenntnis der Eigenschaften von Kunststoffschmelzen ist wichtig für die Verarbeitung.
- Der makromolekulare Aufbau der Kunststoffe ergibt ein komplexes Fließverhalten.
- Dieses Fließverhalten unterscheidet sich vom Strömungsverhalten von Gasen, Wasser, Ölen oder Metallschmelzen!

12.1 Laminare Strömung

→ die Flüssigkeit bewegt sich in Schichten, die sich nicht vermischen. (keine Verwirbelungen, keine Turbulenzen, keine Querströmung zur Hauptströmungsrichtung → reine Schichtströmung, s. Abb. 104a).

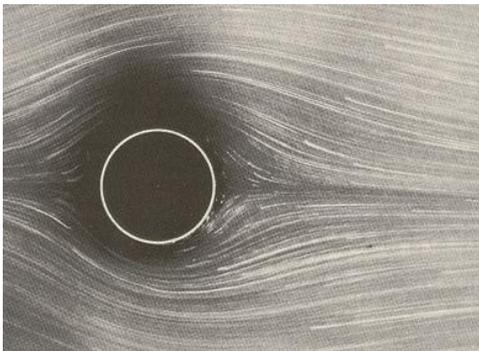


Abb. 107a: Laminare Strömung

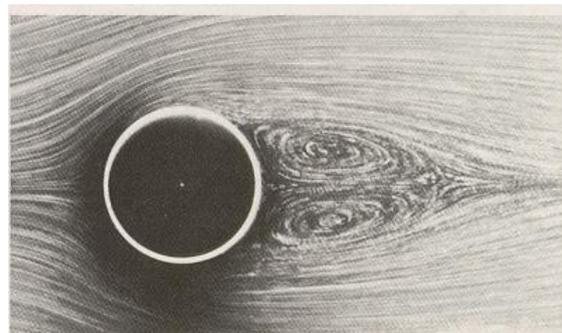
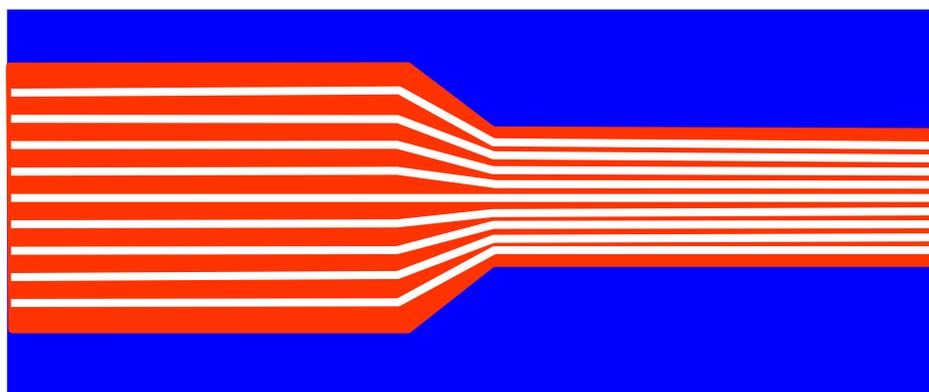


Abb. 104b: turbulente Strömung



Alle Größen im System sind zeitlich konstant

Abb. 108: schematische Darstellung der Abb. 104a

Bei der Herstellung von Kunststoffprodukten sind zwei Arten von Viskositäten wichtig, weil sie das Fließ- und Dehnverhalten bestimmen:

a) Scherviskosität η

b) Dehnviskosität μ

Scherviskosität: Erläuterung anhand des Zweiplattenmodells, s. nächste Abb.

Maßgeblich für die Art der Strömung ist die Reynolds-Zahl: $\mathbf{Re} = \frac{\mathbf{Trägheitskräfte}}{\mathbf{ViskoseKräfte}}$

Bei relativ dünnflüssigen Stoffen (geringe Viskosität) wie Luft oder Wasser ist $Re \gg 1$. Diese Stoffe zeigen ein Newtonsches Fließverhalten, s.u., d.h. die Trägheitskräfte überwiegen. Damit sind für das Fließen und die dabei entstehenden Druckverhältnisse Beschleunigungs- und Bremsvorgänge entscheidend. Das Druckniveau ist sehr niedrig, z.B. 3,5 bar in Wasserleitungen.

Bei Kunststoff-Schmelzen ist $Re \ll 1$, d.h.

- a) Die viskosen Kräfte sind um Zehnerpotenzen größer als die Trägheitskräfte.
- b) Bei Kunststoff-Schmelzen gibt es **keine** turbulenten Strömungen !!

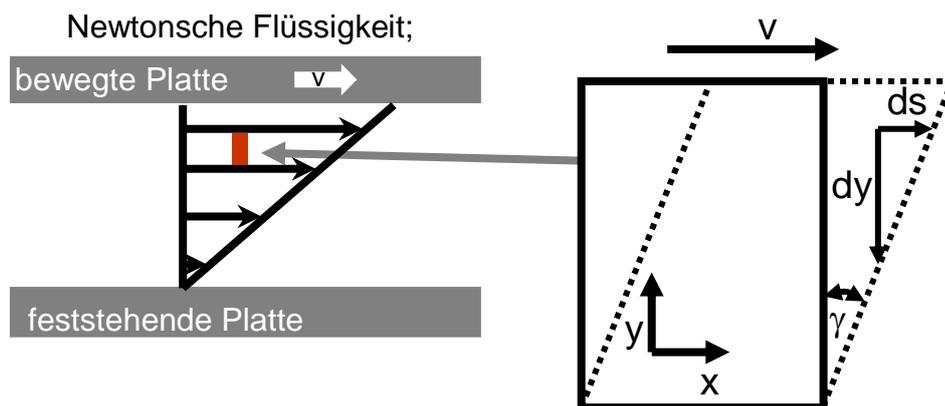
Damit werden

- a) Für Druckströmungen sehr hohe Drücke gebraucht, z.B. 100 bar, beim Spritzgießen bis 2700 bar.
- b) Beschleunigungs- und Bremsvorgänge spielen praktisch keine Rolle mehr

Kunststoffschmelzen haben ein „strukturviskoses“ Fließverhalten, d.h. die Scherviskosität η ist $f(T, \gamma)$ mit γ = Schergeschwindigkeit, s.u..

12.1.1 Laminares Scherfließen (Newtonsche Flüssigkeit):

Scherung tritt auf, da ein Teil der Schmelze an der Oberfläche der Schmelze führenden Kanäle haften bleibt \rightarrow 2-Platten-Modell



Die Scherspannung verformt den Quader mit der Schergeschwindigkeit:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{d}{dy} \left(\frac{ds}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{ds}{dy} \right) = \left(\frac{d\gamma}{dt} \right) = \dot{\gamma}$$

Abb. 109: 2-Plattenmodell

Schergeschwindigkeit:

- Die Schergeschwindigkeit ist das Verhältnis der Geschwindigkeitsdifferenz Δv zweier aneinander vorbei fließender Schichten zu deren Abstand Δy (senkrecht zur Strömungsrichtung)
- Sie drückt aus, wie schnell ein zwischen verschiedenen Schichten liegendes Teilchen seine Gestalt verändert, während sich die Schichten mit der Fließgeschwindigkeit fortbewegen.

Viskosität:

- Beim Newton'schen Fließen sind Scherspannung τ und Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ proportional



- Der Koeffizient η heißt Viskosität
- Die Viskosität wird mit Rheometern gemessen.
- Sie hängt u.a. ab von:
 - Dem molekularen Aufbau, der Temperatur, dem Gehalt an Füllstoffen, dem Vernetzungsgrad
 - Bei Polymerschmelzen auch von der Schergeschwindigkeit

12.2. Schergeschwindigkeit und Viskosität

12.2.1 Newtonsches Fließen:



Beim Newtonschen Fließen besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Schergeschwindigkeit und Schubspannung, s. Abb. 107 → Öl, Wasser

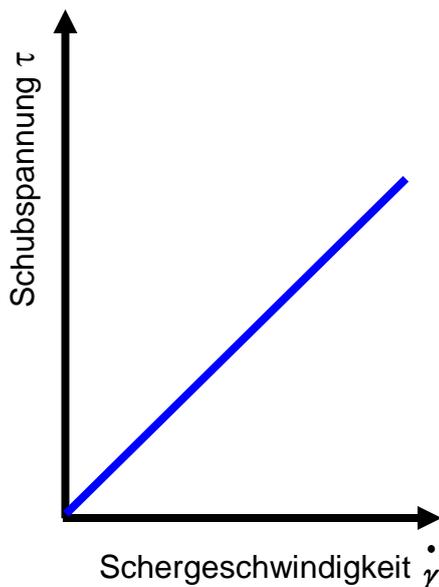


Abb. 110:

Schematische Darstellung von

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Schergeschwindigkeit und Schubspannung sind proportional \Leftrightarrow Viskosität (Steigung) ist konstant:

12.2.2 strukturviskoses Verhalten:

die Schubspannung nimmt langsamer zu als die Schergeschwindigkeit
→ bei den meisten Kunststoffschmelzen

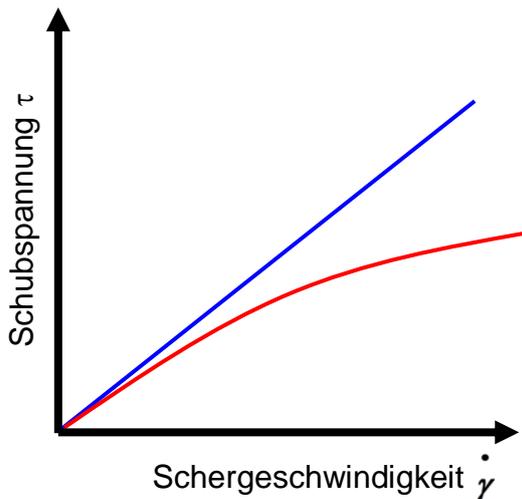


Abb. 111:

Schematische Darstellung von

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) * \dot{\gamma}$$

12.2.3 dilatantes Verhalten

→ die Schubspannung nimmt schneller zu als die Schergeschwindigkeit

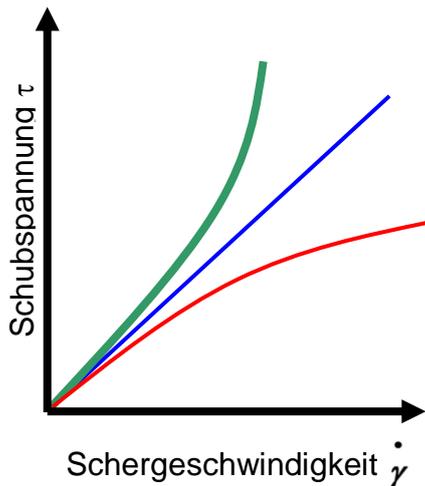


Abb. 112:

Schematische Darstellung von

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) * \dot{\gamma}$$

12.2.4 Bingham Körper

→ Stoffe die eine Fließgrenze haben nennt man Bingham Körper
(hochgefüllte Kunststoffschmelzen, Zahnpasta)

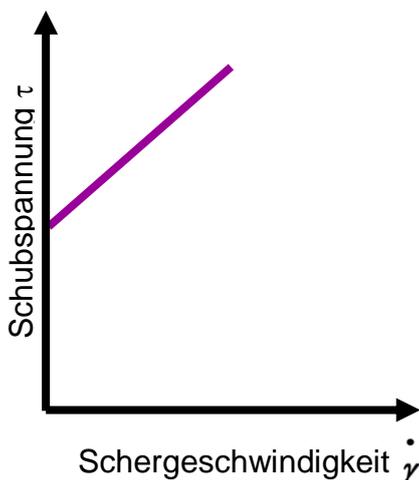
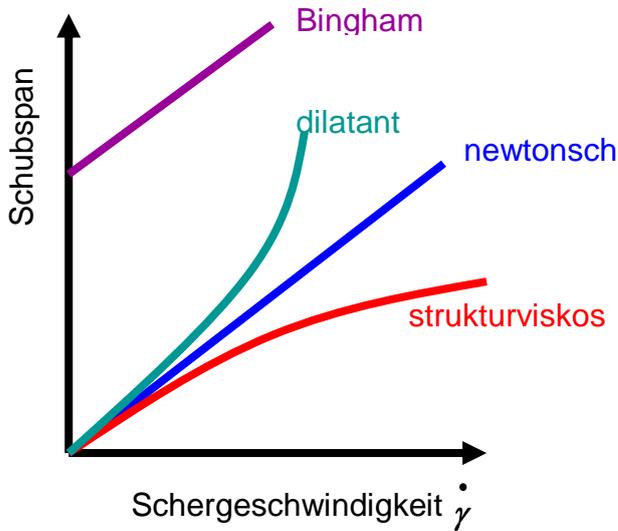


Abb. 113:

Fließkurve eines Bingham-Körpers → Fließspannung (ähnlich Streckgrenze bei Metallen)

12.2.5 Schergeschwindigkeit und Viskosität, etablierte Darstellungen:

Fließkurve:



$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Abb. 114:
Fließkurven verschiedener Flüssigkeiten (auch Kunststoffschmelzen)

Viskositätskurve:

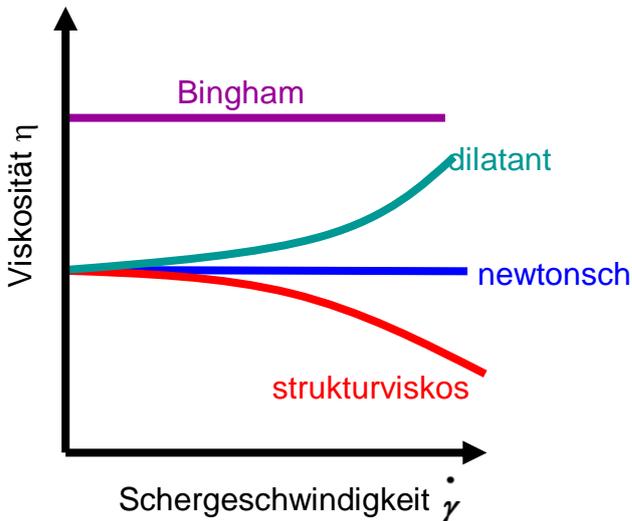


Abb. 115: $\eta = f(\dot{\gamma})$
Viskositätskurven verschiedener Flüssigkeiten (auch Kunststoffschmelzen)

Die gezeigten Fließ- und Viskositätsfunktionen sind Grundlage für die Berechnung von Strömungs- und Spannungsverhältnissen in den Schmelze führenden Teilen von Kunststoffverarbeitungsanlagen.

Die Beschreibung der Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit von der Viskosität ist näherungsweise mit verschiedenen mathematischen Modellen möglich, auf die hier nicht näher eingegangen wird → Potenzansatz nach Oswald, Carreau-Ansatz, s. Menges S. 90 ff..

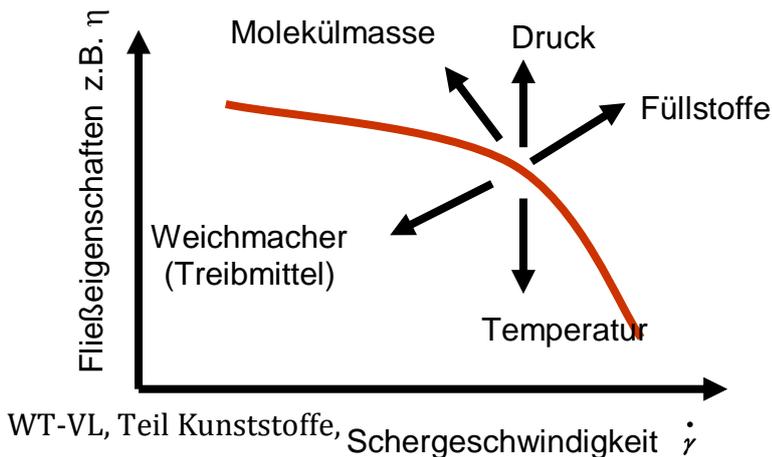


Abb. 116: Einflüsse auf das Fließverhalten von Polymerschmelzen

12.3 Viskositätsmessung

Kugelfallviskosimeter → Zeitmessung

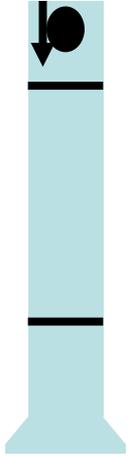


Abb. 117: Kugelfallviskosimeter (schem.)

Rotationsviskosimeter

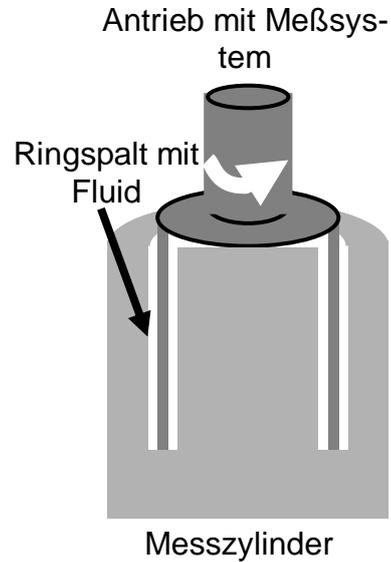
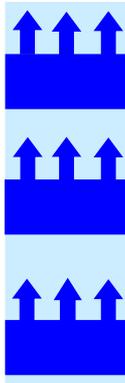
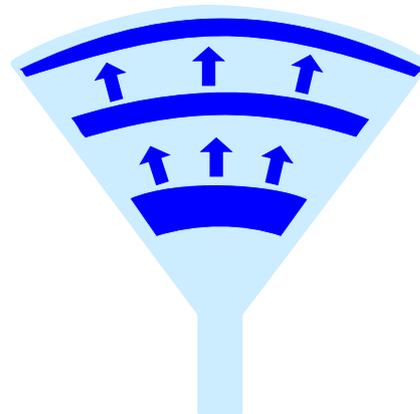


Abb. 118: Rotationsviskosimeter (schem.)

12.4 Fließeigenschaften von Kunststoffschmelzen



ideale Scherströmung
eindimensionaler Massefluss



Scherströmung + Dehnströmung zweidimensionaler Massefluss

Bsp. Viertelkreisscheibe

Abb. 119: Fließverhalten von Kunststoffschmelzen

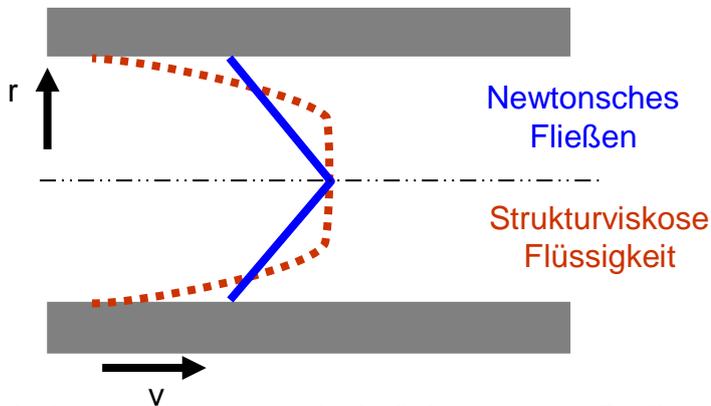


Abb. 120: Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit [v] vom Radius [r] einer Rohrströmung (ohne Randerstarrung) bei gleichem Volumenstrom

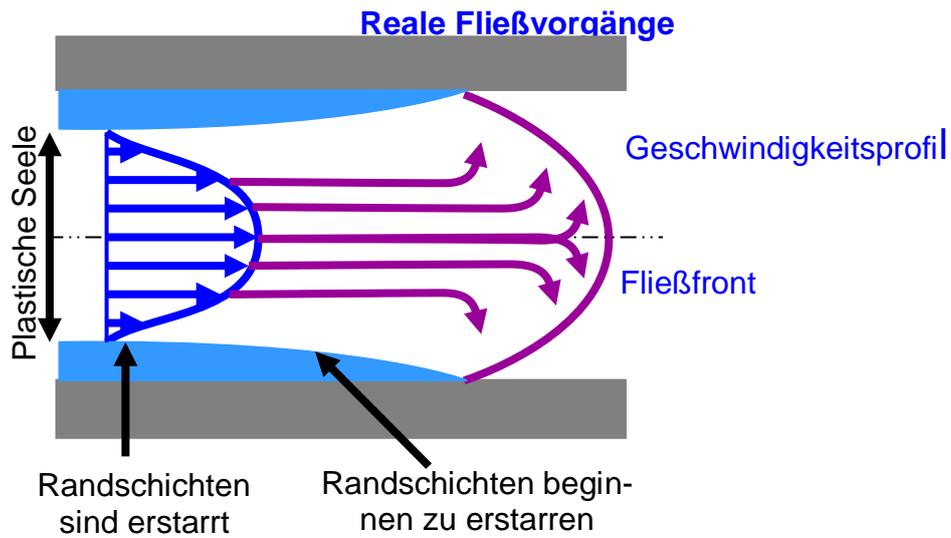


Abb. 121: Strömungsverlauf bei realen Fließvorgängen

12.5 Strukturviskosität bei Kunststoffschmelzen

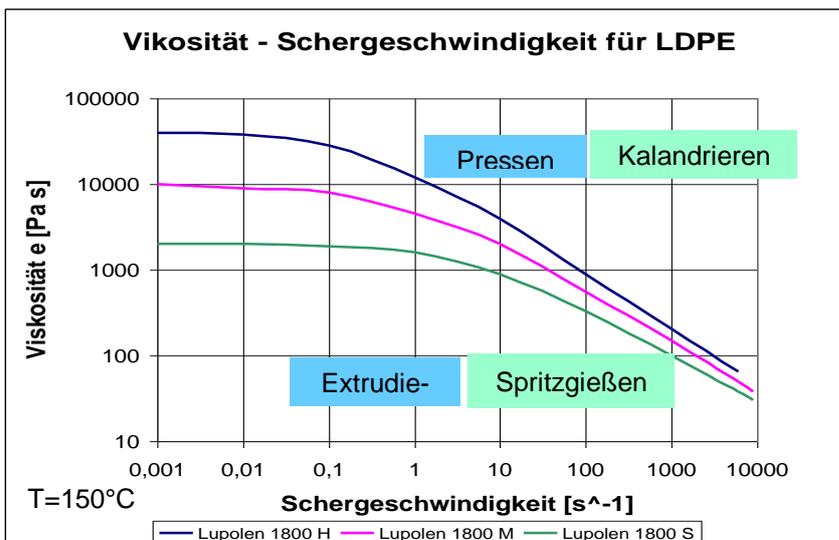


Abb. 122:

$$\eta = f(\dot{\gamma})$$

für LDPE

Schmelzindex (MFI) g/10min	
1,7	Abnehmende Molmasse
7	
20	

13. Verarbeitungsverfahren → s. auch Kunststoffkompendium

13.1 Übersicht

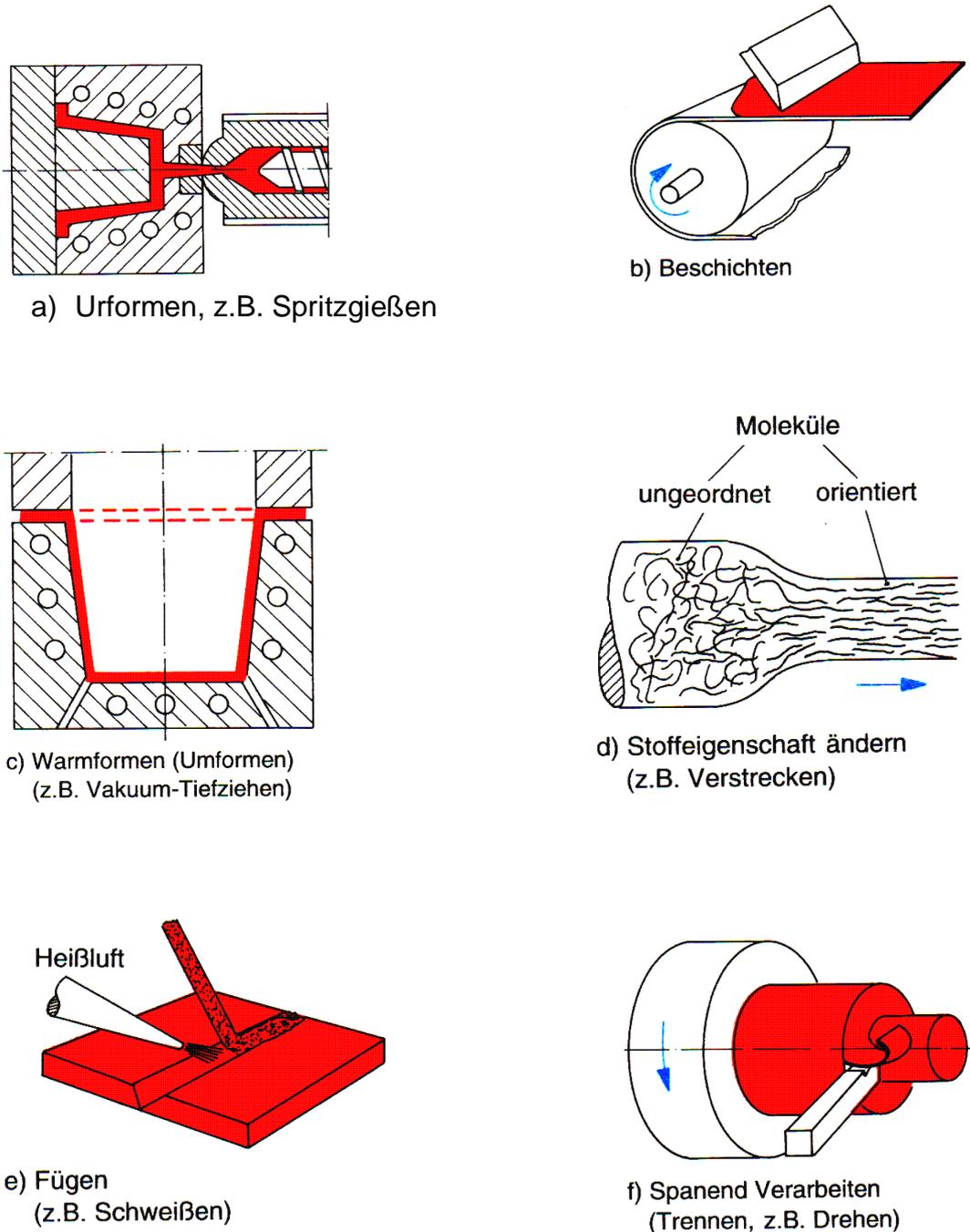


Abb. 124 Beispiele zu den wichtigsten Verfahren der Kunststoffverarbeitung:

13.2 Urfomen

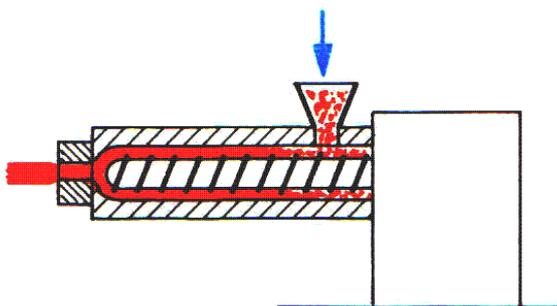
- ⇒ Die Verarbeitung (Formung) findet durch einen Fließprozess, d.h. im viskosen Schmelzzustand statt → die einzelnen Makromoleküle müssen beweglich sein; deshalb werden Duroplaste und Elastomere erst nach der Formgebung vernetzt.
- ⇒ Thermoplaste werden durch Abkühlen, Duroplaste und Elastomere durch chemische Vernetzung in der geformten Gestalt fixiert.

Temperaturbereiche und Schergeschwindigkeiten für das Urfomen

Teilkristalline Thermoplaste werden oberhalb der Schmelztemperatur T_m ihrer Kristallite urgeformt; amorphe Thermoplaste oberhalb der Fließtemperatur. Hohe Temperatur erniedrigt die Viskosität, deshalb überschreitet man bei unempfindlichen Thermoplasten die angegebenen Temperaturen oft erheblich. In den Tabellen und Bildern des Kapitels 3 (Kunststoffkompendium) sind die Temperaturen angegeben. Bei chemisch vernetzenden Kunststoffen (Elastomeren, Reaktionsharzen, Duroplasten) muß man genügend unterhalb der Starttemperatur für die Vernetzung bleiben, weil die Vernetzung erst im Formwerkzeug erfolgen darf. Viele Reaktionsharze lassen sich bei Raumtemperatur verarbeiten. Schergeschwindigkeiten in 1/s:

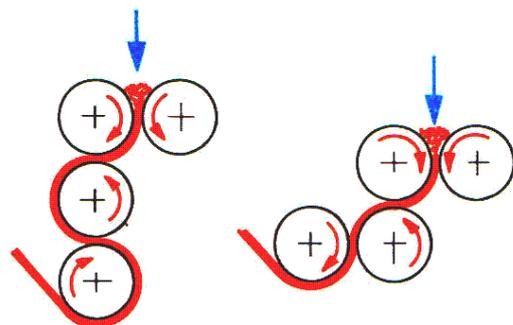
1 bis	10	Pressen
10 bis	100	Kalandrieren
100 bis	1000	Extrudieren
1000 bis	10000	Spritzgießen
10000 bis	100000	Schmelzspinnen

Urfomen – Fließprozesse:



Extrudieren

Thermoplastischer Kunststoff wird zwischen Schnecke und temperiertem Zylinder gefördert, aufgeschmolzen, homogenisiert, entgast, verdichtet und durch ein Werkzeug zu einem kontinuierlichen Strang geformt.



Kalandrieren

Aufgeschmolzener Kunststoff wird zwischen gegenläufigen Walzen mit hoher Präzision zu Folien und Platten geformt

Urfomen – Stückprozesse:



z.B. **Spritzgießen**

Form ist Füllwerkzeug, wird vor dem Einfüllvorgang geschlossen

Formpressen:

Form ist Arbeitswerkzeug / durch Schließbewegung formgebendes Werkzeug

Abb. 125: Prinzipdarstellung verschiedener Urform- Fließ- und Stück-Prozesse

13.2.1 Kalandrieren

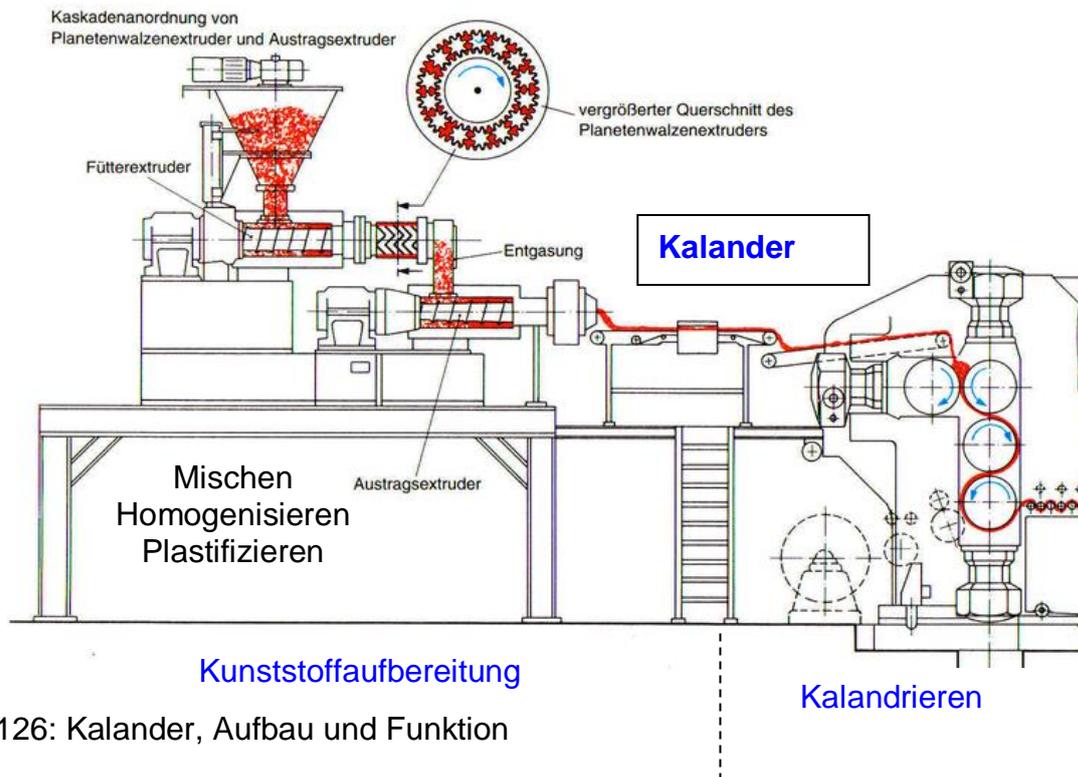


Abb. 126: Kalander, Aufbau und Funktion

Kunststoffe zum Kalandrieren:

- Alle Thermoplaste mit ausgeprägtem plastischen Bereich und ausreichend hoher Viskosität.
- In der Regel werden kalandriert
 - PVC mit und ohne Weichmacher
 - PVC Copolymere
 - Schlagzähes Polystyrol und ABS
 - Zelluloseester
 - Polyolefine

Bild 4.2.1 (Abb. 122): 4-Walzen-Kalander in F-Form. Die vorausgehende, kontinuierliche Kunststoffaufbereitung erfolgt bei dem hier gewählten Beispiel durch einen Planetenwalzenextruder (PWE), bei dem Planeten-Schnecken durch die angetriebene Zentralschnecke («Sonne») aus dem feststehenden Zylinder mit Schneckeninnenprofil abgewälzt werden. Das Bild zeigt die Seitenansicht und einen Querschnitt des PWE, der das Material über einen 1-Schnecken-Extruder zugeführt bekommt. Über einen Schacht, der zum Entgasen evakuiert werden kann, übergibt der PWE die Kunststoffschmelze an einen Austragsextruder. Alternativ kann zum kontinuierlichen Aufbereiten u.a. ein Doppelschneckenextruder oder (bes. beim unproblematischen PP) ein 1-Schnecken-Extruder mit Mischelementen verwendet werden. Über Transportbänder gelangt der Kunststoff vom Austragsextruder zum Kalander. Der oben liegende Aufgabewalzenspalt des F-förmigen Kalanders verhindert bei weichmacherhaltigen Mischungen, daß aufsteigende Weichmacherdämpfe die Folie schädigen. Die Walzen drehen sich immer gegenläufig zu den benachbarten Walzen, besitzen also im Walzenspalt die gleiche Umfangsrichtung und üben deshalb, wenn sie nicht auf Friktion eingestellt sind, nur eine geringe Scherung aus. Ein «Knet», der dem Walzenspalt einen Überschuß anbietet und dabei einen oder mehrere Wirbel ausbildet, ist ausschließlich beim Aufgabewalzenspalt erwünscht, bei den darunter liegenden Walzenspalten nicht mehr. Die Abzugsgeschwindigkeit wird von der ersten zur letzten Walze allmählich etwas gesteigert, der Walzenspalt verengt. Nachfolgeeinrichtungen sind Abzugswalzen, ferner die nicht mehr abgebildeten Kühlwalzen, Randbeschneidung und die Aufwickelrollen, die für den «fliegenden Wechsel», d.h. für den Austausch einer vollen gegen eine leere Rolle ohne Unterbrechung der kontinuierlichen Fertigung eingerichtet sind. Werkbild: Battenfeld, (D) Meinerzhagen

4.2.4 Kalandrieren

Das Kalandrieren ist gemäß Bild 4.2.1 ein kontinuierlicher Urformprozeß, bei dem der aufgeschmolzene Kunststoff in Walzenspalten zwischen gegenläufigen, über- und nebeneinander stehenden Walzen mit hoher Präzision zu Folien oder Platten geformt wird.

- .Amorphe, harte oder weiche Thermoplaste (PVC-U, PVC-P und Copolymere, S/B, ABS, PE-C, Celluloseester, PIB) im mittleren bis höheren Molmassenbereich sind besonders gut geeignet, da sie oberhalb der Fließtemperatur eine zäh-viskose Schmelze bilden, die nicht an den Walzen festklebt. Statt PVC ist als chlorfreie Alternative oft PP, manchmal auch PE geeignet. Durch hohe Molmasse kann man ein zu abruptes Aufschmelzen dieser teilkristallinen Thermoplaste verhindern und damit die Kalanderverarbeitung ermöglichen. Dünne, weichmacherfreie und damit dokumentenechte Folien gehen vorzugsweise in den Bürobedarf. Elektroisierfolien oder Möbelfurnierfolien sind weitere Anwendungen. Dickere Bahnen aus Weich-PVC oder Gummi dienen als Fußbodenbeläge. Übliche Walzenbreiten (Ballenlängen) liegen zwischen 1,2 bis 2,2 m, in Spezialkalandern bis zu 5,4 m. Die Walzendurchmesser liegen zwischen 400 und 700 mm, der Ausstoß beträgt bis zu 1500 kg/h, die Abzugsgeschwindigkeit bis 120 m/min.
- Thermoplastische Elastomere kann man prinzipiell auch kalandrieren. Stärker verbreitet ist das Kalandrieren von vernetzbaren *Kautschukmischungen*. Ein Verbund entsteht, wenn man eine Textilbahn in einen Walzenspalt einlaufen läßt und im Kalander mit Kautschukmischung belegt. Um die Haftung zu verbessern, wählt man die Umfangsgeschwindigkeit der von der Kautschukmischung umschlungenen Walze größer als die der Nachbarwalze mit der Textilbahn. So entsteht eine *Friktion*, die Kautschukmischung wird regelrecht in die Textilbahn eingearbeitet. Für Gürtel und Karkasse eines Stahlgürtelreifens werden die Stahlfasern direkt von den Rollen im Gatter parallel zum mittleren Walzenspalt des Kalanders geführt und dort beidseitig mit der Kautschukmischung belegt. Mit nur maßvoll temperierten Walzen werden die kalandrierten Bahnen im unvernetzten Zustand geformt und mit Zwischenfolien (die das Kaltverschweißen der Lagen verhindern) aufgewickelt. Es handelt sich

oft um Zwischenprodukte (etwa für den Autoreifen), die erst nach Zusammenbau unter Druck bei hoher Temperatur chemisch weitmaschig vernetzt (*vulkanisiert*) werden. Die Anordnung der Walzen wird nach ähnlich aussehenden Buchstaben benannt. Weichmacherhaltige Kunststoffe werden gemäß Bild 4.2.1 vorzugsweise mit einem Kalandrierer in F-Form verarbeitet. Der Rohstoff wird im oberen Walzenspalt aufgegeben und bildet dort einen rotierenden Wulst, dessen Strömungsverlauf einen zum Walzenspalt hin spitzwinkligen Knetwirbel bildet und oft noch mit ein bis zwei weiteren, kleineren Wirbeln verbunden ist. Bei den weiteren Walzen wird die Umfangsgeschwindigkeit etwas gesteigert, der Walzenspalt verengt. Diese Spalten sollen keinen Knet ausbilden, sondern ausschließlich die Exaktheit der Foliendicke und die Oberflächengüte verbessern.

Vom Knet aufsteigende Weichmacherdämpfe können nicht in darüber verlaufende Folien eindringen und deren Qualität beeinträchtigen. Der gleiche, ziemlich universelle Kalandrierer eignet sich auch für weichmacherfreie Thermoplaste. Wenn man jedoch nie mit Weichmachern zu tun hat, kann man zur Vereinfachung der Bedienung einen Kalandrierer in L-Form anwenden und den Rohstoff im untersten Walzenspalt aufgeben. Beim Kalandrieren entsteht eine Längsorientierung der Makromoleküle. Risse während des Gebrauchs entstehen also bevorzugt in Verarbeitungsrichtung («Kalandriereffekt»). Zugbelastungen sollte man möglichst in Verarbeitungsrichtung legen, nicht quer dazu.

13.2.2 Extrudieren/1:

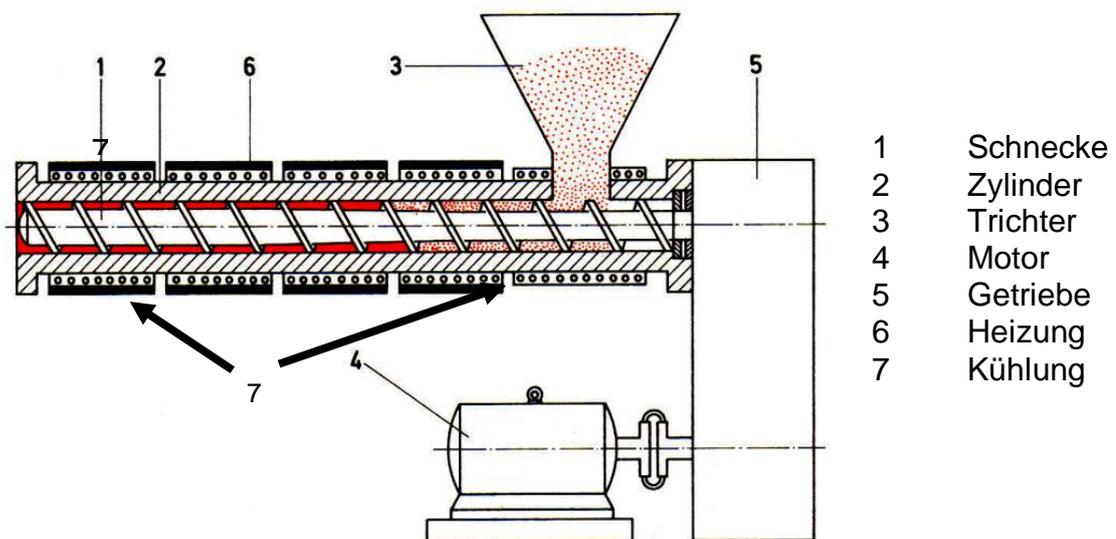


Abb. 127: Extruder, Aufbau

Kontinuierlicher [Urformprozess](#) für thermoplastische Kunststoffe
 Der Kunststoff wird gefördert, aufgeschmolzen, homogenisiert, entgast, verdichtet und durch ein Werkzeug (Düse) geformt.

Erläuterungstextaus: Schwarz/Ebeling Kunststoffverarbeitung 6 Auflage

5.3.1 Einschneckenextruder

Der Einschneckenextruder besteht aus einem **Antriebsmotor**, einem **Reduziergetriebe**, einem **Zylinder** mit der sich darin befindenden **Schnecke** und dem **Einfülltrichter** (Bild 5.2). Um den Zylinder sind mehrere Heizmanschetten (4 bis 6) gelegt, die — jede für sich — in der Höhe der gewünschten Temperatur über Temperaturregler einstell- und regelbar sind. Je

Heizzone ist meistens auch eine Kühleinrichtung installiert, damit die Temperaturen exakt geregelt werden können. Die Zone in unmittelbarer Nachbarschaft zum Trichter wird beim Betrieb des Extruders immer gekühlt, um ein Anschmelzen der Kunststoffmasse in der Zylinderöffnung oder am Schneckenkern zu verhindern.

Extrudieren/2

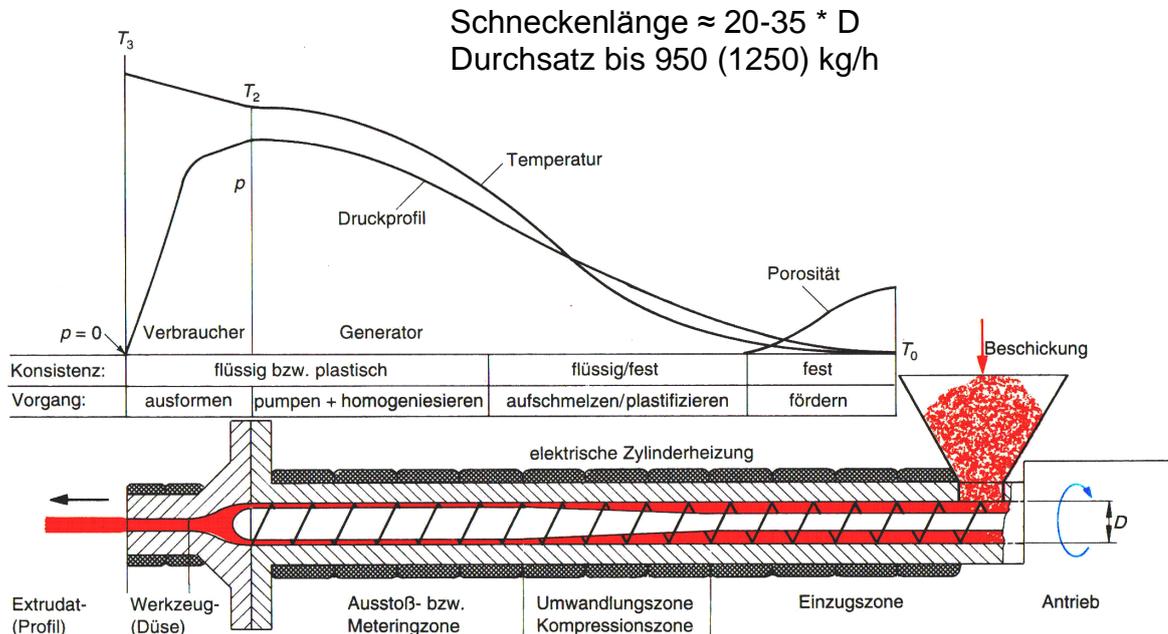


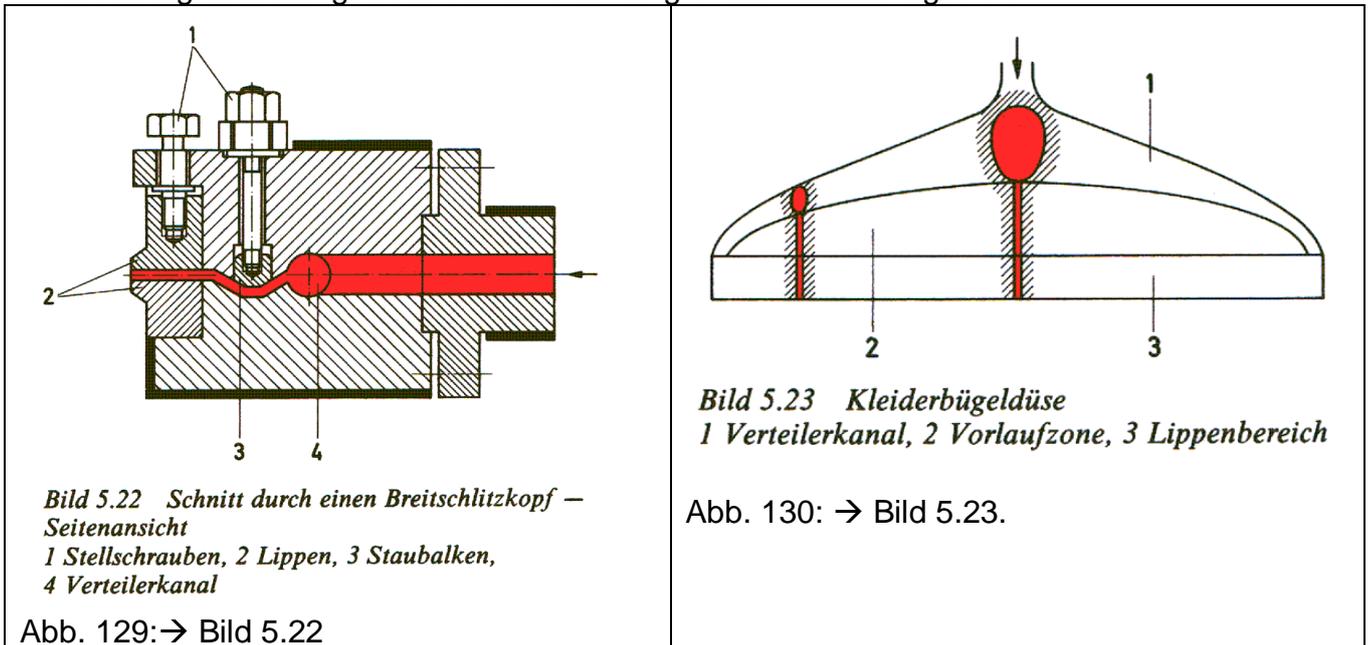
Abb. 128: Extruder, Aufbau und Funktion

Hergestellt werden:

- Vollprofile
 - Hohlprofile, Rohre
 - Platten mit Breitschlitzwerkzeug
 - Ummanteln von Elektrokabeln
 - Schmelzspinnen, Herstellung von Textilfasern
- Kunststoffprofile, die durch Extrusion herstellbar sind:
 - Hohlkammerprofile,
 - offene Profile und
 - Vollstabprofile
 - Anforderungen für die material- und fertigungsgerechte Gestaltung eines Profils:
 - Der Querschnitt soll so einfach wie möglich sein.
 - Materialanhäufungen sind unbedingt zu vermeiden.
 - Die Wanddicken sollen möglichst gleich gehalten werden.
 - Sind unterschiedliche Wanddicken für ein Profil nicht zu vermeiden, so ist der Querschnitt symmetrisch aufzubauen.

Beispiele für die Herstellung von Extrudierprodukten:

- 1) Flachfolien und Tafeln:
Werkzeuge zum Herstelle110
n einer gleichmäßigen Fließfront über die gesamte Werkzeugbreite



5.5.2 Werkzeuge für Flachfolien und Tafeln (Erläuterung aus Kunststoff - Kompendium)

Zur Herstellung von Flachfolien und Tafeln verwendet man Werkzeuge, in denen sich der Massestrom seitwärts ausbreiten muss. Die Fließfrontbreite kann dabei bis zu 3 m bei Spalthöhen von 0,5 bis 30 mm betragen.

Die Schwierigkeit bei der Gestaltung der Werkzeuge liegt darin, eine gleichmäßige Fließfrontgeschwindigkeit für die Schmelze über die gesamte Breite bei Austritt aus dem Werkzeug zu bekommen. Werkzeuge, die diesem Problem Rechnung tragen, sind als Breitschlitzdüsen in kurzer Baulänge konzipiert und mit einem Staubalken ausgerüstet.

Bei der Staubalkendüse (Bild 5.22) wird der Massestrom vom Schneckenzyylinder in einen runden Querkanal gebracht. Von dort fließt die Schmelze durch einen Längsschlitz ab und passiert den Staubalken. Der Staubalken ist von einer großen Anzahl Stellschrauben so einstellbar, dass die Fließfrontgeschwindigkeit an jeder Stelle korrigiert werden kann. Eine letzte Korrekturmöglichkeit erlauben die Düsenlippen, die außerdem der Kunststoffschmelze die nötige Oberflächenglätte verleihen und als Parallelführung fungieren.

Die Kleiderbügeldüse (Bild 5.23), hauptsächlich für das temperaturempfindliche PVC hart entwickelt, hat in der Draufsicht die Form eines Kleiderbügels. Der Verteilerkanal verjüngt sich dabei bis zu den seitlichen Enden der Düse. Der im Anschluss an den Verteilerkanal parallel geführte Kanal besitzt je nach Abstand von der Mitte unterschiedliche Längen bis zum Austritt. Die «Kurvenführung» des Kanalverlaufs lässt sich annähernd über eine komplizierte Formel berechnen. Die letzte Korrekturmaßnahme ist aber nur durch Nacharbeit am Kurvenverlauf des Verteilerkanals bei vorher durchgeführten Versuchen mit der entsprechenden PVC-Rezeptur, aber auch durch Einsatz eines Staubalkens möglich.

Bild 4.2.3 *1-Schnecken-Extruder* mit einer kernprogressiven 3-Zonen-Schnecke. In der *Einzugszone* ist der Kerndurchmesser gering, die Gangtiefe (das Volumen zwischen den Stegen, dem Zylinder und dem Kern) entsprechend hoch, um Platz für das eingezogene Granulat mit der Luft zwischen den Granulatkörnern zu bieten. In der *Umwandlungszone (Kompressionszone)* wird durch den Anstieg des Kerndurchmessers die Luft zwischen den aufschmelzenden Granulatkörnern zum Einfülltrichter hin verdrängt. Der Druck steigt an, desgleichen die Temperatur, und zwar durch den Einfluß der Zylindertemperatur und der eingebrachten Scherenergie. In der *Ausstoßzone (Meteringzone, Homogenisierzone)* bleibt der Kerndurchmesser konstant, hier wird die Gleichmäßigkeit der Zusammensetzung und der Temperatur verbessert. Bis zum Ende der Schneckengänge wird Druck erzeugt (Generator). Die drehende Schnecke erzeugt (wie beim «Fleischwolf» im Haushalt) durch die Spiralförmigkeit der Stege im Zusammenwirken mit der Haftung an der Zylinderwand eine förderwirksame *Schleppströmung*. Dem Werkzeug zugewandt ist die aktive, treibende Flanke des Stegs, die Rückseite des Stegs heißt passive Flanke. Durch den Druckaufbau in Richtung des Werkzeugs entsteht eine entgegengesetzt wirkende *Druckströmung* und damit eine hohe Scherwirkung, besonders stark bei der rückwärts gerichteten *Leckströmung* durch den schmalen Spalt zwischen Steg und Zylinder. Das *Extrusionswerkzeug (die Düse)* ist wegen seines Fließwiderstands der (Druck-) Verbraucher. Infolge der *Strangaufweitung* besitzt das Extrudat einen etwas größeren Durchmesser als die Düse, s. Bild 4.2.5.

Extrudieren: Produkte

- **Vollprofile**
- **Hohlprofile, Rohre**
- **Platten mit Breitschlitzwerkzeug**
- **Ummanteln von Elektrokabeln**
- **Schmelzspinnen, Herstellung von Textilfasern**

- Anforderungen für die material- und fertigungsgerechte Gestaltung eines Profils:
 - Der Querschnitt soll so einfach wie möglich sein.
 - Materialanhäufungen sind unbedingt zu vermeiden.
 - Die Wanddicken sollen möglichst gleich gehalten werden.
 - Sind unterschiedliche Wanddicken für ein Profil nicht zu vermeiden, so ist der Querschnitt symmetrisch aufzubauen.

13.2.3 Folienblasen → s. auch Video „K_Folien.mpg“

- Gängige Walzbreite bis 2500 mm
- Folien aus Hart PVC
 - Hochtemperaturverfahren, 180 - 220°C niedrigviskose PVC Schmelze → einfach zu verarbeiten aber thermisch hoch belastet
 - Normaltemperaturverfahren 160 - 180°C
 - Höherer apparativer Aufwand um eine hochwertige Folie herzustellen. Diese Folien haben i.d.R. bessere mechanische Eigenschaften (Klebebänder)
- Herstellungsgeschwindigkeiten 40 – 100 m/min

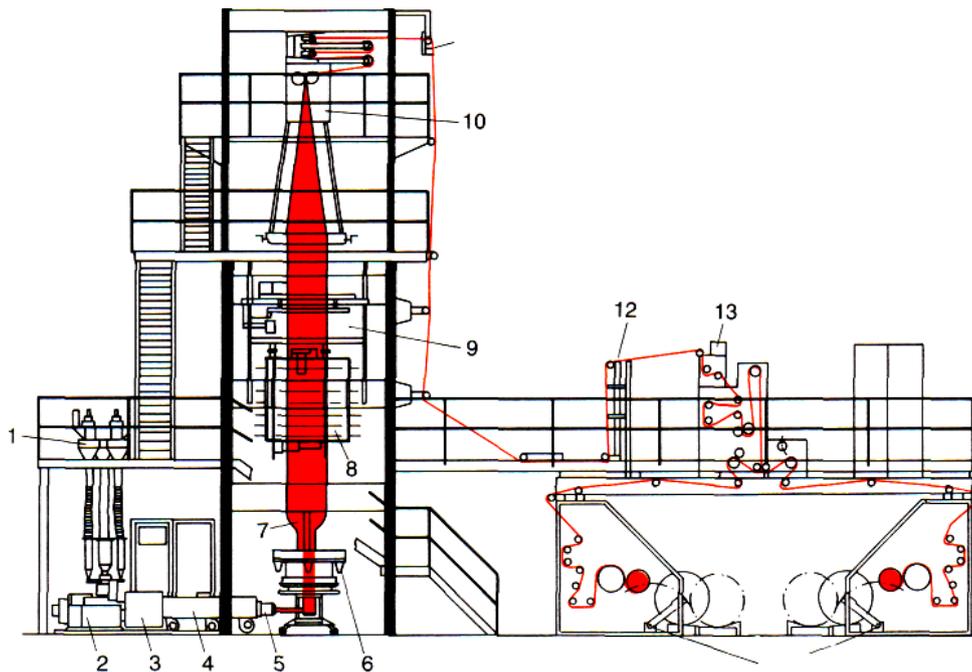
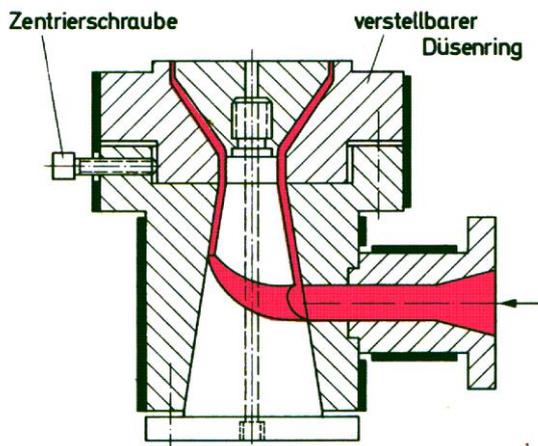


Abb. 131: Folienblasmaschine, s. auch Video in VL

Beim *Folienblasen* wird ein senkrecht nach oben extrudierter Schlauch biaxial durch Aufblasen in Umfangsrichtung und durch Abzugswalzen in Längsrichtung bis um den Faktor 6 gereckt, die Foliendicke um den Faktor 30 im Bedarfsfall (etwa zur Einsparung von Verpackungsrohstoff und -abfall) bis auf etwa 0,01 mm verkleinert. Bezogen auf die verminderte Dicke wird die Reißfestigkeit erhöht, die Permeabilität vermindert. Oben wird der Folien-Schlauch flach gelegt. Im aufgeblasenen Schlauch ändert sich das Volumen der Luft nicht. Jedoch ersetzt man sie durch den Dorn hindurch ständig durch neue Kaltluft, um die Abkühlung des Schlauchs beschleunigen und damit die Höhe der Maschine reduzieren zu können. Durch Schweißen und Abschneiden in Querrichtung werden Beutel hergestellt, durch Aufschneiden in Längsrichtung erzeugt man Flachfolien. Wenn man beidseitig aufschneidet, wickelt man jede der beiden entstehenden Folien gleichzeitig auf zwei getrennten Rollen auf. Schon geringe Abweichungen der Foliendicke in Umfangsrichtung würden sich beim Aufwickeln zu Wülsten oder «Kolbenringen» addieren. Deshalb wird die Foliendicke automatisch geregelt: Ein reversierendes, kapazitives Dickenmeßsystem im Bereich der Schlauchzentalführung gibt die Ergebnisse an den Regler. Der Düsenring ist in viele beheizbare Segmente unterteilt, die vom Regler einzeln angesteuert werden. Bei einer Dickstelle wird die Temperatur etwas erhöht, die Folie etwas stärker ausgezogen und die Verdickung wegeregelt.

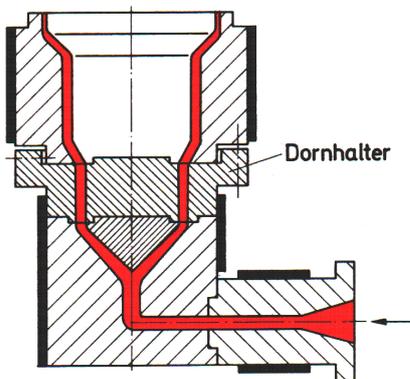
Um die verbleibenden Schwankungen der Foliendicken auszugleichen, reversiert die Flachlegevorrichtung. Dann verteilt sich eine Dicken-abweichung gleichmäßig über die ganze Rollenbreite.

Blasfolienwerkzeuge:



Für kleine und mittlere
Schlauchfoliendurchmesser

Bild 5.24 Radial angeströmter Blaskopf



Für große Schlauchfolien-
durchmesser

Bild 5.25 Zentral angeströmter Blaskopf

Abb. 132: Blasfolienwerkzeuge

5.53 Blasfolienwerkzeuge ([Erläuterungsseite aus Kunststoff-Kompodium](#))

Bei den Blasfolienwerkzeugen wird in der Regel die Kunststoffschmelze im Werkzeug aus fertigungstechnischen Gründen in einem Winkel von 90° umgelenkt und tritt entweder nach oben oder unten als Schlauch aus. Der Schlauch wird zu einem Folienschlauch aufgeblasen. Für kleinere bis mittlere Schlauchfoliendurchmesser und temperaturunempfindliche Kunststoffe hat sich der Blaskopf mit Dorn (Pinole) und radialer Anströmung bewährt (Bild 5.24). Der Massestrom trifft hierbei seitlich auf den Dorn und umfließt ihn in einem Ring- oder Herzkurvenkanal.

Fließwegunterschiede werden durch Begünstigung eines Teilflusses und Behinderung des anderen korrigiert.

Eine andere Art Blasfolienwerkzeug, insbesondere für PVC-Folien, ist der zentral angeströmte Blaskopf (Bild 5.25). Die aus dem Extruder kommende Kunststoffschmelze wird von einem Krümmer umgelenkt, trifft auf die Kegelspitze des Verdrängerkörpers, passiert die Dornhaltestege und tritt aus einem Ringspalt ins Freie. Bei großen Schlauchfoliendurchmessern sind verschiedene Blaswerkzeugausführungen entwickelt worden. Eine bewährte Konstruktion ist die mit zentraler Anströmung und schraubenförmiger Verteilung der Schmelze um den Dorn (Bild 5.26).

13.2.4 Ummanteln

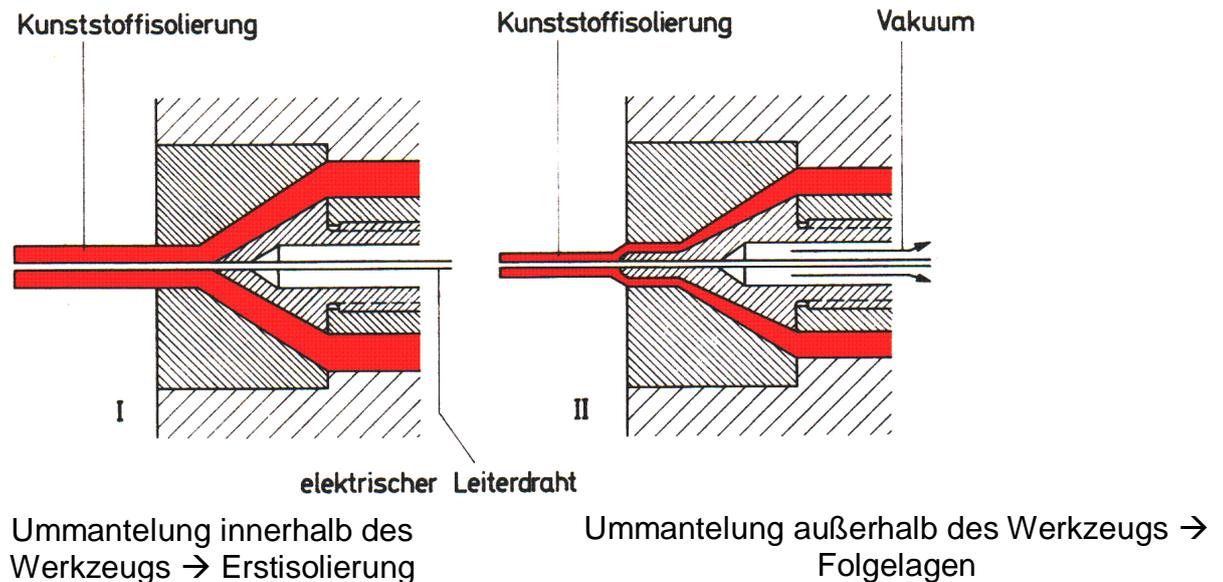


Abb. 133: Werkzeuge zum Ummanteln

Werkzeuge zum Ummanteln

Sollen andersartige Werkstoffe mit Kunststoff ummantelt werden, setzt man Winkelköpfe ein, durch die der zu ummantelnde Werkstoff gezogen wird.

Das wohl bekannteste Beispiel dazu ist die Draht- und Kabelummantelung. Die Ummantelung erfolgt entweder innerhalb oder außerhalb des Werkzeugs

Für die Erstisolierung eines Drahtes setzt man gewöhnlich das Werkzeug mit Innenummantelung ein. Werden mehrere verseilte oder mehrere schon isolierte Leiterdrähte umspritzt, bietet sich die Außenummantelung an.

4.2.5.5 Ummantelungen von Elektrokabeln (Erläuterungsseite aus Kunststoff- Komp.)

Die Herstellung von Elektrokabeln mit Kunststoffisolierung ist einer der am häufigsten durch Extrudieren erzeugte Werkstoffverbund. Der im Winkel von 30 bis 90° zur Extruderschnecke verlaufende Kupferdraht wird hierzu durch eine Drahtführungsspitze gezogen. Die Drahtführungsspitze bildet das Ende einer Pinole, deren Kanäle dafür sorgen, daß trotz der seitlichen Zuführung die Schmelze im Bereich der Drahtführungsspitze überall die gleiche Strömungsgeschwindigkeit aufweist. Die Kanäle haben dazu die *Herzkurvenform* eines um die Pinole gelegten Breitschlitzwerkzeugs (Abschnitt 4.2.5.2), quasi eines um die Pinole gelegten «Kleiderbügels», bei dem die Enden des Kleiderbügels an der Rückseite der Pinole wieder zusammentreffen.

Nachdem der Draht die unter Druck stehende Schmelzeschicht durchlaufen hat, gelangt er in die gleich dahinter liegende Austrittsdüse, die den (größeren) Durchmesser des ummantelten Drahtes aufweist. Die für die Ummantelung benötigte Schmelze tritt also gemeinsam mit dem Draht aus der Düse aus. Anders gesagt: Der Draht erfüllt die Rolle des Dorns bei der Rohrextrusion (s. vorstehenden Abschnitt), die Isolierung ist ein um den Draht extrudiertes Rohr. Nach der Verfestigung der Isolierung durch Abkühlung (Thermoplaste) oder Vulkanisation (Gummiisolierung) kann der isolierte Draht aufgewickelt werden.

13.2.5 Herstellen von Textilfasern (aus Kunststoffkompendium Kap. 4.2.5.6)

Schmelzspinnen

Die Schmelze wird mittels Zahnradpumpen mit hoher Schergeschwindigkeit (bis 100000 s^{-1}) durch eine Lochplatte gedrückt und mit Stickstoff gekühlt. Für die meisten Fasern aus thermoplastischen Kunststoffen geeignet, etwa für PET, PA 66, PA 6 oder PP. Verstreckung bei Temperaturen von über 60 °C um den Faktor 3,5 bis 4,5, für hochfeste Garne bis 7, für extrem feste Gelfäden aus PE um einen Faktor von mehreren hundert [4.11]. Dadurch werden die Makromoleküle und Kristallite parallel ausgerichtet.

Der Titer der Einzelfaser beträgt bei handelsüblichen Produkten etwa 1 bis 20 dtex. 1 dtex bedeutet eine längenbezogene Masse von $1\text{ g}/10000\text{ m}$ und entspricht bei einer Rundfaser einem Faserdurchmesser von etwas über $10\text{ }\mu\text{m}$. Der Titer ist proportional dem Quadrat des Durchmessers. *Mikrofasern*, mit denen sich wind- und wasserdichte, aber atmungsaktive Stoffe fertigen lassen, besitzen einen Titer bis herunter zu 0,3 dtex. Ihre Herstellung erfordert reine Rohstoffe und eine ausgefeilte, aber prinzipiell nicht andersartige Technik wie Normalfasern.

Die Verarbeitbarkeit und ein textiles Aussehen erreicht man durch *Texturieren*, womit eine den Naturfasern ähnliche Kräuselung erreicht wird. Bikomponentenfasern werden analog den Coextrudaten durch gemeinsames Spinnen von zwei unterschiedlichen Polymeren gewonnen und besitzen dann oft automatisch eine Kräuselung, wenn die Komponenten unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen.

13.2.6 Weitere Beispiele von Kunststoff-Verarbeitungsmaschinen
 (entnommen aus: J.F Shakleford, Werkstoffkunde für Ingenieure)

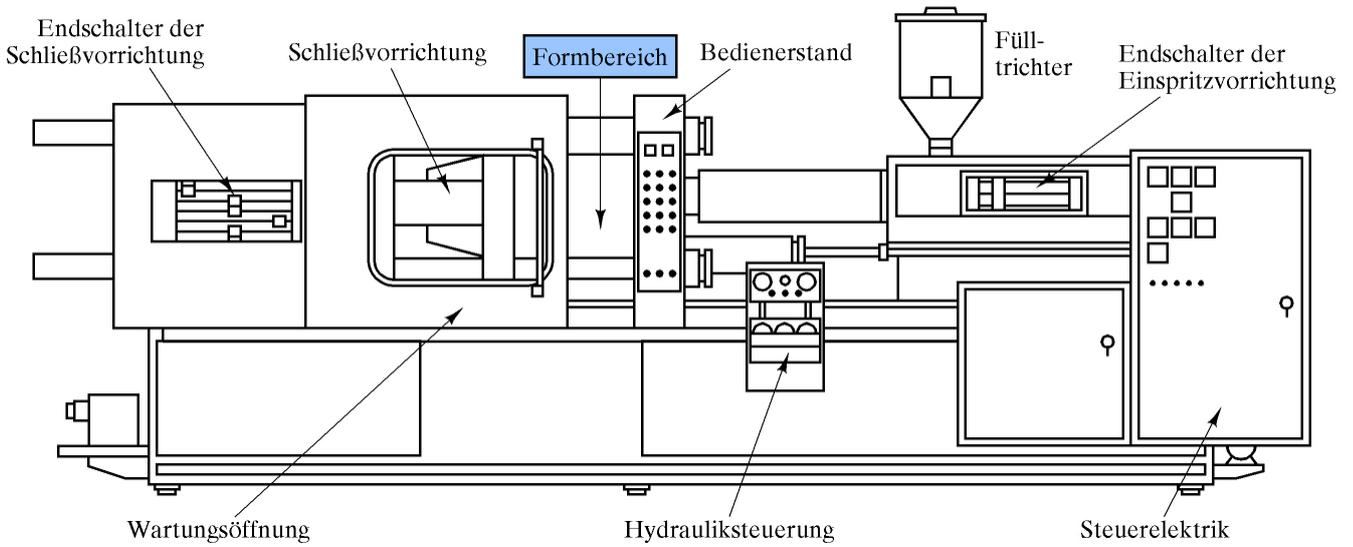


Abb. 134: Spritzgießen eines thermoplastischen Polymers

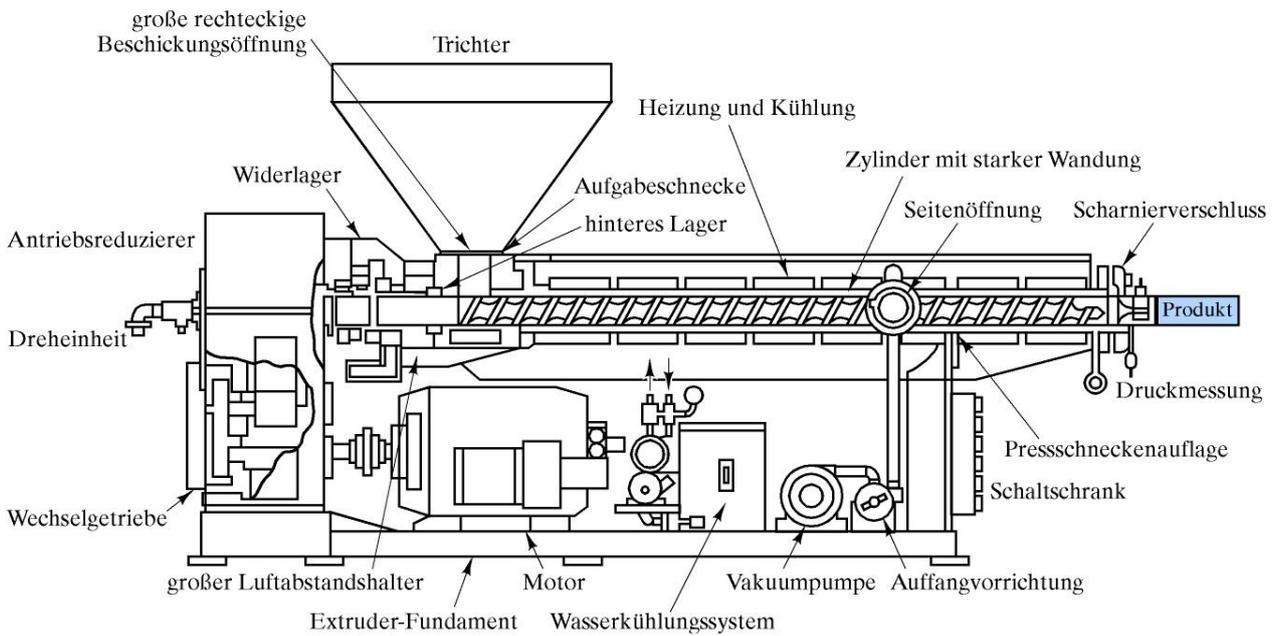


Abb. 135: Extrusion eines thermoplastischen Polymers.

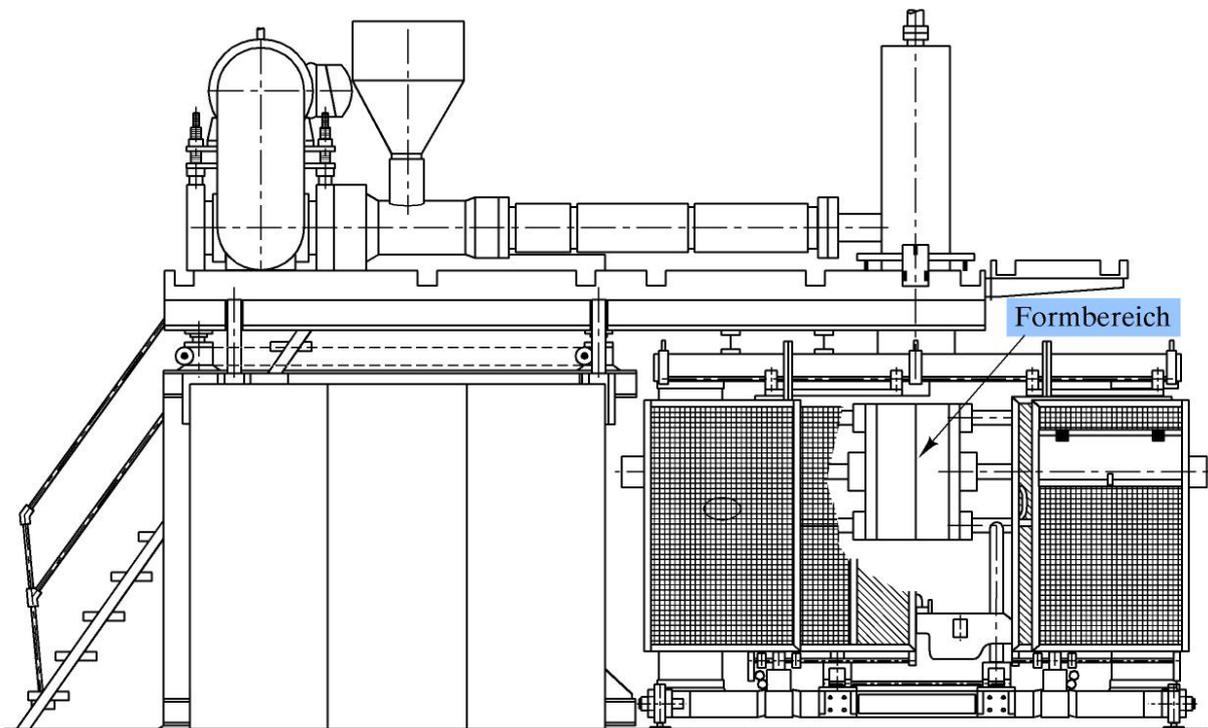


Abb. 136: Blasformen eines thermoplastischen Polymers. Die konkrete Formgebung ist ähnlich den Verfahren für die Herstellung von Hohlglaskörpern s. folgende Abb. 114

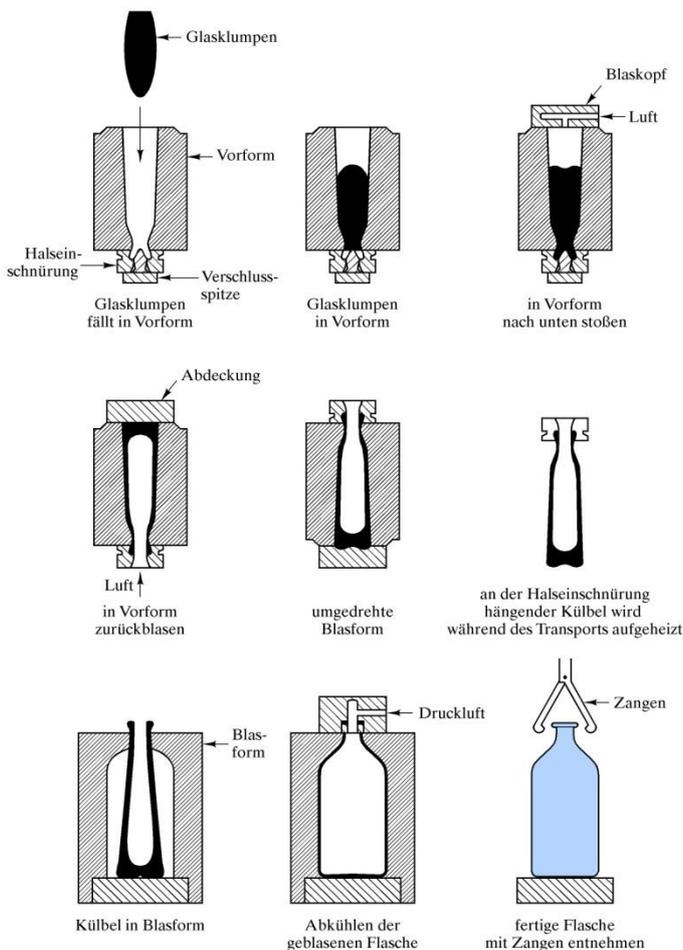


Abb. 137: Die Formgebung eines Glasbehälters verlangt wie das Blasformen eines Kunststoffes genaue Kontrolle der Viskosität des Werkstoffs auf verschiedenen Stufen.

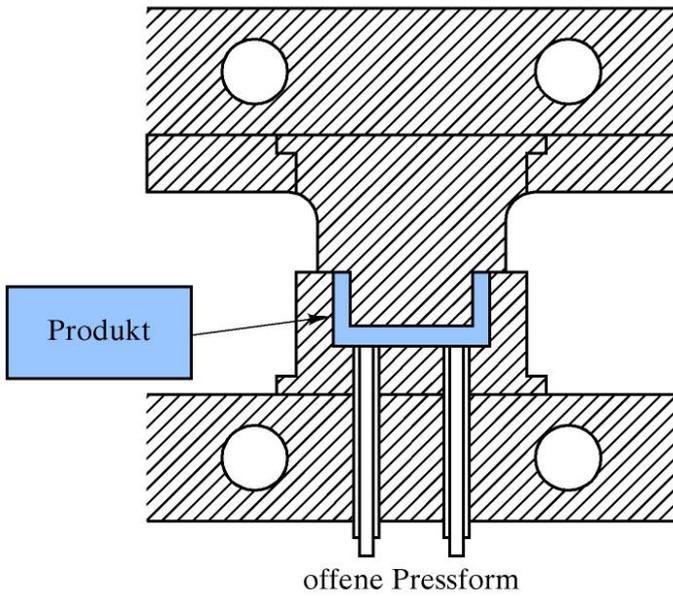


Abb. 138: Pressen eines duroplastischen Polymers **vor der Vernetzung !**

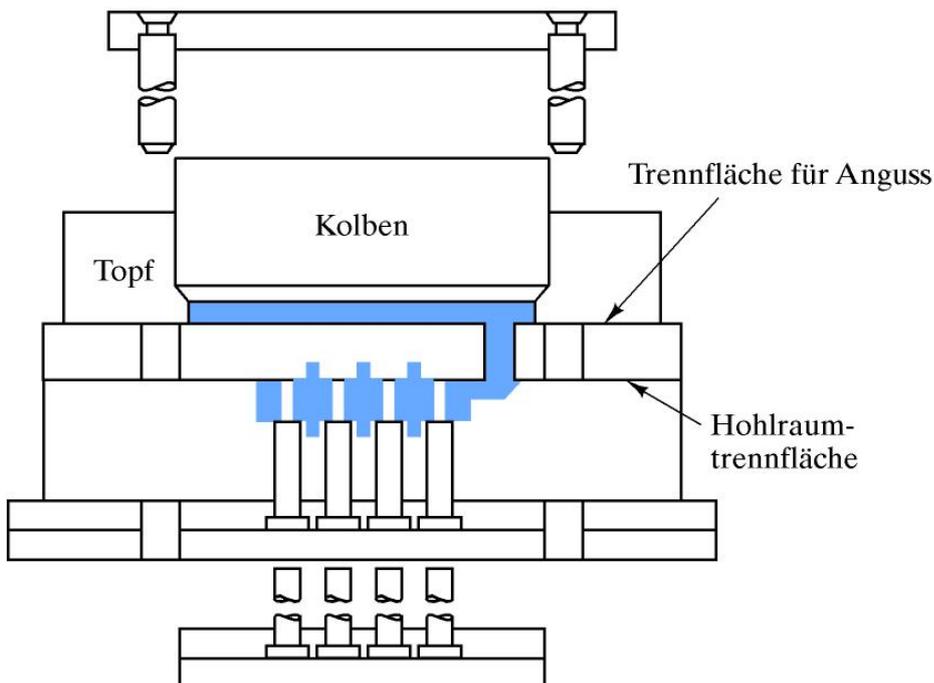


Abb. 139: Spritzpressen eines duroplastischen Polymers.

Beispiel: Herstellung eines Armaturenbrettes:

Ein Armaturenbrett besteht heute aus 3 Schichten:

- PU-Hartschaum → Duroplast, d ca. 3 - 4 mm als Träger, wird separat hergestellt
- Weich-PVC-Haut → Slush → wird vorher separat mit Hilfe einer Galvanoform (s. Praktikum, 3. Semester) hergestellt
- PU-Weichschaum → in Presse zusammen mit a) und b)

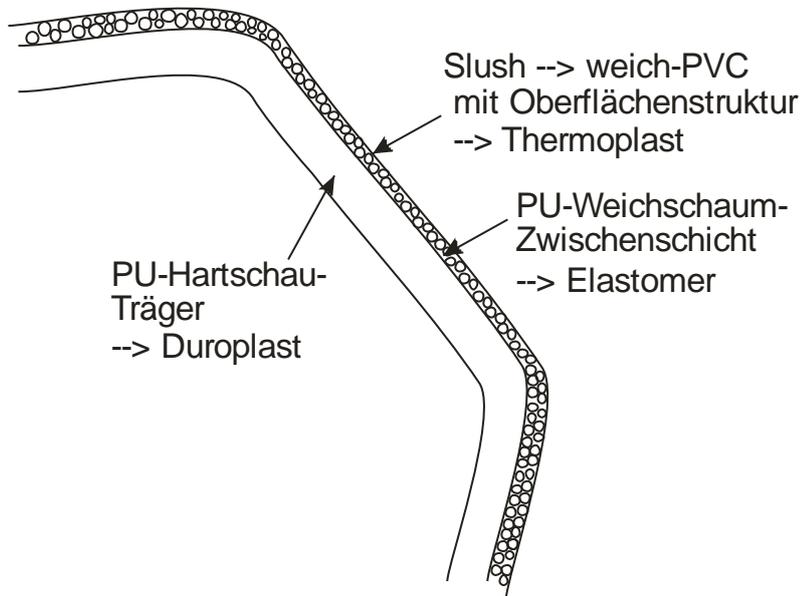


Abb. 140:

Aufbau eines Armaturenbrettes (schematisch)

Die Herstellung erfolgt in 3 Schritten:

- Erzeugung der späteren Oberfläche (Slush-Technik)
- Aufschäumen der Weich-PU-Zwischenschicht
- Verpressen mit dem zuvor Hergestellten

Eine Galvanoform (s. Praktikum „Galvanoformung“, 3. Semester) dient als Werkzeugform. Sie enthält das Negativ der späteren Oberfläche des Armaturenbrettes. Sie wird erwärmt (z.B. per Infrarotstrahlung, 200 °C). Dann wird PVC-Pulver zugegeben. Dieses wird auf der Oberfläche aufgeschmolzen und ausgebacken (d ca. 1 – 1,5 mm). Das auf der Rückseite befindliche, noch rieselfähige Pulver wird entfernt. Die Oberfläche enthält dann z.B. eine Lederalnung (entsprechend der Oberfläche des Galvanos), die Rückseite ist hochglänzend. Die Weich-PVC-Haut (der Slush) wird aus der Form herausgezogen in die Oberform einer Schäumpresse eingelegt (von Hand) und auf den Hart-PU-Träger gebracht. In die Unterform der Presse wird der Hart-PU-Träger eingelegt, wobei ein 1 - 2 mm breiter Spalt freigelassen wird. In diesen wird der PU-Weichschaum (zunächst dünnflüssig) eingespritzt, welcher sich sowohl mit dem Weich-PVC als auch mit dem Hart-PU verbindet.

→ nach ähnlichem Verfahren werden heute auch Stoßfänger für PKW hergestellt.

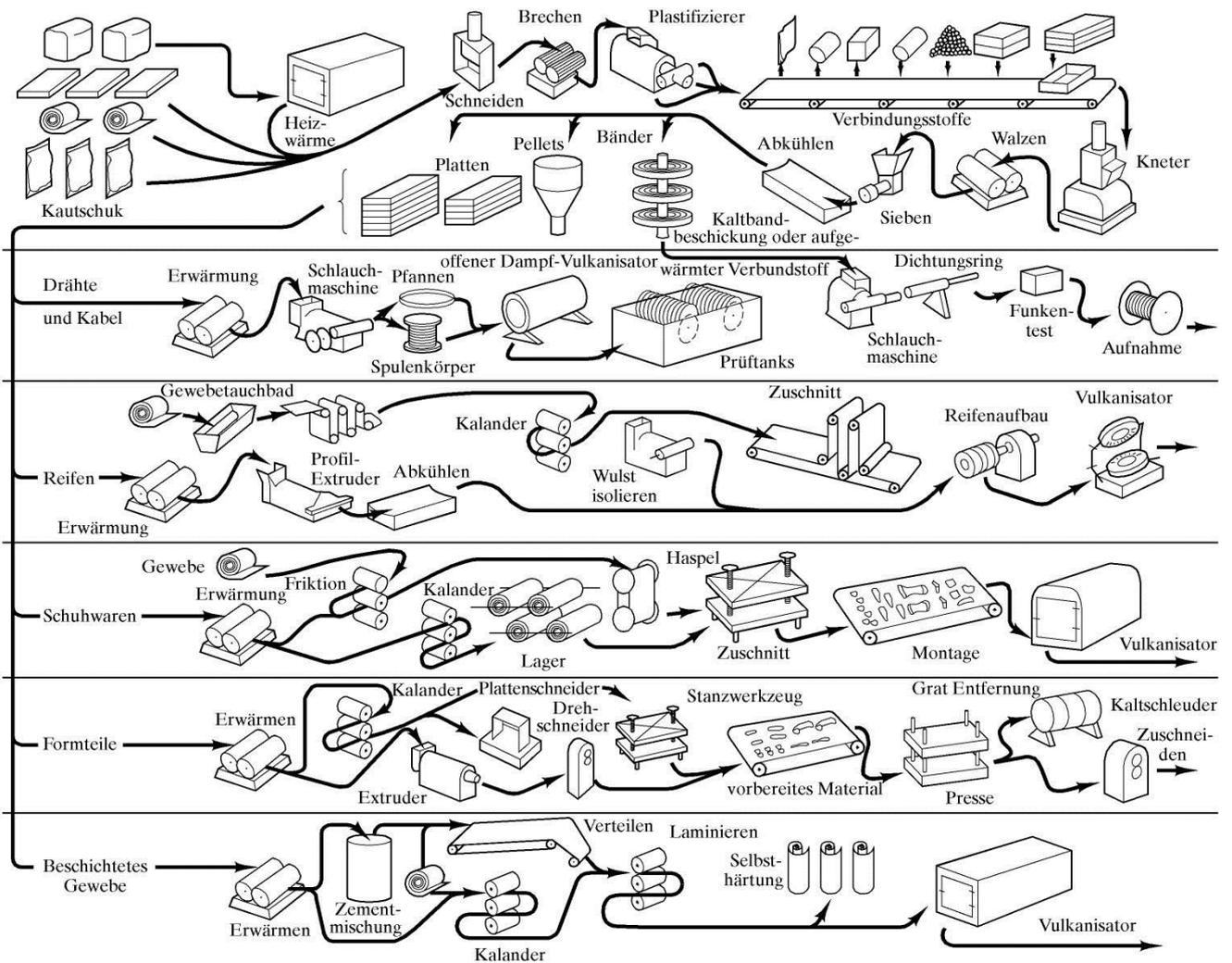


Abb. 141: Typische Fertigungsschritte für die Herstellung verschiedener Kautschukerzeugnisse

14. Werkstoffprüfung bei Kunststoffen

14.1 Zugversuch (nach Grellmann, Kunststoffprüfung, Hanser-Verlag, S.119 ff)

Für die Durchführung des Zugversuchs an Kunststoffen stellt die DIN EN ISO 527 die bevorzugte Norm dar, welche die Prüfung von Formmassen, Folien und Tafeln sowie Faserverbundwerkstoffen umfasst. Eine wesentliche experimentelle Grundvoraussetzung zur Durchführung dieses Versuches ist die Nutzung geeigneter kunststoffgerechter Prüfkörper, die im folgenden Bild dargestellt sind.

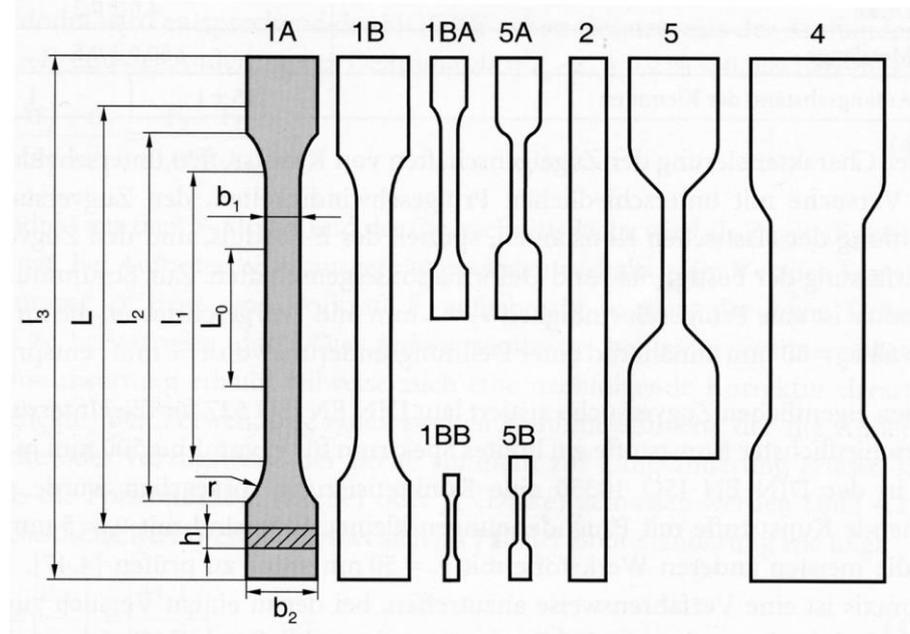


Abb. 142: Prüfkörper für den Zugversuch an Kunststoffen nach DIN EN ISO 527

Die Prüfkörper des Typs 1A und 1B sind Basisprüfkörper entsprechend DIN EN ISO 3167, die für eine Vielzahl von Untersuchungsmethoden der Kunststoffprüfung eingesetzt werden können. Der Prüfkörper **1A**, der in der Regel durch direkte Formgebung wie Spritzgießen hergestellt wird, besitzt eine parallele Länge $l_1 = 80$ mm und wird auch als Vielzweckprüfkörper bezeichnet. Auf Grund der parallelen Länge kann dieser bevorzugte Prüfkörper auch für andere Prüfverfahren wie Biegeversuch, Druckversuch und Schlagversuch verwendet werden, wobei der Vorteil eines vergleichbaren inneren Zustandes besteht.

Der Prüfkörper Typ **1B** wird normalerweise durch indirekte Formgebung wie Sägen und Fräsen aus plattenförmigen Halbzeugen hergestellt. Die Varianten 1BA und 1BB sind proportionale Verkleinerungen des Typs 1B im Maßstab 1:2 bzw. 1:5 und sind damit auch zur Charakterisierung der Zugeigenschaften von aus Bauteilen entnommenen Prüfkörpern verwendbar.

Die Prüfkörper **5A** und **5B** entsprechen den Typen 2 bzw. 4 der ISO/DIS 37 und sind vorzugsweise für Zugversuche an Gummi und anderen elastomeren Werkstoffen zu verwenden. Die Prüfkörper **2** und **4** werden entsprechend DIN EN ISO 527-3 für die Charakterisierung der Zugeigenschaften von Folien und Tafeln empfohlen, wogegen Typ **5**, auch als Löffelstab bezeichnet, für die Prüfung duktiler Werkstoffe mit hoher Bruchdehnung (PE) zu bevorzugen ist. Für faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe sollten Typ 2 oder der ähnliche Typ 3 wahlweise mit Zentrierlöchern oder Aufkleimern (Krafteinleitungsplatten) zur Sicherung hinreichender Klemmbedingungen nach DIN EN ISO 527-4 verwendet werden.

Die Abmessungen der Prüfkörper vom Typ 1A und 1B können aus nachfolgender Tabelle entnommen werden.

Prüfkörper Typ		1A	1B
		Maße in mm	
l₃	Gesamtlänge	≥ 150	
l₁	Länge des schmalen, parallelen Teils	80 ± 2	60 ± 0,5
r	Radius	20 – 25	≥ 60
l₂	Entfernung zwischen den breiten parallelen Teilen	104 - 113	106 - 120
b₂	Breite an en Enden	20,0 ± 0,2	
b₁	Breite des engen Teils	10,0 ± 0,2	
h	Dicke	4,0 ± 0,2	
L₀	Meßlänge	50,0 ± 0,2	
L	Anfangsabstand der Klemmen	115 ± 1	l ₂

Die Dicke der Probekörper beträgt 3 bis 5 mm, vorzugsweise 3 bis 4 mm, wenn aus Formmassen hergestellt. Aus Platten bis 10 mm Dicke sowie aus Folien entsprechend der Dicke im Anlieferungszustand.

Die Herstellung der Probekörper erfolgt durch Pressen, Spritzgießen oder spanend durch Aussägen aus Tafeln und Formteilen. Bei Verpackungsbändern Probeabschnitte, auf bestimmte Längen zugeschnitten; für Folienproben spezielle Schneidetechnik, siehe Norm.

Die Proben müssen frei von Beschädigungen und Fehlstellen sein. Nacharbeit, wenn erforderlich, nur in Längsrichtung. Aus Tafeln und Folien Probekörper in Längs- und Querrichtung entnehmen (Anisotropie).

Nach dem Versuch wird die Probe bzgl. der Eigenarten der Verformung wie Einschnürung, Verstreckung, Aufspleißen und nach dem Bruchaussehen beurteilt.

Gezogen werden mindestens 5 Probekörper, die 16 Stunden bei Normalklima DIN 50014-23/50-2 gelagert (Einfluß der Luftfeuchtigkeit) wurden.

Bei der Charakterisierung der Zugeigenschaften von Kunststoffen unterscheidet man zwei Versuche mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten, den Zugversuch zur Ermittlung der elastischen Konstanten, speziell des E-Moduls, und den Zugversuch zur Erfassung der Festigkeits- und Deformationseigenschaften. Zur Bestimmung des E-Moduls ist eine Prüfgeschwindigkeit $v_T = 1 \text{ mm min}^{-1}$ vorgeschrieben, die im Messintervall $L_0 = 50 \text{ mm}$ annähernd einer Dehnungsänderung von $1 \% \text{ min}^{-1}$ entspricht.

Für den eigentlichen Zugversuch existiert laut DIN EN ISO 527 für die Untersuchung unterschiedlichster Kunststoffe ein breites Spektrum für v_T von 1 bis 500 mm min^{-1} , so dass in der DIN EN ISO 10350 eine Konkretisierung vorgegeben wurde. Spröd brechende Kunststoffe mit Bruchdehnungen kleiner 10 % sind mit $v_T = 5 \text{ mm min}^{-1}$ und die meisten anderen Werkstoffe mit $v_T = 50 \text{ mm min}^{-1}$ zu prüfen.

In den meisten Fällen wird der Zugversuch zur Ermittlung der Festigkeits- und Deformationseigenschaften von Kunststoffen mit einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm min^{-1} durchgeführt.

In **Abb. 141** sind typische Spannungs-Dehnungs-Diagramme verschiedener Kunststoffe aufgeführt. Die aus den Kurven ableitbaren Kenngrößen entsprechen dabei charakteristischen Punkten der Diagramme. Es bedeuten:

σ_B	Bruchspannung	ϵ_t	totale Dehnung
σ_M	Zugfestigkeit	ϵ_{tM}	totale Dehnung bei σ_M
σ_Y	Streckspannung (Fließgrenze)	ϵ_{tB}	totale Dehnung bei σ_B
σ_X	Beliebige Spannung (x N/mm ²)	ϵ_B	Bruchdehnung
		ϵ_X	beliebige Dehnung (x %)

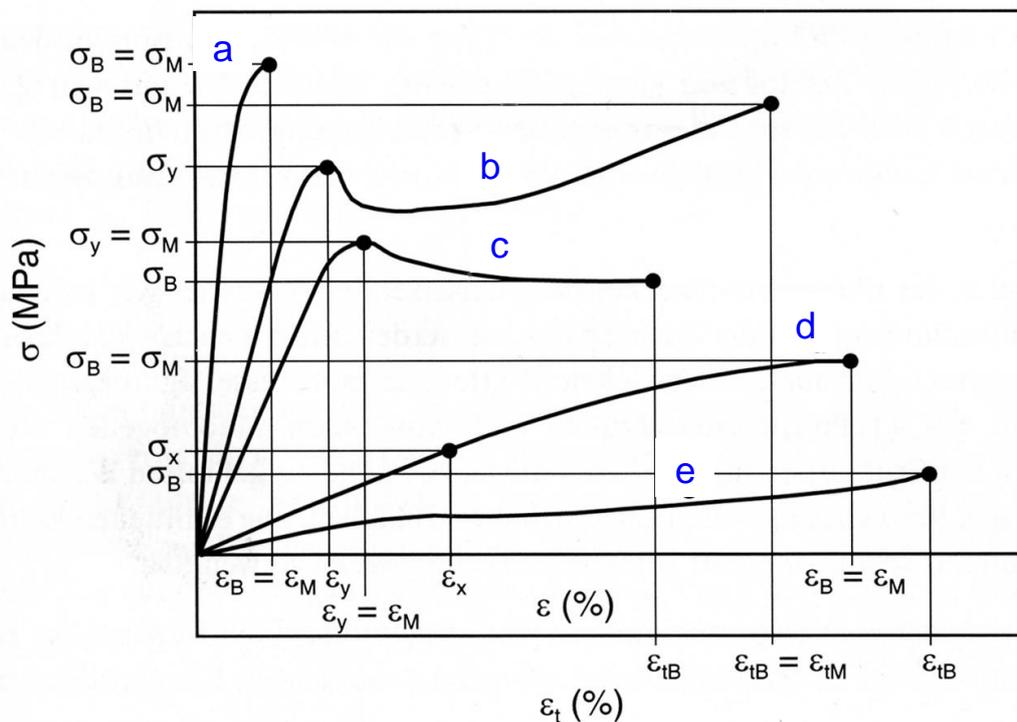


Abb. 143: Spannungs-Dehnungs-Diagramme und Kenngrößen von verschiedenen Kunststoffen:

spröde Werkstoffe (a), zähe Werkstoffe mit Streckpunkt (b und c), zähe Werkstoffe ohne Streckpunkt (d) und elastomere Werkstoffe (e)

Das Diagramm a ist sprödem Werkstoffverhalten mit relativ hohen Zugfestigkeiten σ_M , zuordenbar, wobei die erreichte Bruchdehnung ϵ_B , bis zu 10 % betragen kann. Typische Vertreter dieses Werkstoffverhaltens sind PS und andere spröde Thermoplaste, Duroplaste sowie gefüllte und verstärkte Kunststoffe. Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme des Typs b bis d entsprechen duktilem Deformationsverhalten mit Bruchdehnungen von mehreren hundert Prozent, aber vergleichsweise geringen Zugfestigkeiten. Typische Vertreter für ein derartiges Werkstoffverhalten sind Polyolefine und Polyamide. Speziell thermoplastische Kunststoffe mit einem σ - ϵ -Verhalten vom Typ b und c zeigen eine Streckspannung σ_Y an, der eine lokale Einschnürung, gefolgt von einem konstanten Spannungsplateau, auch bezeichnet als kaltes Fließen, auftritt. Das Spannungsplateau ist die Folge einer Ver Streckung mit Fließzonenbildung, wobei der Werkstoff ver Streckt wird und sich dabei gleichsam aus dem unverstreckten Teil des Prüfkörpers herauszieht. Die Fließzone kann in Abhängigkeit von der gewählten Prüfgeschwindigkeit den gesamten prismatischen Teil des Prüfkörpers überwandern. Dieser Prozess führt im prismatischen Teil zu einer Orientierung durch Ausrichtung der Moleküle in Beanspruchungsrichtung, die z.B. durch Dichtemessungen nachweisbar ist.

Die während des Zugversuchs auftretenden verschiedenen Deformationsphasen zeigt für den Typ **b** das nachfolgende Diagramm

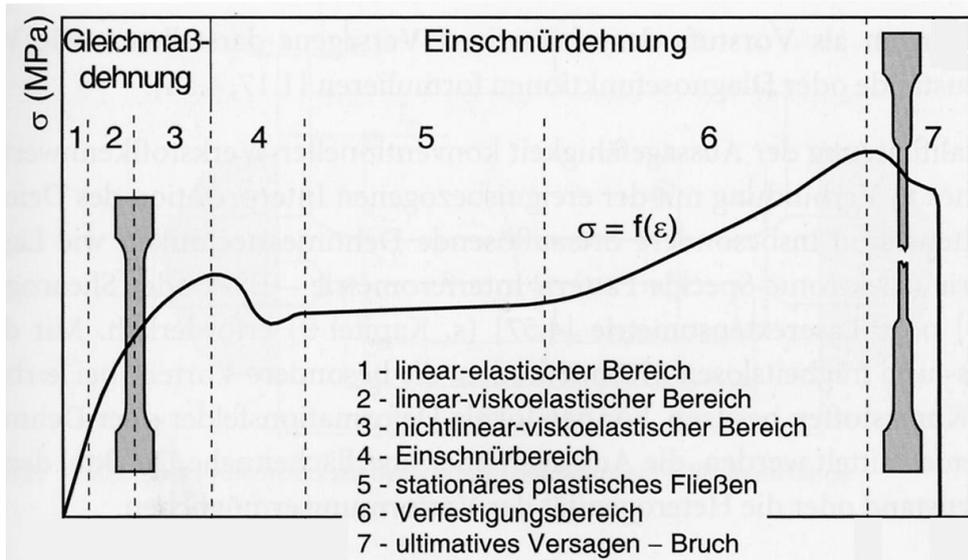


Abb. 144:
 σ - ϵ -Diagramm eines Kunststoffes vom Typ **b** (s.o.) mit den auftretenden Deformationsphasen

Bis zum 1. Maximum der Kurve erfolgt eine gleichmäßige Dehnung der Probe. Im Bereich 4 beginnt die Einschnürung. In Bereich 5 erfolgt ein Nachfließen des Werkstoffes aus dem breiten Bereich der Probe. In Bereich 6 kommt es zu einer Erhöhung der Spannung durch Orientierung der Molekülketten. In Bereich 7 erfolgt der Bruch → vergleiche mit Metallen.

Grundsätzlich ist jede Deformation eines Werkstoffes neben der Änderung des inneren Energiezustandes mit einer Wärmetönung verbunden, die sich z.B. mittels Videothermographie darstellen lässt. Da die Kunststoffe sich schon im Normklima (23°C, 50 % Feuchte) in einem Temperaturbereich befinden, in dem selbst geringfügige Temperaturänderungen das Verformungsverhalten erheblich beeinflussen können, treten Rückwirkungen auf das Deformationsverhalten infolge derartiger Wärmeeffekte auf. Das oben aufgeführte irreversible kalte Fließen entspricht damit eigentlich einer Warmver Streckung auf Grund der Eigenerwärmung des Kunststoffes. Bei sehr geringen Deformationsgeschwindigkeiten nahe dem Gleichgewichtszustand kann eine vollständige Orientierung des planparallelen Teils des Prüfkörpers erreicht werden, wodurch letztendlich die Belastung nicht mehr durch zwischenmolekulare Kräfte, sondern durch die Hauptvalenzbindungen, aufgenommen wird. Infolge dieser Tatsache steigt die Spannung bei diesen Kunststoffen wieder an, was auch als Verfestigung bezeichnet wird. Das zweite Maximum der Spannungs-Dehnungs-Kurve wird in diesem Fall als Zugfestigkeit σ_M , bezeichnet (Typ **b**). Tritt keine Verfestigung auf (Typ **c**), ist die Streckspannung σ_s , identisch mit der Zugfestigkeit σ_M .

Die Bruchspannung σ_B und die Bruchdehnung ϵ_B , liefern selten sinnvoll physikalisch und anwendungstechnisch verwertbare Kennwerte, wobei die Bruchdehnung insbesondere hohe statistische Streuungen aufweist und die Bruchspannung sehr stark von auswertetechnischen Einstellungen der Prüfsoftware abhängt.

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Typs **e** in [Abb. 141](#) entspricht dem typischen S-förmigen Verlauf von kautschukähnlichen Werkstoffen mit sehr geringen Festigkeiten und E-Modul, aber sehr hohen Bruchdehnungen von bis zu 1000 %. Zu dieser Werkstoffgruppe gehören z.B. PVC-P sowie natürlicher und synthetischer Gummi.

Der Bereich des ultimativen Bruches oder einsetzender geometrischer Instabilitäten wie die Einschnürung bei der Streckspannung werden oftmals auch als Makroschädigungsgrenzen bezeichnet. Infolge lokaler Verformungsprozesse, signifikanter Veränderungen des Prüfkörperquerschnittes und einer stark inhomogenen Dehnrate bezüglich der Prüfkörperlänge verlieren die nachfolgend aufgeführten Bestimmungsgleichungen für die Kenngrößen eigentlich

ihre Gültigkeit. Die ermittelten Kennwerte sind somit nur sehr bedingt für Dimensionierungszwecke verwendbar.

In Abhängigkeit vom Deformationsverhalten des untersuchten Kunststoffes können entsprechend DIN EN ISO 527 die nachfolgend aufgeführten Kenngrößen ermittelt werden:

Streckspannung σ_γ : Der erste Spannungswert, bei dem ein Zuwachs der Dehnung ohne Steigerung der Spannung auftritt. Ermittelt wird dieser Kennwert zumeist über den Anstieg $d\sigma/d\varepsilon$ der Spannungs-Dehnungs-Kurve. Dieser Wert kann identisch mit der Zugfestigkeit σ_M , sein.

$$\sigma_\gamma = \frac{F_y}{A_0}$$

Zugfestigkeit σ_B : Die maximale Zugspannung, die während des Versuches registriert wird. Dieser Kennwert kann in Abhängigkeit vom Werkstoffverhalten mit der Streckspannung σ_γ oder der Bruchspannung σ_B , identisch sein.

$$\sigma_M = \frac{F_{\max}}{A_0}$$

Spannung σ_x bei x % *Dehnung*: Falls das Spannungs-Dehnungs-Diagramm keine makroskopisch sichtbare Streckspannung (Typ **d** in Abb. 141) aufweist, kann man diese Kenngröße zur Vergleichbarkeit von Werkstoffen verwenden. Der Wert, der teilweise auch als Dehngrenze bezeichnet wird, ist die Spannung, bei der die Dehnung ε_x den festgelegten Wert x in % erreicht. Die Prüfsoftware von modernen Universalprüfmaschinen erlaubt oftmals die Eingabe von mehreren Werten für x .

$$\sigma_x = \frac{F_x}{A_0}$$

Bruchspannung σ_B : Die Spannung, die beim Bruch des Prüfkörpers ermittelt wird. Dieser Wert, der in der Prüfpraxis häufig auch als Reißfestigkeit bezeichnet wird, hängt von maschinentechnischen Parametern, wie der Bruchabschaltschwelle, ab und kann deshalb größeren statistischen Schwankungen unterliegen. Die Bruchspannung σ_B , kann mit der Zugfestigkeit σ_M , identisch sein.

$$\sigma_B = \frac{F_B}{A_0}$$

Die den Spannungskenngrößen zuordenbaren Dehnungen charakterisieren das Deformationsverhalten des Werkstoffes. Entsprechend der DIN EN ISO 527 ist die normative Dehnung ε für Kunststoffe bis zur Streckspannung oder bei spröden Werkstoffen bis zur Bruchspannung oder Zugfestigkeit mit einem Messfühler oder Ansetzdehnungsaufnehmer aufzuzeichnen (Abb. 141 Typ **a** und **d** bis zum Bruch, Typ **b** und **c** bis zur Streckspannung), wobei der Messabstand in diesem Fall $L_0 = 50$ mm beträgt. Oberhalb der Streckspannung ist für duktile Kunststoffe die nominelle Dehnung ε_t zu verwenden (Abb. 143).

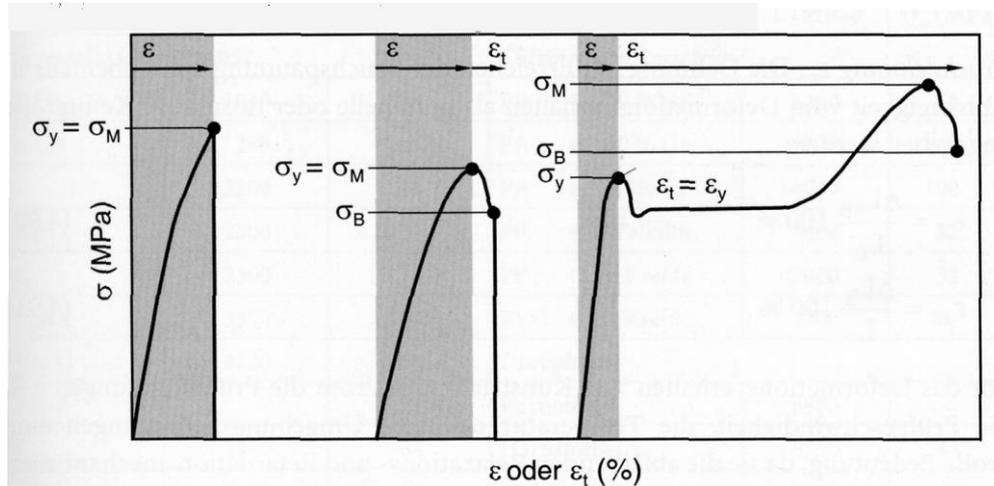


Abb. 145: Verwendung der normativen und nominellen Dehnung nach DIN EN ISO 527

Diese Vorgaben erfordern die Verwendung bruchunempfindlicher automatischer Dehnungssensoren und die simultane Aufzeichnung des Weges der Traverse und des Extensometers. Grundsätzlich sind mit dieser Regelung Probleme verbunden, deren Ursachen im Orientierungs- und Eigenspannungszustand spritzgegossener Prüfkörper begründet sind. Laut Norm sind die Ergebnisse des Zugversuches dann zu verwerfen, wenn der Bruch des Prüfkörpers direkt an oder in der Klemme erfolgt. Tritt der Bruch oder eine Einschnürung allerdings außerhalb der Messschneiden des Extensometers oder direkt an der Position der Schneiden auf, dann kann das Ergebnis verwertet werden, obwohl hier ebenfalls eine deutliche Beeinflussung des Kennwertniveaus auftritt. In diesem Fall ist zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse bevorzugt die nominelle Dehnung zu verwenden. Folgende Dehnungskennwerte können ermittelt werden:

Streckdehnung ε_y : Die Dehnung an der Streckspannung ε_y , die dimensionslos oder in Prozent angegeben wird.

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

Dehnung ε_M , oder ε_M bei der Zugfestigkeit: Das ist die zur Zugfestigkeit σ_M zugehörige Dehnung. Bei Werkstoffen ohne Deformationen oberhalb der Streckdehnung wird die normative Dehnung ε , anderenfalls die nominelle Dehnung ε_t , verwendet:

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

Bruchdehnung ε_B : Die Dehnung bei Erreichen der Bruchspannung kann ebenfalls in Abhängigkeit vom Deformationsverhalten als nominelle oder normative Kenngröße angegeben werden:

Für das Deformationsverhalten von Kunststoffen besitzen die Prüfbedingungen z.B. die Prüfungsgeschwindigkeit, die Temperatur oder die Umgebungsbedingungen eine große Bedeutung, da sie die ablaufenden Relaxations- und Retardationsmechanismen nachhaltig beeinflussen können. Abb. 144 zeigt schematisch für einen duktilen Thermoplast den Einfluss von Temperatur und Dehnrage auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten. Mit zunehmender Geschwindigkeit oder abnehmender Temperatur steigt die Zugfestigkeit an und die Bruchdehnung nimmt ab, wobei sich der Habitus der Spannungs-Dehnungs-Diagramme verändert.

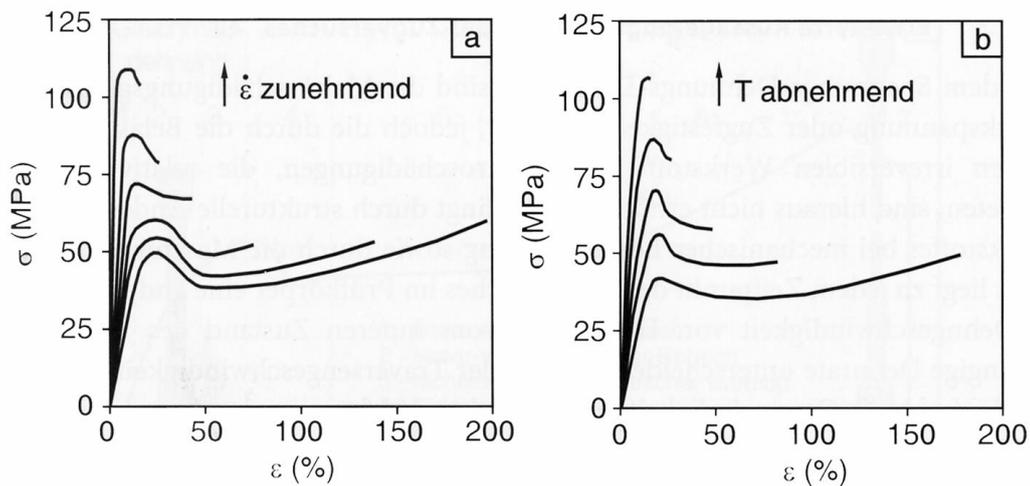


Abb. 146: Schematische Spannungs-Dehnungs-Diagramme eines thermoplastischen Kunststoffes in Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit (a) und der Temperatur (b)

In der [Tabelle 4.3](#) sind für ausgewählte Kunststoffe relevante Kennwerte für den E-Modul und die Zugfestigkeit dargestellt.

Werkstoff	E (MPa)	σ_M (MPa)	Werkstoff	E (MPa)	σ_M (MPa)
<i>Thermoplaste unverstärkt</i>			<i>Thermoplaste verstärkt</i>		
PE-HD	1040	28	PP + 30% GF	6200	73
PE-LD	280	-	PA 6 + 30% GF	6500	110
PS	3200	51	PA + 30% CF	18000	190
PA6	1300	32	PP + Talkum	3000	32
PC	2300	71	PP + Kreide	3000	32
PMMA	3300	74	PVC + Kreide	3200	
PVC-U	3200	50	<i>Duroplaste</i>		
PVC-P	-	21	Phenolharz	8800	-
PP	1300	34	Harnstoffharz	8750	44
ABS	2400	38	Melaminharz	7000	-
POM	3000	68	UP-Harz	3700	53
PET	2700	40	EP-Harz	2840	62
PEEK	3900	-	Silikonharz	10400	24
PUR	1900	-	PUR	1230	26
SAN	3700	76			
PBT	2600	53			

[Tabelle 4.3](#): E-Modul und Zugfestigkeit ausgewählter Kunststoffe

Neben dem Zugversuch gibt es eine Reihe weiterer zerstörender und zerstörungsfreier Prüfverfahren (zfP). Nähere Informationen zu diesen Verfahren wie z.B. Druckversuch, Biegeversuch, Kerbschlagbiegeversuch, Härteprüfung, Ermüdungsversuch oder Prüfungen mit Röntgenstrahlung, Ultraschall oder Prüfungen auf Warmformbeständigkeit oder Brandverhalten finden Sie in dem Buch "Kunststoffprüfung" von W. Grellmann aus dem Hanser-Verlag, das auch diesem Kapitel zugrunde liegt.

15. Wertstoffkreislauf der Kunststoffe

Der Wertstoffkreislauf der Kunststoffe beginnt bei der Herstellung, s.o.

Der nächste Schritt ist die Fertigung der Produkte. Hier kann schon der erste Schritt zur **Vermeidung von Abfall** erfolgen. Dies geschieht über

- die Entwicklung leistungsfähigerer Kunststoffe,
- die Optimierung der Konstruktion und
- die Einführung von Mehrwegverpackungen,

so daß von vorn herein weniger Material verbraucht und damit weniger Abfall erzeugt wird .

Nach der Gebrauchsphase lassen sich Kunststoffe mit Hilfe unterschiedlicher und vielseitiger Methoden recyceln, d.h. wieder verwenden bzw. verwerten. Dies sind:

- (Werk-)Stoffliche Wiederverwertung
- Chemisches Recycling (rohstofflichen Verwertung)
- Thermische Nutzung (energetische Verwertung)
- Deponieren (Abfallbeseitigung)

Zunächst einige Zahlen:

Kunststoffabfälle werden in, Deutschland zu über 96 % verwertet. Die Verarbeitungsmenge für Kunststoffe in Deutschland betrug im Jahr 2007 rund 12,5 Mio.t. Dies bedeutet einen Anstieg von 3 Mio. t gegenüber 2005 und entspricht einem jährlichen Zuwachs um etwa 5,6 %. Die ermittelte Kunststoffabfallmenge belief sich auf 4,86 Mio. t; das entspricht einem Zuwachs von 0,46 Mio. t.

Von der gesamten Kunststoffabfallmenge wurden laut der Studie etwa 43 % **werkstofflich verwertet**. Das entsprach einer Zunahme um etwa 30 % im Zeitraum von 2005 bis 2007. Rund 52 % wurden einer **energetischen** und 1 % einer zugeführt. Lediglich 177 000 t (4 % der Gesamtmenge) fielen zur **Abfallbeseitigung** an.

Gemäß der europäischen Definition (volle Berücksichtigung **energieeffizienter Müllverbrennungsanlagen** mit Energieauskopplung) rückt dabei die Gesamtverwertungsquote in Bereich der Post-Consumer-Abfälle an die annähernd 100 % erreichende Recyclingquote für Produktions- und Verarbeitungsabfälle der Industrie heran.

Dominante Schlüsselbranchen für das wachsende Aufkommen von Post-Consumer-Abfällen in Deutschland sind die Bereiche Verpackung, Bau und Landwirtschaft. Von 2005 bis 2007 wuchs die Kunststoffabfallmenge von rund 3,45 Mio. t auf über 3,8 Mio. t. Ungefähr 80 % des Anstiegs basiere auf Zuwächsen bei Verpackungen (rund 60 % Anteil an den Post-Consumer-Abfällen 2007), Bau (8,7 %) und Landwirtschaft (5,7 %).

Das **stoffliche Kunststoffrecycling** (2007: rund 1 Mio. t) aus Post-Consumer-Abfällen wird laut den Studienergebnissen primär von den Verpackungen (mehr als 80 %) getrieben: mit nur jeweils etwa 5% folgen Bauprodukte, beispielsweise Fenster und Rohre sowie Folien aus Anwendungen im Bereich der Landwirtschaft. Pro Kopf ermittelte die mit/der Erstellung der Studie beauftragte Consultic Marketing & Industrieberatung, Alzenau, in Deutschland ein Kunststoffabfallaufkommen von jährlich 46 kg. Davon fielen allein 28 kg durch Verpackungen an. (aus vdi-n 12.12.08)

Kunststoffe sind bereits von ihrer Erzeugung her umweltfreundliche Werkstoffe; sie benötigen nur wenig Energie zu ihrer Herstellung, wie die Energieäquivalente einiger Werkstoffe im Vergleich mit Kunststoffen zeigen (s. Abb. 132). Auch für die Herstellung von Formteilen

werden nur geringe Energiemengen benötigt, wie im Vergleich einiger Erzeugnisse, die üblicherweise sowohl aus Kunststoffen, wie aus anderen Werkstoffen hergestellt werden, leicht erkennbar ist.

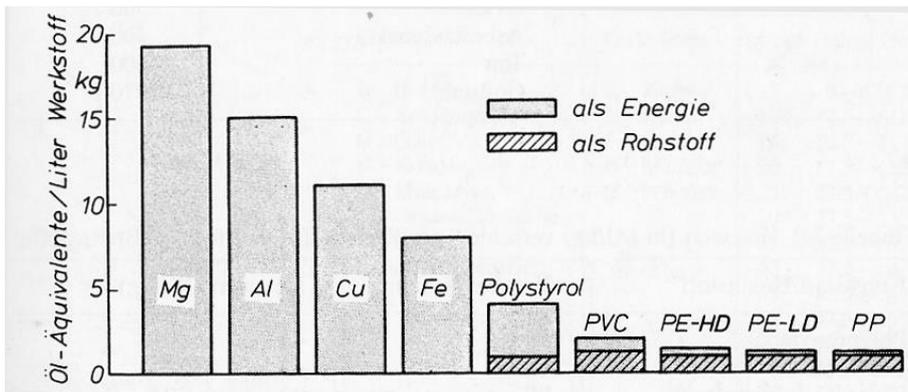


Abb. 147:
E-Bedarf bei der Herstellung von Werkstoffen

15. 1 werkstoffliches Recycling

Beim **werkstofflichen Recycling** werden aus gebrauchten Kunststoffen wieder neue Kunststoffprodukte.

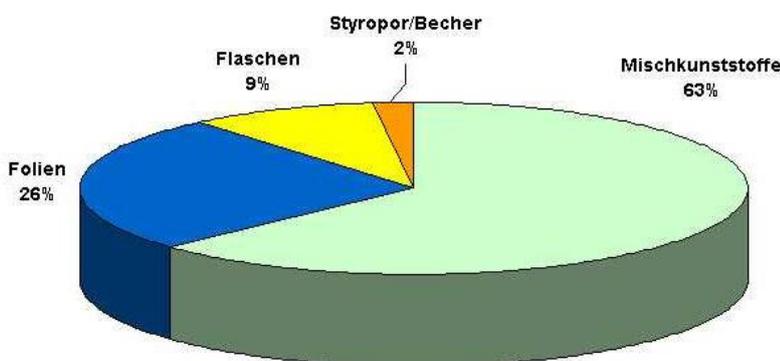


Abb. 148:
Sortierfraktionen bei Kunststoff in Gew. %

Im Verwertungsbetrieb werden z.B. die Kunststoffverpackungen zunächst von Störstoffen wie Metallpartikeln befreit, zerkleinert und gewaschen. Anschließend werden aus den Kunststoffschnipseln mittels Dichtentrennung letzte Fremdkunststoffe abgetrennt.

Bei der Verwertung der Becherfraktionen dient die Dichtentrennung, um Polypropylen und Polystyrol voneinander zu trennen. Bei der Verwertung von PET-Flaschen werden in diesem Schritt die Verschlusskappen aussortiert, die häufig aus Polyethylen bestehen. Das so aufbereitete Mahlgut wird in einem Extruder zu Regranulat umgeschmolzen. Das körnige Material dient in der Kunststoffverarbeitung zur Herstellung von Fertigprodukten. So entstehen in unterschiedlichen Verfahren zum Beispiel Profile, Rohre, Blumen- und Getränkekästen und neue Folien.



Abb. 149
Windsichter in Aktion:

Kunststoffverpackungen werden in den Sortieranlagen aussortiert. Um sie recyceln zu können, müssen die Kunststoffe zunächst gereinigt und zerkleinert werden. Danach werden sie - je nach Materialeigenschaften - werkstofflich zu Recyclingprodukten oder rohstofflich z.B. als Rohölersatz in der Stahlproduktion (s.u.) verwertet.

Recycling von Kunststoff - werkstofflich

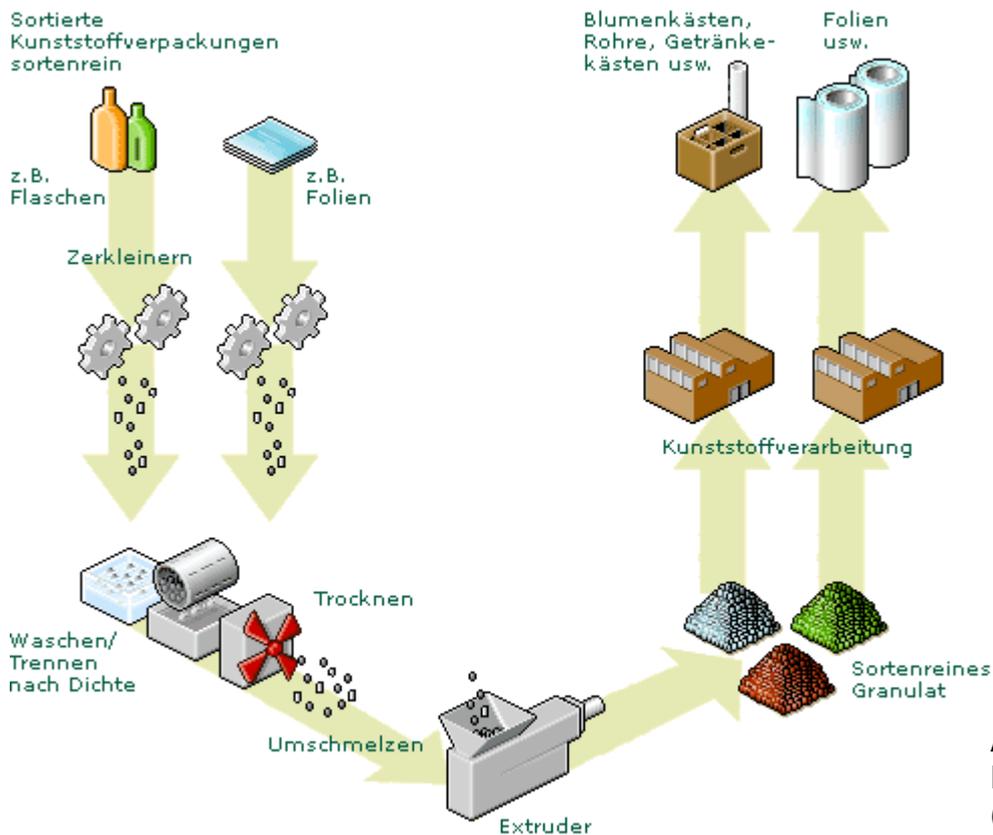


Abb. 150:
Recycling von Kunststoff
(werkstofflich)

Beispiele für Produkte aus recycelten Kunststoffen:



Abb. 151:

Motorradheckteil: Wiederverwertetes Polyesterharz + Glasfaserverstärkung

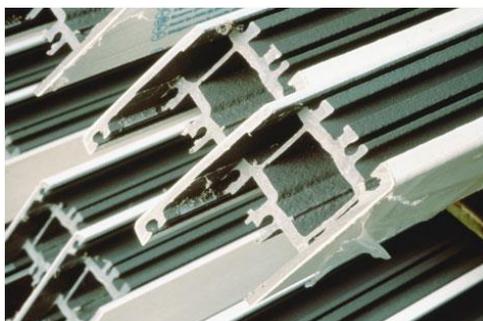


Abb. 152:

Bauelemente aus Recyclingkunststoffen
z.B. Profile für Fensterrahmen

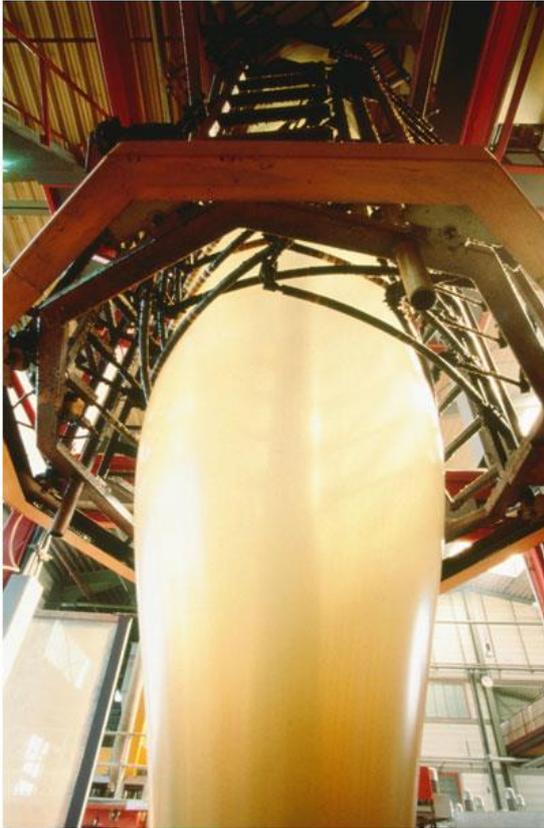


Abb. 153:

Aus Folienblasanlage werden Folienprodukte gewonnen.

In Folienblasanlagen werden gebrauchte Polyethylen-Folien unter Hitzeeinwirkung vermennt, gedehnt und zu einem langen Schlauch geblasen. Aus diesem werden neue Folien hergestellt.

15. 2 chemisches Recycling

Die **rohstoffliche Verwertung** führt den Kunststoff in seine gasförmigen Ausgangsbestandteile zurück, die als Synthesegas beispielsweise als Ersatz von Schweröl im Hochofen zum Einsatz kommen. Dieses Verfahren wird vor allem für die Verwertung von Mischkunststoffen genutzt. Sie bestehen aus verschiedenen Kunststoffsorten, die sich nur unter großem Aufwand trennen lassen würden: Die Verpackungen werden zerkleinert, durch Reibungswärme kompaktiert und zu Agglomerat veredelt, das schließlich in der Stahlindustrie als Reduktionsmittel für die Roheisengewinnung genutzt werden kann.

Eine weitere Möglichkeit ist Ölgewinnung durch Hydrierung oder Pyrolyse. Das Öl kann dann wieder zur Herstellung neuer Kunststoffe verwendet werden.

Recycling von Kunststoff
Rohstofflich, z.B. Reduktionsverfahren

Gemischte Kunststoffverpackungen, z.B. Chipstüten und Deckel

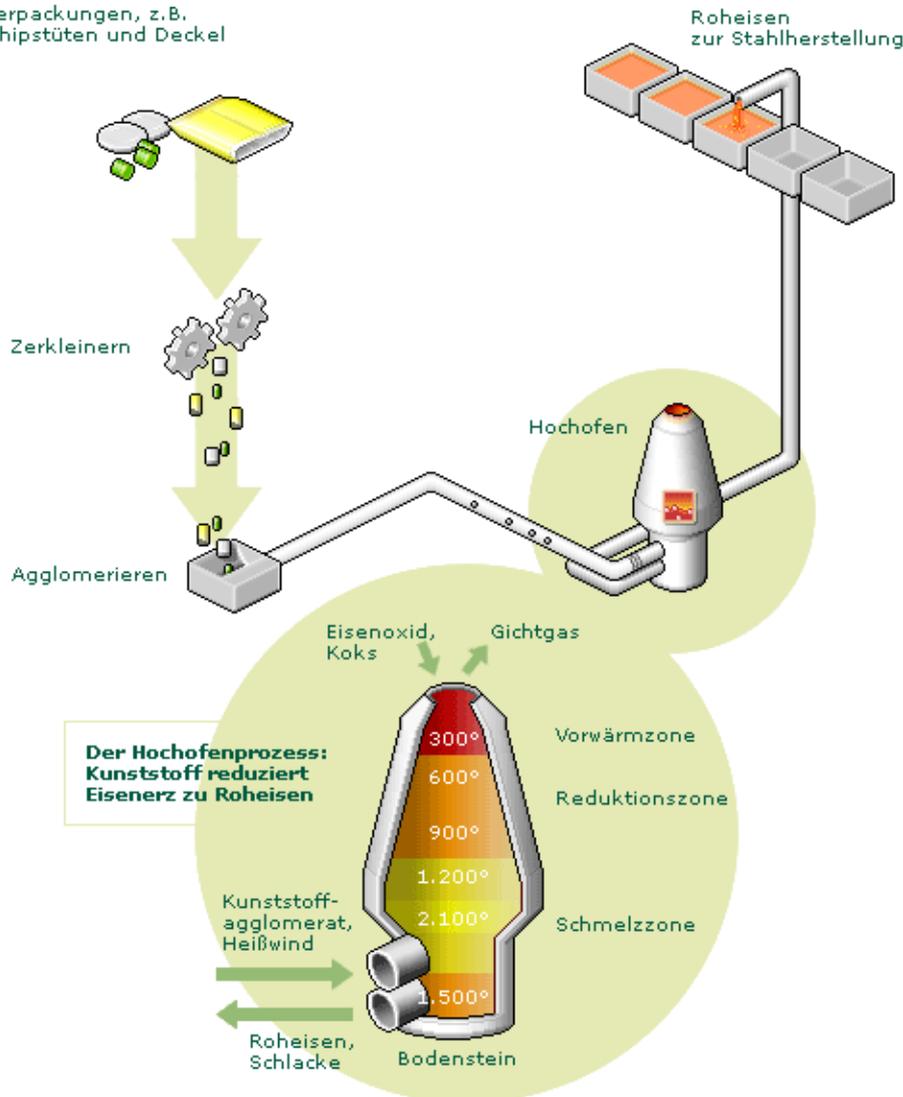


Abb. 154:
 Recycling von Kunststoff (rohstofflich)

15. 3 thermische Nutzung

Falls ein wirtschaftliches Wiederverwerten nicht möglich sein sollte, können Kunststoffabfälle, die mit anderen Stoffen gemischt vorliegen, problemlos, z. B. durch Verbrennen in Müllkraftwerken, beseitigt und somit nützlich verwertet werden (**energetische Verwertung**). Dank ihres organischen Aufbaus (C, H) sind Kunststoffe mit ganz wenigen Ausnahmen gut brennbar; dies kann man durch gewisse Füllstoffe beschränken und so eine schnelle Entzündung erschweren, aber nie völlig verhindern. Durch Verbrennen werden die Polymerwerkstoffe zunächst in Kohlenwasserstoffe depolymerisiert; diese verbrennen dann zu Kohlendioxid und Wasserdampf. Damit schließen sich die Kunststoffe in den biologischen Kreislauf des Kohlenstoffs zwanglos ein.

15. 4 Deponieren

Das Deponieren von Kunststoffen ist der letzte Ausweg, falls sich die Kunststoffe nicht anderweitig verwerten lassen.

(Zur Thematik „Kunststoffrecycling“ s. auch Videofilm in VL.

16. Bezeichnungen der Kunststoffe

Kurzzeichen für Kunststoffe und Kautschuke

Zur Kennzeichnung von Kunststoffen und Elastomeren werden Abkürzungen verwendet. Soweit diese Begriffe genormt sind, gelten hierfür u. a. für Kunststoffe DIN/ISO 7728 DIN/ISO 1043-1,2, 3 und für Kautschuk DIN/ISO 1629. Nach DIN/ISO 7728 werden Copolymere durch einen / getrennt, z. B. PP/EPDM, **Terpolymere** VC/E/MMA. Das zuerst genannte Polymer bildet den Hauptbestandteil. Polymergemische (Polymermischungen) werden dagegen in () und mit einem + getrennt dargestellt, z. B. (PC+PBT). Beide werden in der Literatur meist als Blends bezeichnet. Bei Copolymeren besagt ferner die Norm, dass Namensteile in Klammern gesetzt werden, wenn nach Poly- mehr als ein Namensbestandteil folgt.

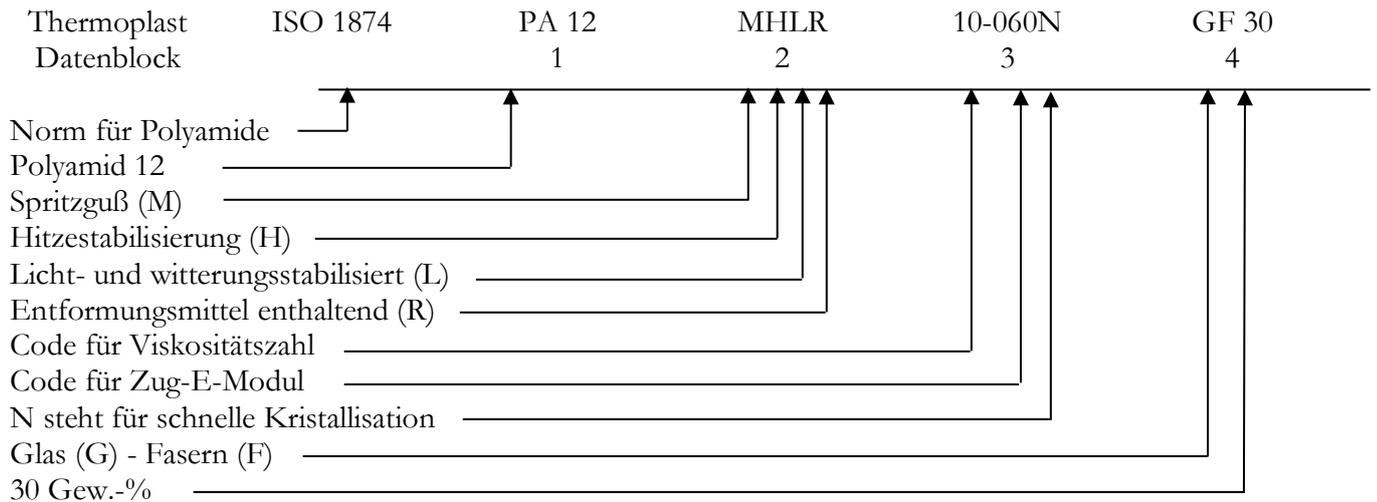


Abb.: Beispielbezeichnung nach ISO 1874 für das Polyamid PA 12

1. Position Code Art		2. Position Code Form		3. Position Code Gehalt in Gew.-%		
B	Bor	B	Kugeln	5	0	< 7,5
C	Kohlenstoff	D	Pulver	10	7,5	< 12,5
G	Glas	F	Fasern	15	12,5	< 17,5
K	Kreide	G	Mahlgut	20	17,5	< 22,5
M	Mineralien	H	Whisker	25	22,5	< 27,5
S	organische Stoffe			30	27,5	< 32,5
T	Talkum			35	32,2	< 37,5
X	nicht spezifiziert			40	37,5	< 42,5
				45	42,5	< 47,5
				50	47,5	< 55
				60	55	< 65
				70	65	< 75
				80	75	< 85
				90	85	und mehr

Abb. 155:: Codierung von Verstärkungsmitteln und Füllstoffen in Datenblock 4

Kurzzeichen für Kunststoffe und Kautschuke

Zur Kennzeichnung von Kunststoffen und Elastomeren werden Abkürzungen verwendet. Soweit diese Begriffe genormt sind, gelten hierfür u. g. für Kunststoffe DIN/ISO 7728 DIN/ISO 1043-1, 2, 3 und für Kautschuk DIN/ISO 1629. Nach DIN/ISO 7728 werden *Copolymeren* durch einen / getrennt, z. B. PP/EPDM, Terpolymere VC/E/MNIA. Das zuerst genannte Polymer bildet den Hauptbestandteil. *Polymergemische (Polymermischungen)* werden dagegen in () und mit einem + getrennt dargestellt, z. B. (PC+ PBT). Beide werden in der Literatur meist als *Blends* bezeichnet. Bei *Copolymeren* besagt ferner die Norm, daß Namensteile in Klammern gesetzt werden, wenn nach Poly- mehr als ein Namensbestandteil folgt.

A/B/A	Acrylnitril/Butadien/Acrylat Copolymer
ABR	Acrylester-Kautschuk (Acrylat-Butadien-Rubber)
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ACM	Acrylat-Kautschuk (Acrylester-Kautschuk)
A/C/s	Acrylnitril/Polyestercarbonat-Elastomer/Styrol Copolymer
ACVC	Acrylesterkautschuk + Vinylchlorid
APET	Poly(ethylenterephthalat)-Folie, amorph
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylester
AU	Polyurethan-Elastomer (Urethan-Kautschuk auf Polyester Basis)
BR	Butadien-Rubber (1,4-Polybutadien)
BS	Butadien-Styrol
CA	Celluloseacetat (C2A Cell.diacetat, C3A = Cell.triacetat, auch CTA)
CAB	Celluloseacetobutyrat
CAP	Celluloseacetopropionat
CP	Cellulosepropionat
CR	Chloropren-Kautschuk (Chloropren-Rubber)
EP	Epoxid
EPDM	Ethylen/Propylen/Dienpolymerisat-(Terpolymer) Kautschuk (Ter-Polymer) auch als EPT bezeichnet
EPDM/PP	Ethylen-Propylen-Terpolymer/Polypropylen Copolymer
EPS	Expandierbares Polystyrol
E-PVC	Emulsions-Poly(vinylchlorid)
EU	Polyurethan-Elastomer (Polyether-Urethan-Kautschuk)
E/VAL	Ethylen/Vinylalkohol Copolymer
IIR	Butylkautschuk (Isobuten-Isopren-Rubber)
IR	Isopren-Kautschuk (Isopren-Rubber)
LCP	Liquid-Cristal-Polymer
MBS	Methylacrylat-Butadien-Styrol Copolymer
MF	Melamin-Formaldehyd-Harz
MPF	Melamin-Phenol-Formaldehyd Harz
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (Nitril-Butadien-Rubber)
NCR	Acrylnitril-Chloropren-Kautschuk (Nitril-Chloropren-Rubber)
NR	Naturkautschuk (Cis-1,4-Polyisopren) ((Isopren-Rubber)
PA	Polyamid PA 46, PA6, PA66, PA610, PA11, PA12, PA6/3T, PA6/6T, sowie weitere miteinander kombinierte PA
PAEK	Poly(acryletherketon)
PAN	Poly(acrylnitril)
PAR	Polyacrylat
PB	Polybuten-1
PBT	Poly(butylenterephthalat) (früher PBTP)
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen

PEBA	Polyether(ester)-Block-Amid Copolymere (s.a. TPE-A)
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte (HDPE alte Schreibweise)
PE-HD-HMW	Polyethylen hoher Dichte und hohem Molekulargewicht
PE-HD-UHMW	Polyethylen hoher Dichte und ultrahohem Molekulargewicht
PE-HD-V	Polyethylen hoher Dichte, vernetzt
PE-LD	Polyethylen niedriger Dichte (LDPE alte Schreibweise)
PE-LLD	lineares Polyethylen niedriger Dichte (LLDPE alte Schreibweise)
PE-LD-V	lineares Polyethylen niedriger Dichte, vernetzt
PE-MD	Polyethylen mittlerer Dichte (MDPE alte Schreibweise)
PE-VLD	Polyethylen, mit Vinylacetat niedriger Dichte
PEEK	Poly(etheretherketon)
PEKK	Poly(etheretherketonketon) (Polyaryletherketon)
PEK	Poly(etherketon)
PEKK	Poly(etherketonketon)
PEI	Poly(etherimid)
PET	Poly(ethylenterephthalat), früher PETP
PF	Phenol-Formaldehyd Harz
PI	Polyimid
PIB	Polyisobutylen, auch Polyisobuten (s.a. IM)
PMMA	Poly(methylmethacrylat)
POM	Polyoxymethylen; o. Polyformaldehyd, o. Polyacetal
PP	Polypropylen
PPA	Poly(Phthalamid)
PP-B	Polypropylen-(mittlere Fließfähigkeit) (Blockpolymerisat)
PP-C	chloriertes Polypropylen
PP/EPDM	Polypropylen/Ethylen-Propylen-Dimer Copolymer
PP-H	Polypropylen - (höhere Fließfähigkeit), Homopolymerisat
PP-Q	Polypropylen - hohe Schmelzefestigkeit
PP-R	Polypropylen-Randompolymerisat
PPSU	Poly(phenylensulfon)
PPS	Poly(phenylensulfid)
PS	Polystyrol
PSU	Polysulfon
PTFE	Poly(tetrafluorethylen)
PUR	Polyurethan
PVAC	Poly(vinylacetat)
PVAL	Poly(vinylalkohol)
PVC	Poly(vinylchlorid) (E-PVC = Emulsions-PVC, SPVC SuspensionsPVC, PVC-C = nachchloriertes PVC)
PVC-HI	PVC-hochschlagfest
PVC-P	PVC mit Weichmacher [Plasticiser] (Weich-PVC)
PVC-U	PVC ohne Weichmacher (Hart-PVC)
PVDF	Poly(vinylidenfluorid)
PVF	Poly(vinylfluorid)
SAN	Styrol- Acrylnitril
S/B	Styrol-Butadien
SBR	Styrol/Butadien-Kautschuk (Rubber)
S/B/S	Styrol/Butadien/Styrol Copolymer (s.a. TPE-S)
S/EB/S	Styrol/Ethylen-Butylen/Styrol Copolymer (s.a. TPE-S)
SI, Q	Silicon
S-PVC	Suspensions-Poly(vinylchlorid)

UF Harnstoff-Formaldehyd-Harz

UP Ungesättigte Polyesterharze

Ein großer Teil der obigen Kunststoffe werden auch als Blends angeboten, die aufgrund der Vielzahl nicht aufgeführt werden. Einige Kurzzeichen für Füll- und Verstärkungsstoffe. Diese werden durch einen - getrennt, mit dem % Anteil gekennzeichnet, z. B. PA-GF30 = PA mit 30 % Glasfasern.

Füll- und Verstärkungsstoffe

GF Glasfasern

GB Glaskugeln, -Perlen

GM Glasmatte

GN Glasfaservlies

GR Glasroving

CF Kohlenstofffaser

Weitere Kurzzeichen sind

D Pulver

K Kalziumcarbonat

T Talkum

W Holz

Zusammengestellt von Chem. -Ing. (grad.) Wolfgang Land

17. Vorgehen zum Ermitteln der Kunststoff-Art, aus denen Produkte aus Kunststoffen gefertigt werden, sowie der Eigenschaften der verwendeten Kunststoff-Typen

Basis: /1/ Franck, A.: Kunststoff-Kompendium; Vogel Verlag, Würzburg (das Buch sollte in jedem Unternehmen / Betrieb vorhanden sein; 5 Exemplare in der FH-Bibliothek)

Basis: /2/ Kunststoff-Datenbanken im Internet für alle angebotenen Kunststoffe, d.h. mehr als 50.000 Stück →

<http://www.m-base.de/main/> (CAMPUS-Datenbank) oder

<http://www.ides.com/eplasturgy/german/prospector.asp> (Suchmaschine von Prospector)

Basis: /3/ Kunststoff-Datenblätter der Rohstoffhersteller zu ihren Kunststoff-Typen

Vorgehen der Grobauswahl (wenn zunächst Basiswissen erforderlich ist)

1. Kunststoff-Arten für die Produkte verschiedener Branchen; aus /1/, Tabellen in Abschnitt 1.7
2. Grundeigenschaften der Kunststoff-Arten; aus /1/ Tabellen 11.1 bis 11.23

Vorgehen der Feinauswahl

3. Die heute üblichen Kunststoff-Arten für das Produkt festlegen; (wenn nicht bekannt: aussuchen aus /1/);
4. Rohstoffhersteller und Handelsnamen ermitteln und aussuchen aus /2/;
5. Die gespeicherten Kunststoff-Informationen ausdrucken aus /2/;

6. Rohstoffhersteller anrufen und Informationen einholen und Datenblätter anfordern (kostenlos).