
Zusammenfassung Kunststofftechnik – Einführung und Grundlagen

Semester: WS 2017/18

Prüfer: Prof. Bonten

Inhalt

1. Einleitung	1
1.1. Kunststoff – Werkstoff der Moderne	1
1.2. Einsatzgebiete von Kunststoffen	1
1.3. Kunststoffe und Design	1
2. Grundlagen	2
2.1. Grundlagen der Polymerchemie	2
2.2. Grundlagen der Kraftübertragung	9
3. Kunststoff – Werkstofftechnik	13
3.1. Verhalten in der Schmelze	13
3.2. Verhalten der Festkörper	17
3.3. Beeinflussung durch Zusatzstoffe	22
3.3.1. Verstärkungsstoffe (aktive Zusatzstoffe)	22
3.3.2. Funktions-Zusatzstoffe (hier Additive genannt)	27
3.3.3. Füllstoffe (inaktive Zusatzstoffe)	28
3.4. Einführung in die Kunststoffaufbereitung	28
3.5. Prozess, Struktur, Eigenschaften - Beeinflussung durch den Verarbeitungsprozess	32
3.6. Kurzdarstellung wichtiger Kunststoffe	34
4. Kunststoff – Verarbeitungstechnik	35
4.1. Einführung in die Extrusion	35
4.2. Einführung in das Spritzgießen	42
4.3. Verarbeitung von vernetzenden Formmassen	47
4.4. Einführung in die Technologie der Faserkunststoffverbunde	50
4.5. Weiterverarbeitung	54
5. Produktentwicklung mit Kunststoffen	61
5.1. Einführung in das Konstruieren mit Kunststoffen	61
5.2. Nutzen von Prototypen	65
6. Kunststoffe und Umwelt	66
6.1. Kunststoffabfälle	66
6.2. Sind Kunststoffe „giftig“?	68
6.3. Biopolymere und Biokunststoffe	70

1. Einleitung

1.1. Kunststoff – Werkstoff der Moderne

Epochen der Kunststoffgeschichte:

- Ursprünge (bis 1839)
 - Steinzeitalter: natürliches Harz als Klebemittel verwendet (Biopolymere)
 - Kasein-Kunststoff (sog. Milchstein) zur Herstellung von Schmuckstücken und Alltagsgegenständen
- Epoche der Imitationsstoffe (1839 bis 1914)
 - Bois Durci („gehärtetes Holz“)
 - 1869 Celluloid als Ersatz für teure Naturwerkstoffe z.B. Elfenbein
- Epoche der Ersatzstoffe (ab ca. 1914 bis ca. 1950)
 - Polyvinylchlorid (PVC)
 - 1930er: Polymethylmethacrylat (PMMA; „Plexiglas“), Polystyrol, Polyethylen, Polyamid, Nylon, ...
 - Styropor
- Epoche der Werkstoffe mit neuen Eigenschaften (ab ca. 1950)
 - kaum mehr neue Polymere erfunden, sondern Variationen der bereits bekannten Polymere → mithilfe von Zusatzstoffen für die jeweilige Anwendung modifiziert

1.2. Einsatzgebiete von Kunststoffen

Mobilität

- Leichtbau

Bauwesen

- Dübel, Schläuche, Platten, ...

Verpackungen

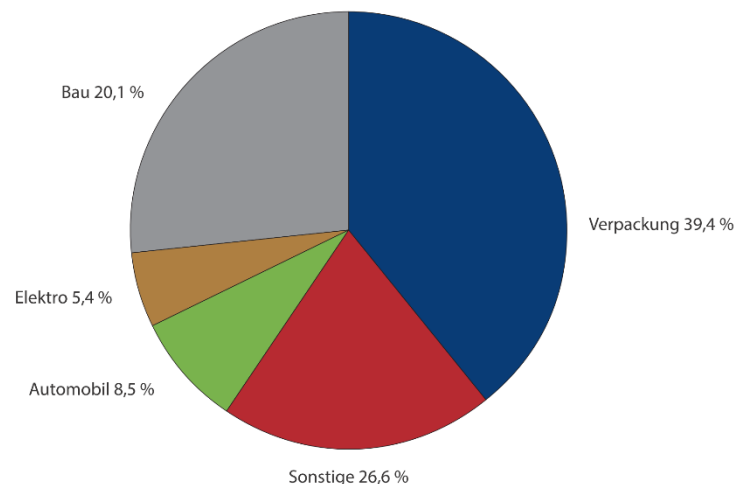
- Folien, Kunststoffflaschen

Medizintechnik

- Zentralvenöser Katheter, Aortenimplantat, biologisch resorbierbare Implantate aus Polylactid

Leichtbau im Personentransport

- Größtes Einsatzgebiet: leichte Lebensmittelverpackungen → Folien, Kunststoffflaschen



Dilemma: Zum einen soll das Produkt möglichst schnell nach Gebrauch wieder verschwinden (Verpackung), zum anderen soll es so lange wie möglich gebrauchstauglich sein (Bauwesen).

1.3. Kunststoffe und Design

Imitation:

- Früher wie auch mit modernen Kunststoffen ist es möglich, viele andere hochwertige Werkstoffe optisch und teils auch haptisch zu imitieren und hieraus kostengünstig Produkte herzustellen → „Chamäleon der Werkstoffe“
- Neben geringem Gewicht und geringen Baukosten: einfärbbar!
→ Designer mögen besonders, dass Kunststoffe sich einfärben lassen, was mit kaum einem anderem Werkstoff möglich ist

- hohe Formgebungsvielfalt und dadurch Gestaltungsfreiheit

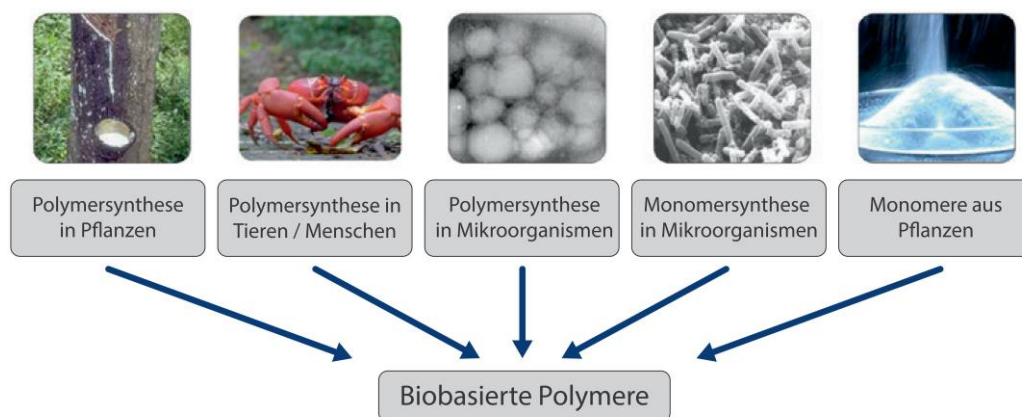
2. Grundlagen

2.1. Grundlagen der Polymerchemie



Herkunft der Monomere

- seit Ende des 2. Weltkriegs ist Erdöl Ausgangsstoff für die Polymerchemie; in Raffinerie entsteht als Nebenprodukt auch **Naphtha** – dieses dient zur Herstellung von Ethen und Propen (= Ethylen und Propylen)
→ Nebenstoffe wie Gas, Benzine, Heizöl, Bitumen, Koks und Schwefel auch wichtig für Monomergewinnung
- Nachwachsende Rohstoffe verwenden wird wichtiger, z.B. Biopolymere aus Gummibaum, Chitin, Mikroorganismen und Biomonomere aus Pflanzen und Mikroorganismen
- aus wenigen Ausgangsstoffen (Erdöl, Erdgas, Steinsalz, Schwefel, Wasser und Luft) können ca. 30 bedeutende Monomere hergestellt werden



→ außerdem sehr viele glukosebasierte Polymere!

Polymersynthese

	Reaktionsart	Beispiele
Polymerisation	Kettenwachstumsreaktion, bei der ungesättigte Moleküle (Monomere) zu Makromolekülen (Polymeren) verknüpft werden. Bsp.: radikalische und ionische Polymerisation	Polyethylen (PE), Polyvinylchlorid (PVC)
Polykondensation	Stufenwachstumsreaktion, bei der Makromoleküle unter Abspaltung von Nebenprodukten (z.B. Wasser, Alkohol, Chlorwasserstoff, Ammoniak) entstehen.	Polyamid (PA), Polycarbonat (PC)
Polyaddition	Stufenwachstumsreaktion, bei der Makromoleküle durch „Addition“ ohne Abspaltung von Nebenprodukten gebildet werden.	Polyoxymethylen (POM), Polyurethan (PU)

a) Polymerisation

Bsp.: Radikalische Polymerisation

- Kettenstart:
Radikalbildner (=Initiator) liefert Radikale (= Moleküle mit freiem/ungepaartem Elektron), welche die C=C-Doppelbindung in den Monomeren (z.B. Ethen) angreifen.
Initiator schnappt sich ein Elektron dieser Doppelbindung und geht eine Bindung mit dem Monomer ein.
- Kettenwachstumsreaktion:
Monomer wird auf diese Weise selbst zum Radikal und geht deshalb mit dem benachbarten Monomer eine Bindung ein etc. Die Molekülkette wird immer länger.
- Ende: häufig durch Rekombination (zwei Radikale gehen eine chemische Bindung ein)
- Länge hängt von Initiatorkonzentration ab → mehr Initiator am Anfang führt zu kürzeren Ketten
- Monomer definiert sich über Substituenten (z.B. Chlorethen = Vinylchlorid)
- Katalysatoren: führen zu Polymeren mit besonders regelmäßiger Struktur → koordinative Polymerisation, z.B. Ziegler-Natta-Katalysatoren und Metallocen-Katalysatoren

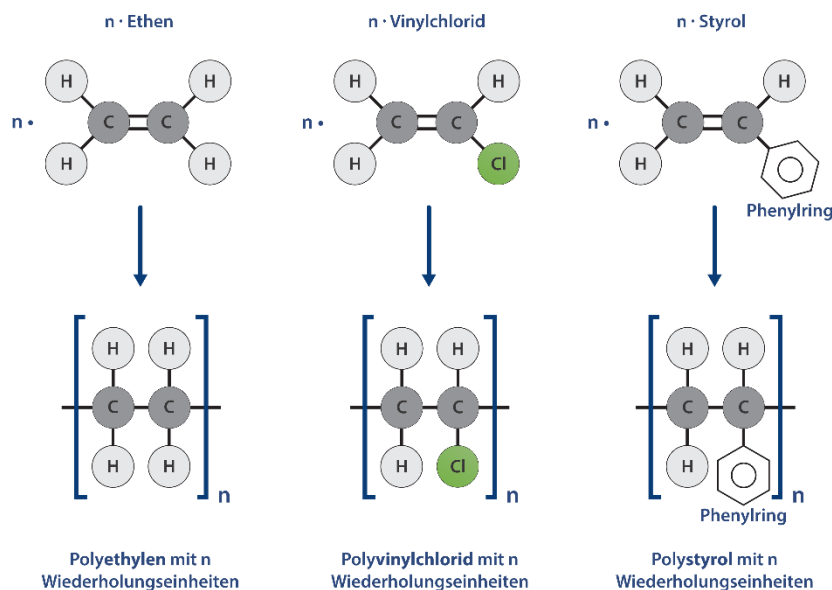
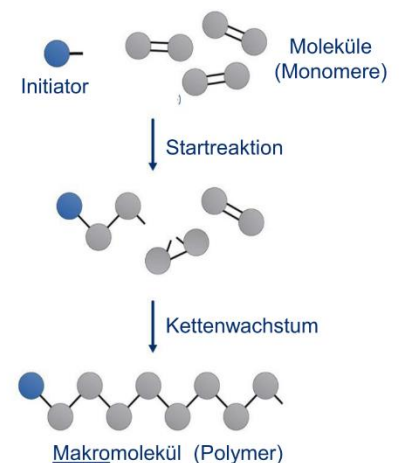
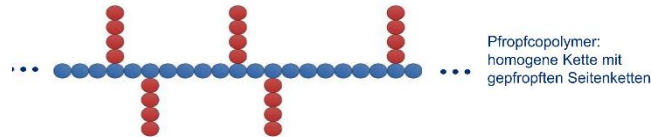


Bild 2.5 Strukturformeln verschiedener Monomere und daraus gebildeter Polymere

Sonderfall **Copolymerisation**:

- Einbau von zwei oder mehreren Monomeren in ein Polymer → dessen Eigenschaften können verändert werden, z.B. Steifigkeit, Schlagzähigkeit oder Transparenz
- **Pfropfcopolymere**: Polymere mit einer homogenen Hauptkette, auf die kürzere Seitenketten einer anderen Monomersorte aufgepfropft sind

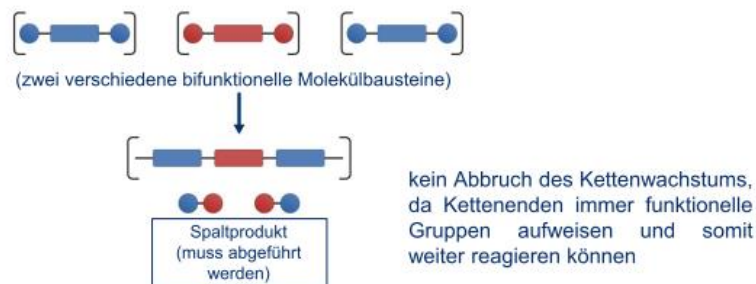


→ nicht zu verwechseln mit Polymerblends (= Polymermischungen)!

b) **Polykondensation**

- Stufenwachstumsreaktion mit Spaltprodukt
- Moleküle mit reaktionsfähigen, funktionellen Gruppen reagieren miteinander zu einem Polymer → dabei entstehen niedermolekulare Spaltprodukte (Nebenprodukte), die abgeführt werden müssen, z.B. Wasser, Ammoniak, Chlorwasserstoff
- Werden Nebenprodukte nicht abgeführt, ist der Reaktionsablauf unterbrochen
- Es können auch zwei lange Ketten miteinander reagieren, dies führt im Gegensatz zu Polymerisation nicht zum Kettenabbruch, es müssen nur noch funktionelle Gruppen vorhanden sein

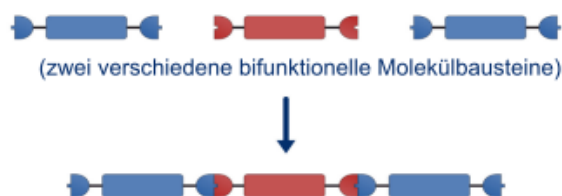
Bsp.: Reaktion von Amin und Carbonsäure zu Polyamid unter Abspaltung von Wasser



c) **Polyaddition**

- Stufenwachstumsreaktion ohne Spaltprodukt
- Kopplung der reaktiven Monomere entsteht durch Platzwechsel von Atomen (z.B. H-Atome), die sich relativ leicht aus der Endgruppe entfernen lassen

Bsp.: Reaktion von bifunktionellem Isocyanat mit einem bifunktionellen Alkohol zu Polyurethan



Bindungskräfte und Brown'sche Molekularbewegung

Metallische Bindungen

- Gitter aus positiv geladenen Metallionen (Atomrümpfe) + freie Elektronen
- es gibt frei bewegliche delokalisierte Elektronen im Metallgitter
- Valenzelektronen der Metalle (in der äußersten Schale) sind nur schwach gebunden und können leicht abgetrennt werden

Atombindung

- Chemische Bindung, meist zwischen Nichtmetallen: bindendes Elektronen, das von zwei Valenzelektronen gebildet wird
- Hat eine Wirkungsrichtung („gerichtet“) → bestimmt geom. Struktur einer Verbindung
- Chemische Reaktion = Knüpfen oder Trennen einer Atombindung

Oktettregel

- Wenn Atome eine voll besetzte Außenschale haben (acht Valenzelektronen), dann bezeichnet man dies als Edelgaskonfiguration. Ein optimaler Zustand ist erreicht.
- Edelgase: 8 Valenzelektronen, voll besetzte Außenschale, reaktionsträge
- Alle übrigen Atome: < 8 Valenzelektronen
 - Geben Valenzelektronen ab oder nehmen Valenzelektronen auf, um voll besetzte Außenschale zu bekommen.
 - Reaktionsfreudig
- Oktettregel: Alle Elemente sind bestrebt, eine voll besetzte Außenschale zu haben und dadurch den Edelgaszustand zu erreichen.
- An Platzierung der Atome im Periodensystem kann erkannt werden, wie viel Außenelektronen abgegeben oder aufgenommen werden, d. h. wie hoch die Bindigkeit eines Atoms ist.

Bindungskräfte
Bindigkeit der Elemente – Die Oktettregel

IKT KUNSTSTOFF
TECHNIK
STUTTGART

Beispiel	Hauptgruppe (HG) im Periodensystem	Anzahl der Abgabe/ Aufnahme von Valenzelektronen	Bindigkeit	Symbol
H-Atom	1. HG	gibt 1 Valenzelektron ab	einbindig	— H
C-Atom	4. HG	nimmt 4 Valenzelektronen auf	vierbindig	$\begin{array}{c} \\ - C - \\ \end{array}$
N-Atom	5. HG	nimmt 3 Valenzelektronen auf	dreibindig	$\begin{array}{c} \\ - N - \end{array}$
O-Atom	6. HG	nimmt 2 Valenzelektronen auf	zweibindig	— O — = O
Halogen-Atom	7. HG	nimmt 1 Valenzelektron auf	einbindig	— F — Cl

Bindungsenergie:
40 - 800 kJ/mol

Prof. Dr.-Ing. Christian Bortner

39

Hauptvalenzbindungen

- **Innermolekulare** chemische Bindungskräfte
- Atombindungen sind solche
- Verbinden die Atome in Polymerketten

Nebenvaleanzbindungen

- **Intermolekulare** physikalische Bindungskräfte
- Beschreiben Art und Größe der zwischen den Polymerketten bestehenden Anziehungskräfte → 10-100x schwächer als Hauptvalenzbindungen
- Polymerketten sind so lang → bilden watteartigen Strukturen
- Dipol-Dipol-Kräfte aufgrund von Elektronegativität, Voraussetzung: permanente Dipole
- Wasserstoffbrückenbindungen: Spezialfall der Dipol-Dipol-Bindung → entstehen über ein Wasserstoffatom, das kovalent an ein elektronegativeres Atom (z. B. O, N, F) gebunden ist und dessen gemeinsame Elektronen in Richtung dieses Atoms verschoben werden
- Induktionskräfte
- Dispersionskräfte (=Van-Der-Waals) aufgrund von momentanen Dipolen

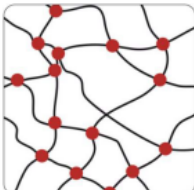
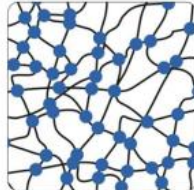
Mechanismen der Erstarrung

Erstarrung = „Übergang vom flüssigen in den festen Aggregatzustand“

→ Dieser erfolgt bei chemisch einheitlichen Werkstoffen beim Unterschreiten der druckabhängigen Erstarrungstemperatur. Das Erstarren von Stoffen, die unter Normbedingungen flüssig sind, nennt man Gefrieren.“

→ Erstarrung ist bei manchen Polymeren irreversibel

Unterteilung der Polymere

Thermoplast	Elastomer	Duromer
unvernetzt	schwach chemisch vernetzt	stark chemisch vernetzt
schmelzbar	nicht schmelzbar	nicht schmelzbar
löslich	nicht löslich, aber quellbar	nicht löslich, fast nicht quellbar
Eigenschaften von Temperatur abhängig	nachgiebig, hohe Dehnbarkeit, elastisch	steif, geringe Dehnbarkeit, elastisch
		

Löslichkeit

- bei Thermoplasten: Lösungsmittel diffundiert zwischen die Ketten, weitet deren Abstand und schwächt die Nebenvaleanzkräfte
- bei Elastomeren: Netz für manche Lösungsmittel durchdringbar, es gibt jedoch chemische Vernetzung! → quellbar
- bei Duromeren: stark vernetzt mit chemischen Bindungen!!

Thermoplastische Elastomere (TPE)

- dehnfähig, fast wie Elastomere UND thermoplastisch verarbeitbar
- können aus geschickt aufgebauten Blockcopolymeren bestehen oder aus Mischungen (Blends) festerer, steiferer Mischungspartner und weicherer Mischungspartner
- Blockcopolymere haben Hart- und Weichsegmente → Hartsegmente kristallisieren teilweise (Domäne), Weichsegmente sorgen für Dehnbarkeit

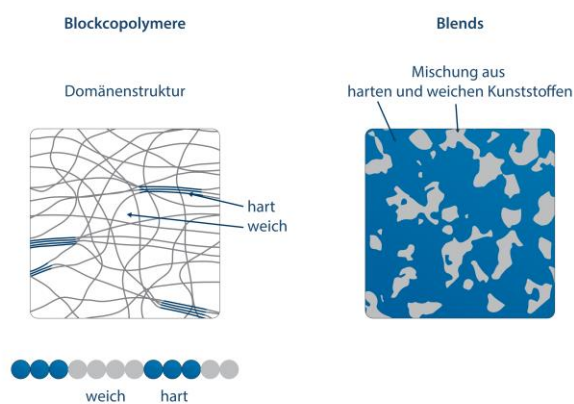


Bild 2.22 Morphologie der Thermoplastischen Elastomere

Primärstruktur von Polymeren

- Beschreibt den strukturellen Aufbau (Konstitution) eines Polymers und die räumliche Anordnung der Atome (Konfiguration) innerhalb des Polymers.
- Beeinflusst die chemischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften.
- Besonders durch die Konfiguration werden die weiteren Strukturen beeinflusst, welche ebenfalls einen großen Einfluss auf die Eigenschaften haben.

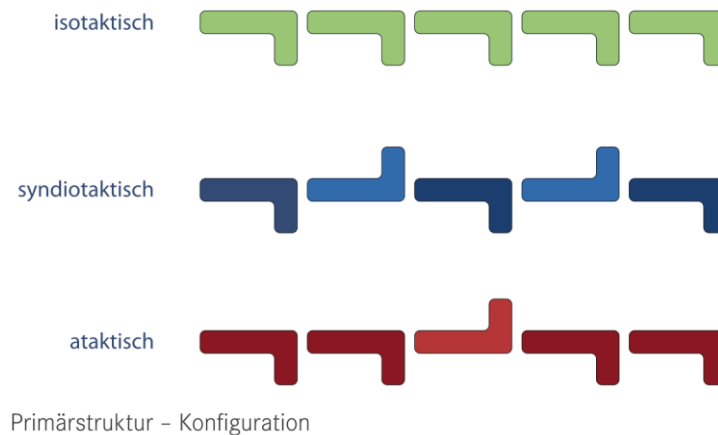
Konstitution

- = chemisches Aufbauprinzip eines Moleküls aus den Atomen
- Art der Kettenatome, Länge, Art der Aneinanderreihung, Art der Endgruppen und Substituenten, Länge der Verzweigungen

Bsp.: Kettenmoleküle können verzweigt oder linear sein

Konfiguration

- räumliche Anordnung der Atome und Atomgruppen im Molekül der gleichen Konstitution
- **Taktizität:** Anordnung der Substituenten im Raum



Sekundär- und Tertiärstruktur von Polymeren

Sekundärstruktur

- Beschreibt die Anordnung von Kettensequenzen und die geometrische Form eines einzelnen Makromoleküls.
- Wird durch die sog. **Konformation** beschrieben
 - = genaue räumliche Anordnung eines Polymeren mit definierter Konstitution und Konfiguration
 - entsteht durch Rotationen um Bindungsachsen von Einfachbindungen
- C-C-Einfachbindung hat weitestgehend freie Drehbarkeit! → Polymer mit Doppelbindungen ist eher steif!



Tertiärstruktur (Überstruktur)

- übergeordnete räumliche Anordnung von Polymerketten untereinander, d. h. die dreidimensionale Anordnung der Ketten, Knäuel, Helices etc.
- Beispiele: amorphe Polymere, teilkristalline Polymere.

Amorphe Strukturen

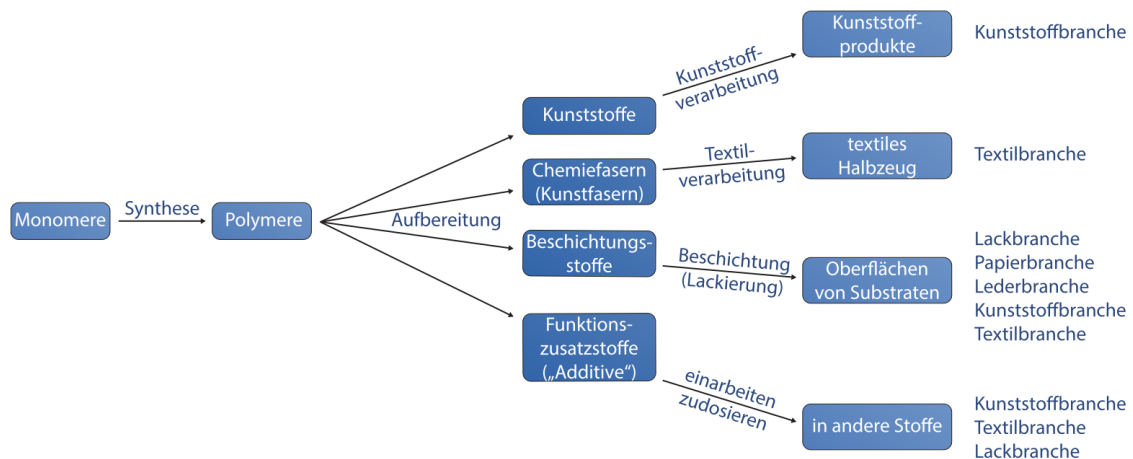
- Besitzen nur Nahordnung, keine Fernordnung
- Makromoleküle ungeordnet nebeneinander
- Erscheinen transparent
- Bsp.: PS, SAN, PVC, PMMA

Kristalline Strukturen

- Struktur der Makromoleküle über einen großen Bereich regelmäßig aufgebaut
- Es dürfen keine „sperrigen“ Substituenten vorhanden sein, die das Aneinanderlagern verhindern
- je weniger „sperrig“ die Fadenmoleküle sind, desto mehr kristalline Bereiche können sich bilden, d.h. desto höher ist der Kristallisationsgrad.
- Mit zunehmendem Kristallisationsgrad steigen u. a. Dichte, Steifigkeit und Festigkeit.
- hohe Nebervalenzkräfte, besitzen Fernordnung!
- teilkristalline Polymere mit amorphen und kristallinen Bereichen
- erscheinen trüb, da die Phasengrenzen zwischen den Bereichen das Licht brechen
- Bsp.: PE, PP, PA, POM

Polymere – Rohstoff nicht nur für Kunststoffe

- Polymere in der Natur: Proteine, Spinnenseide, Baumwolle, Haare, DNS, Zellulose, Stärke, Chitin, Holz
- Kunststoffe = Werkstoffe für die Herstellung von flachen oder 3D-Bauteilen. Hierfür werden Polymere mit Zusatzstoffen zu Kunststoffen aufbereitet.
- Rohstoffe für:
 - Chemie- und Naturfasern: Monofilamente aus aufbereiteten Polymeren mit anderen Zusatzstoffen
 - Beschichtung von Oberflächen (Lacke, Klebstoffe)
 - Funktionszusatzstoffe („Additive“)



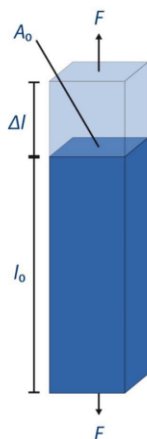
2.2. Grundlagen der Kraftübertragung

Wichtige Begriffe

- **Festigkeit** eines Werkstoffes (Widerstand gegen Rissbildung):
Ein Kunststoff kann aufgrund von Primär-, Sekundär- und Tertiärstruktur der Polymerketten sowie durch Beimischung und Ausrichtung von Zusatzstoffen mehr oder weniger Kraft übertragen. Ist der Widerstand gegen Rissbildung hoch, gilt der Werkstoff als „fest“.
- **Steifigkeit** eines Werkstoffes (Widerstand gegen Verformung):
Aufgrund von Primär-, Sekundär- und Tertiärstruktur der Polymerketten sowie durch Beimischung und Ausrichtung von Zusatzstoffen geben Kunststoffe einer aufgeprägten Beanspruchung mehr oder weniger nach. Ist der Widerstand gegen Verformung hoch, ist der Werkstoff „steif“. Ist der Widerstand gegen Verformung niedrig, ist der Werkstoff „nachgiebig“ oder umgangssprachlich „weich“.
- **Zähigkeit** (Energieaufnahmefähigkeit)
Aufgrund von Primär-, Sekundär- und Tertiärstruktur der Polymerketten sowie durch Beimischung und Ausrichtung von Zusatzstoffen kann ein Werkstoff höhere Energie durch hohe Kraftaufnahme und/oder durch hohe Verformbarkeit aufnehmen.

Wichtige Begriffe
Begriffe der Mechanik

IKT KUNSTSTOFF
TECHNIK
STUTT GART



Spannung: $\sigma = \frac{F}{A_0}$

F = Kraft, die auf eine Probe wirkt

A_0 = Querschnittsfläche des Probenkörpers vor der Belastung

Dehnung: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

Δl = Längenänderung der Probe in Belastungsrichtung

l_0 = (Anfangs-)Bezugslänge

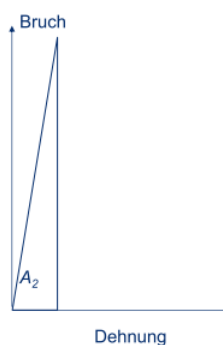
Steifigkeit: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

E = Elastizitätsmodul

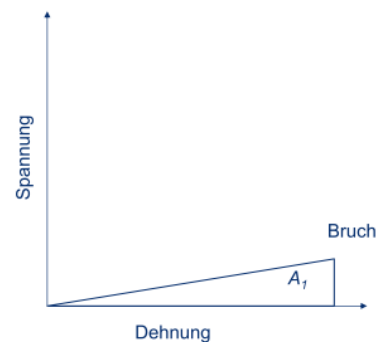
Beschreibung der Dehnfähigkeit von Werkstoffen

- **Spröder Werkstoff:** geringe Dehnfähigkeit
- **Duktiler Werkstoff:** stark dehnbarer Werkstoff, ≠ zäh!

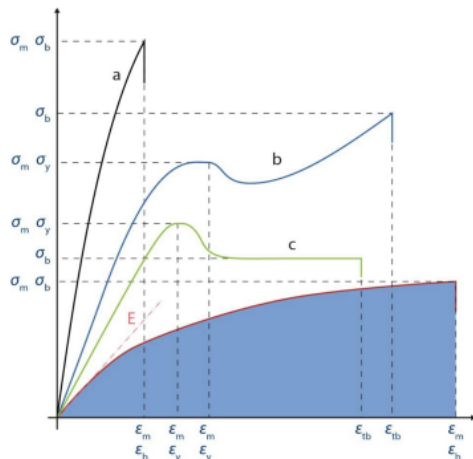
→ hohe Zähigkeit kann auch durch eine hohe Kraftaufnahme ohne starke Verformung („spröde“) erzielt werden!



spröde = geringe Dehnbarkeit



duktil = hohe Dehnbarkeit



Bezeichnungen nach
DIN EN ISO 527-1:2012

Details in der Vorlesung
„Verhalten als Festkörper“

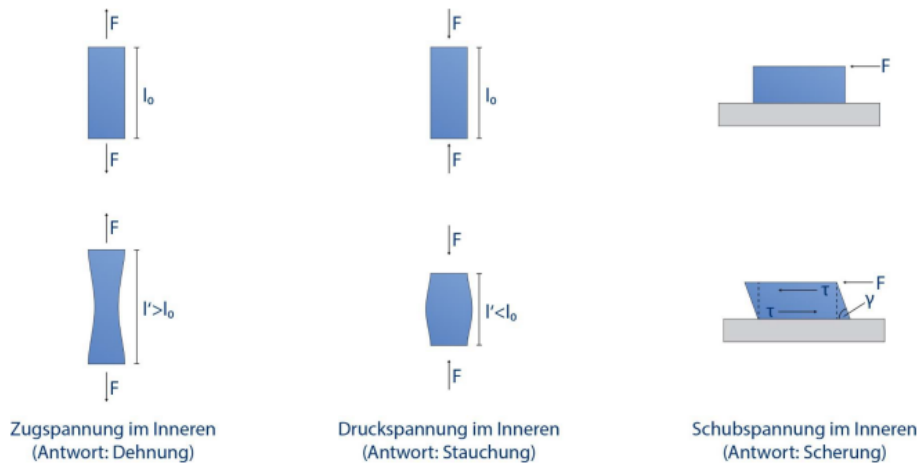
σ_m ... Zugfestigkeit
 σ_b ... Bruchspannung
 σ_y ... Streckgrenze

ϵ_m ... Dehnung bei Zugfestigkeit
 ϵ_b ... Bruchdehnung
 ϵ_y ... Streckdehnung
 ϵ_{tb} ... nominelle Bruchdehnung

Kurve a: sprödes Verhalten
Kurve d: duktiles Verhalten

Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten

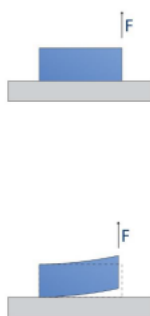
10



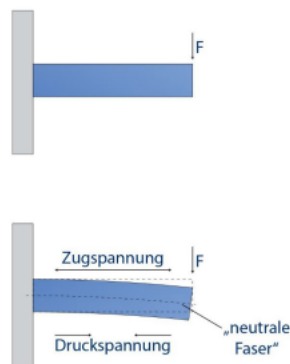
Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten

11

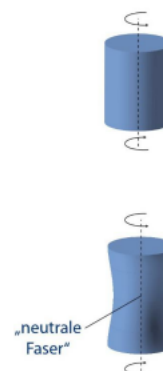
Schälbeanspruchung



Biegebeanspruchung



Torsionsbeanspruchung



Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten

12

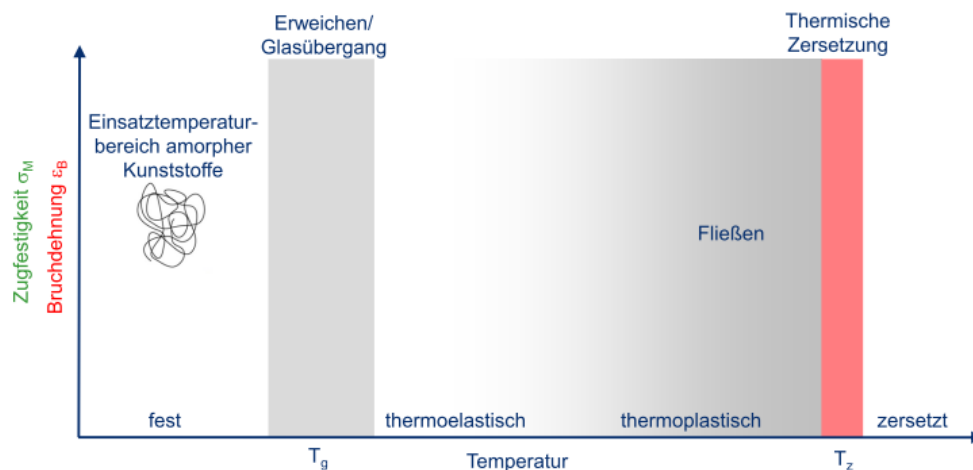
Zustandsbereiche von Kunststoffen

Brown'sche Molekularbewegung

- Molekülbewegung korreliert mit absoluter Temperatur [K]
→ Auch Makromoleküle „schwingen“ stärker bei höheren Temperaturen.
- Mittlerer Schwingungsabstand der Ketten erhöht sich bei höheren Temperaturen.
→ geringere Nebenvalenzkräfte → Möglichkeit des aneinander Abgleitens der Molekülketten
- Bei tiefen Temperaturen hingegen sind Molekülketten „eingefroren“.

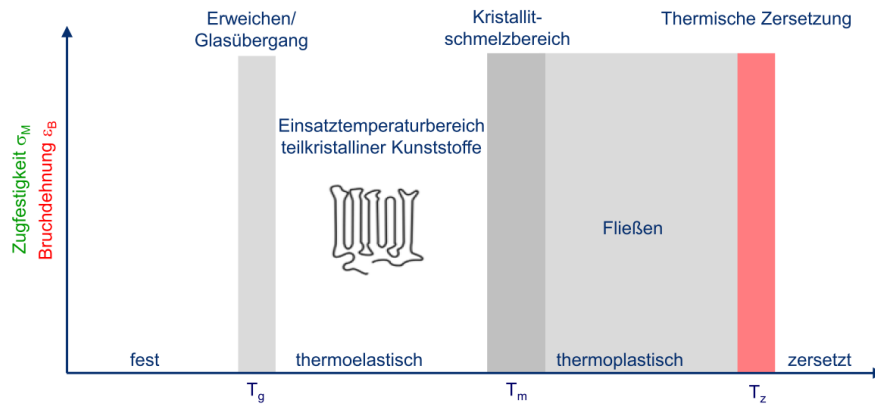
Amorphe Polymere - Glasübergangstemperatur T_g

- Glasübergang = Erweichen der amorphen Molekülstrukturen aufgrund zunehmender Brown'scher Molekülbewegung bei Erwärmung
- Thermoplast: Übergang von spröde-steif zu elastisch-nachgiebig („thermoelastisch“) und schließlich zu plastisch-nachgiebig („thermoplastisch“)
- Kunststoffe aus amorphen Polymeren werden i.d.R. **unterhalb der Glasübergangstemperatur eingesetzt** (bessere Festigkeiten!)



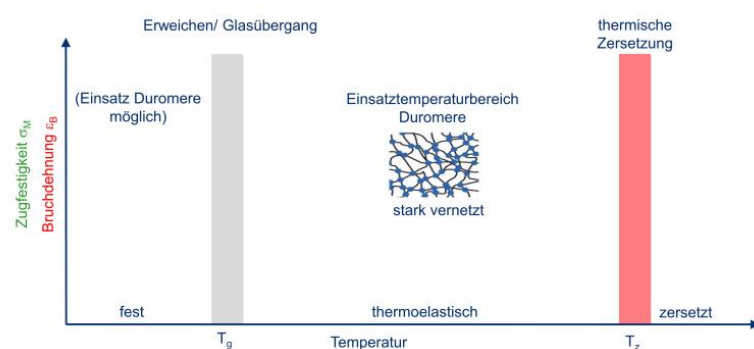
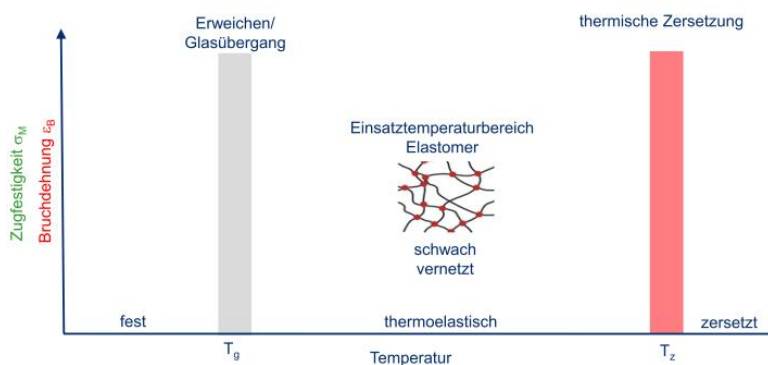
Kristalline Bereiche - Kristallitschmelztemperatur T_m

- Kristalline Bereiche eines teilkristallinen Polymers ermöglichen hohes Festigkeitsniveau über Glasübergang hinaus!
- Brown'sche Molekülbewegung dann derart groß, dass auch die eng gepackten, kristallinen Bereiche eines teilkristallinen Thermoplasten beweglich werden und aneinander abgleiten
- Übergang von fest in den Schmelzustand
- Kunststoffe aus teilkristallinen Polymeren werden i.d.R. **oberhalb der Glasübergangstemperatur und unterhalb der Kristallitschmelztemperatur** eingesetzt
→ höhere Dehnfähigkeit wg erweichter amorpher Bereiche, aber hohe Festigkeit der Kristalle



Vernetzte Polymere

- Elastomere: oberhalb von T_g eingesetzt, liegen bis zur Zersetzungstemperatur fest vor und weisen keinen thermoplastischen Bereich auf
- Duromere: T_g deutlich höher als bei Elastomeren, deshalb schwierig zu erreichen, obwohl Einsatz oberhalb von T_g wünschenswert
 → Auch Duromere können ohne starke Eigenschaftsänderungen über einen sehr weiten Temperaturbereich eingesetzt werden und liegen bis zur Zersetzung im festen Zustand vor.



Kunststoff und Kunststofftechnik – Begriffsbestimmung

Kunststoffe

- Es existiert kein genormter Begriff, $\neq$ Polymer (Rohstoff, welcher erst in Kombination mit entsprechenden Zusatzstoffen zum Kunststoff wird)
- Definition nach Bonten:
**„Kunststoffe sind Werkstoffe, die aus Polymeren und Zusatzstoffen bestehen.
 Polymere sind Makromoleküle natürlichen oder petrochemischen Ursprungs.“**
 → Fasern, Beschichtungsstoffe und Polymere als Additive demnach keine Kunststoffe

Kunststofftechnik

- Wechselwirkungen zwischen Werkstoff, Verarbeitungsprozess und Konstruktion, um hieraus Machbarkeit und Gebrauchseigenschaften abzuleiten
- Inhalt kunststofftechnischer Tätigkeit: nicht nur Bauteile und Halbzeuge aus Kunststoff, sondern auch die (...) erforderlichen Maschinen, Verfahren und Entwicklungsprozesse.

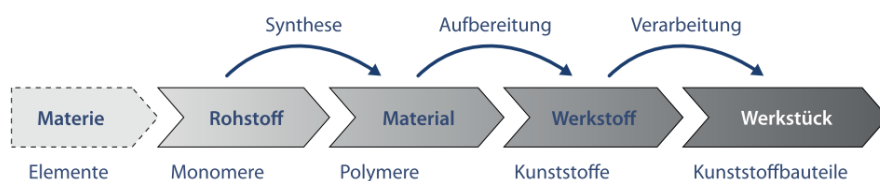
3. Kunststoff – Werkstofftechnik

3.1. Verhalten in der Schmelze

Einführung

Unterscheidung Material und Werkstoff

- „werken“ (altdeutsch): Mit dem Werkstoff wird gearbeitet
- Material (von „Materie“) ist näher an den Elementen.
- Durch Aufbereitung werden Materialien zu Werkstoffen.
- Werkstoffe werden zu „Werkstücken“ (Produkte/Bauteile)
- für Kunststoffe:
Monomere werden zum Material „Polymer“ synthetisiert
Durch Aufbereitung von Polymeren mit Zusatzstoffen entsteht der Werkstoff „Kunststoff“
Durch Verarbeitung werden dann Werkstücke aus Kunststoff hergestellt.



Aufbereitung und Verarbeitung

- immer im Schmelzzustand
- **Rheologie** = Wissenschaft des Verformungs- und Fließverhaltens von Stoffen
- Duromere und Elastomere nicht wieder aufschmelzbar, daher Aufbereitungs- und Verarbeitungsschritt in einem Schritt!

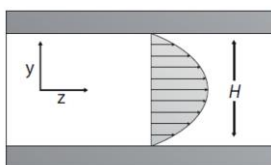
Strömungsmechanische Grundlagen

Fließfähige Medien

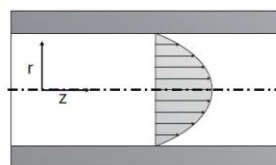
- sind ohne Strukturänderung (Konstitution und Konfiguration) permanent deformierbar
→ Thermoplastische Polymerketten gleiten unter Krafteinwirkung voneinander ab und bauen die Belastung durch die Werkstoffantworten Scherung, Dehnung und Stauchung wieder ab

Eindimensionale Strömungen

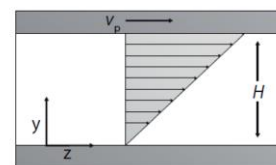
- Polymerschmelzen während Verarbeitung unterliegen meist Scherströmungen
 - Wegen der Wandhaftung bildet sich über dem Kanalquerschnitt ein Geschwindigkeitsprofil aus
 - Relativgeschwindigkeiten über dem Kanal sorgen für Schubbelastung an Volumenelementen → Schmelze wird geschert.
 - Schergeschwindigkeit ist an der Kanalwand am größten.
In der Kanalmitte der Rohrströmung (links) ist die Schergeschwindigkeit = 0.



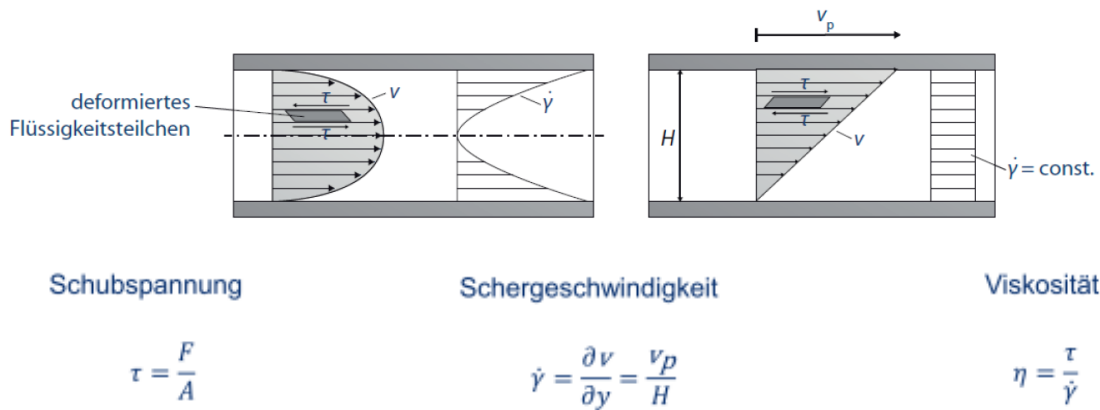
Spaltströmung



Rohrströmung

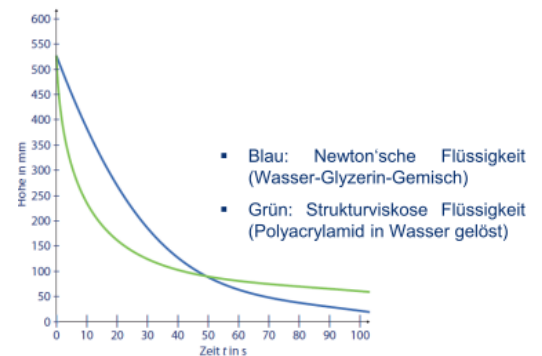
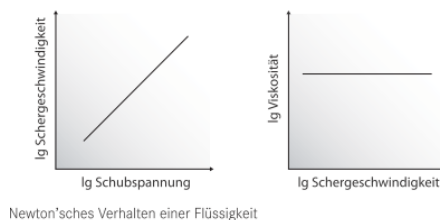


Schlepplströmung
im Zwei-Platten-Modell

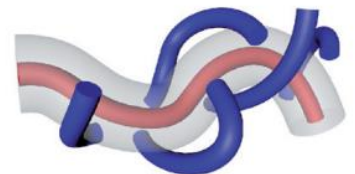
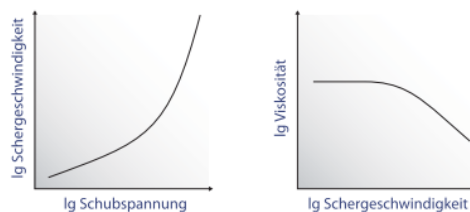


Strukturviskosität

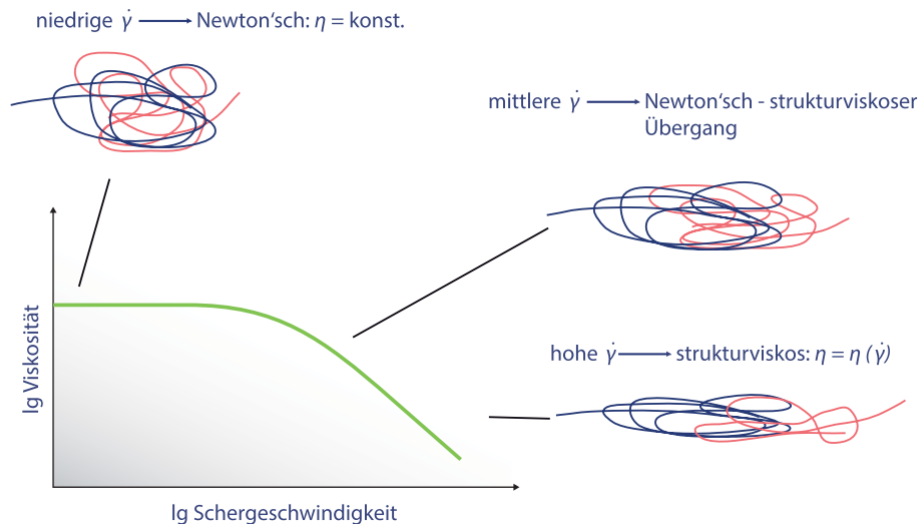
- Newton'sche Fluide (z.B. Wasser, Honig):
 - Schergeschwindigkeit und Schubspannung verhalten sich linear zueinander
 - Viskosität ist konstant



- Strukturviskose Fluide (z.B. Blut, Polymerschmelzen):
 - Schergeschwindigkeit und Schubspannung verhalten sich nicht linear zueinander
 - Bei steigender Schubspannung steigt die Schergeschwindigkeit überproportional stark an
 - Das strukturviskose Fluid wird also dünnflüssiger bei hoher Schergeschwindigkeit
 - Viskosität nimmt demnach mit steigender Schergeschwindigkeit ab



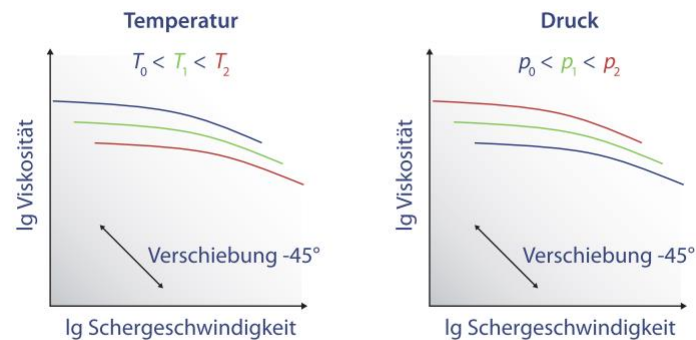
- Molekulare Erklärung: Reptationsmodell von de Gennes
 - Polymerketten in der Schmelze ungeordnet und verschlauft wie Kabelgewirr
 - Bewegungsmöglichkeiten der Polymerkette (rot) durch umgebende Verschlaufungen (blau) beschränkt
 - Mit zunehmender Temperatur wird die Beweglichkeit jeder einzelnen Polymerkette erhöht und somit auch der jeweilige Bewegungsradius. Folglich sinkt die Viskosität mit steigender Temperatur.
 - Mit zunehmender Deformation treten Entschlaufungen auf, die den Röhrenradius und damit den Bewegungsradius vergrößern und folglich zu überproportionaler Reduzierung der Viskosität führen



Einflüsse auf das Fließverhalten

Temperatur und Druck

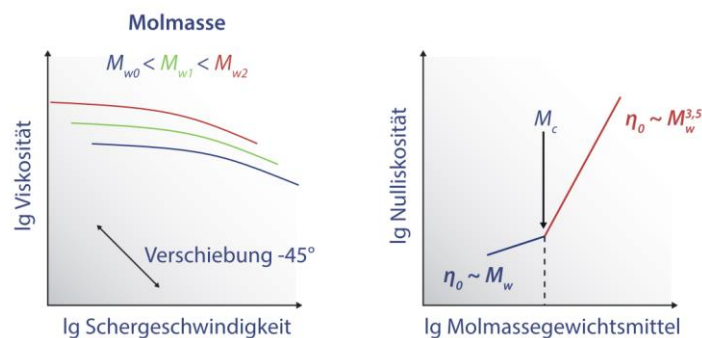
- Höhere T lässt Polymerketten leichter aneinander abgleiten → charakt. Viskosität verschiebt sich zu geringeren Werten → Kurve um -45° verschoben
- Bei höherem Druck werden die Molekülketten enger aneinander gedrückt → Viskosität steigt (höhere Werte) → Kurve um -45° verschoben



Einfluss von Temperatur und Druck auf den Viskositätsverlauf

Molmasse

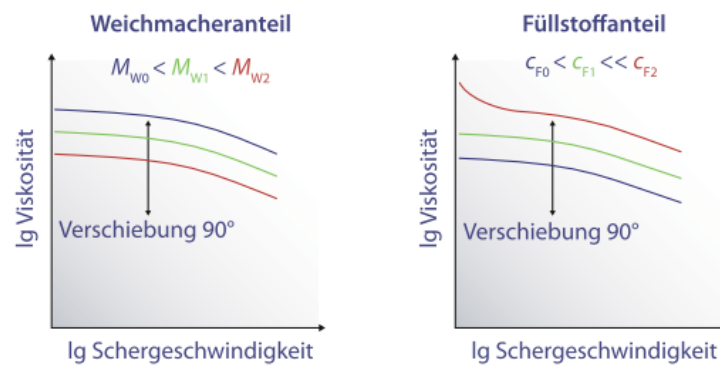
- Sofern die Polymerkette lang genug ist, also ein wirkliches Makromolekül ist („kritische Molmasse“), wird die Viskositätskurve ebenfalls um -45° verschoben
- Weil: je länger Molekülkette, desto größer auch ihr Fließwiderstand. Je kürzer Molekülkette (allerdings ohne eine kritische Grenze zu unterschreiten), desto geringer ist Fließwiderstand.



Viskositätsabhängigkeit von der Molmasse

Zusatzstoffe

- Weichmacheranteil: sollen sich zwischen die Polymerketten setzen und die Nebenvaleanzkräfte schwächen → auch Schmelze wird nachgiebiger und dehnfähiger → Ketten gleiten besser ab, Verschiebung um 90° nach unten
- Füllstoffanteil: steigt dieser Anteil, wird die Fließfähigkeit reduziert → Verschiebung um 90° nach oben
 - Ein besonderer Zustand tritt ein, wenn der Füllstoffanteil sehr hoch wird. Dann kann bei geringer Schergeschwindigkeit der Fließwiderstand extrem ansteigen und ein Fließen blockieren (sogenannte Fließgrenze; Beispiel: Zahnpasta tropft nicht aus der Tube).

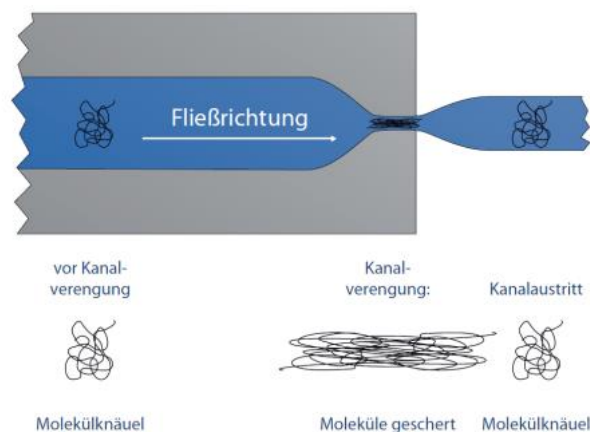


Einfluss von Zusatzstoffen auf die Viskositätskurve

Strangaufweitung und Schrumpf

Strangaufweitung

- Wird Schmelze durch Verengung (z.B. Düse) gedrückt, werden Polymerketten in Fließrichtung geschert.
- Ausrichtung teilweise durch Valenzwinkeländerungen (elastisch) und teilweise durch Platzwechsel der Molekülketten (plastisch)
- Elastische Anteile stellen sich sofort nach Austritt aus Düse zurück



- Bei Kunststoffverarbeitung (z.B. Spritzgießen) verstreckte Molekülketten werden beim Abkühlen als Orientierungen eingefroren → diese können bei transparenten Kunststoffen im polarisierten Licht mit sogenannten Polfiltern sichtbar gemacht werden.
- Die durch die Fließvorgänge eingebrachten, eingefrorenen Molekülorientierungen stellen sich unter Temperatur und/oder Zeiteinfluss wieder zurück. Diese Rückstellung nennt man auch Memory-Effekt.

Schrumpf

- Ausnutzen des Memory-Effekts
- Messung des Schrumpfs dient der Abschätzung des Orientierungsgrades.
- Im Gegensatz zu Schwindung bleibt bei Schrumpf das Volumen konstant, nur die Form wird geändert → ausschließlich Rückstellung von Orientierungen

3.2. Verhalten der Festkörper

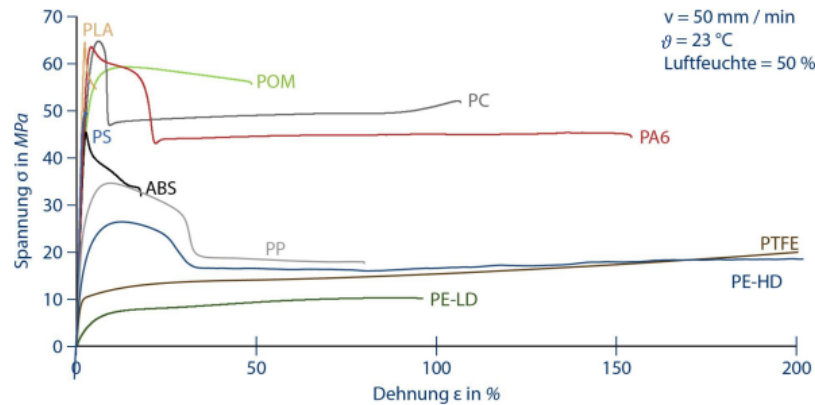
Zugversuch

- Messung der mechanischen Eigenschaften
- „quasistatisch“: gegenüber realer Belastung eher langsam belastet
- sich einstellende Kraft wird über Kraftmessdose erfasst, sich einstellende Dehnung wird über Extensometer sehr exakt gemessen
- Temperatureinfluss kann gemessen werden

Eigenschaften

- sehr präzise
- Zugbeanspruchung (einachsiger Spannungszustand)
- Für alle Kunststoffe anwendbar
- Kennwerte: E-Modul, Zugfestigkeit, Dehnungen, ...
- + verbreitetes Prüfverfahren
- + universell einsetzbar
- - eher geringe Prüfgeschwindigkeit

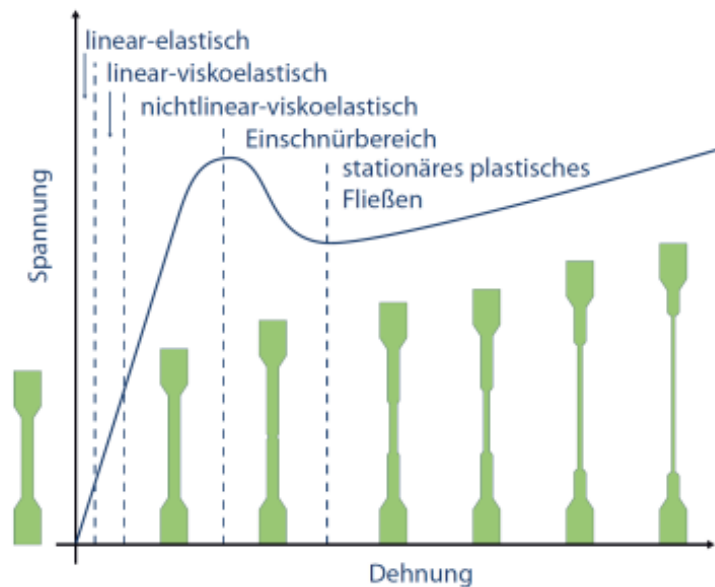




Prof. Dr.-Ing. Christian Borten

9

Verformungsverhalten unter Last



→ nach Überschreiten der Streckgrenze dominieren das viskose Verhalten und die plastische Deformation → Einschnürung

Schnellzerreiversuch

- Ermöglicht Zugversuche bei sehr hohen Geschwindigkeiten

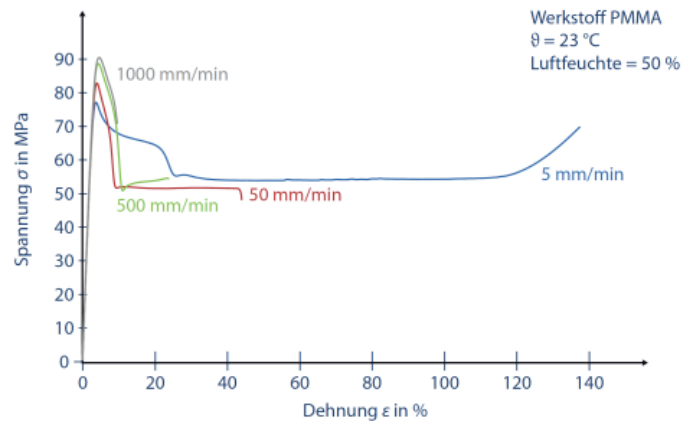
Eigenschaften:

- Uniaxiale Zugbeanspruchung
- Ermittlung des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs bei sehr hohen Geschwindigkeiten
- Ermittlung des Arbeitsaufnahmevermögens über die Fläche unter der Kurve
- + Belastungsgeschwindigkeiten wählbar
- + Belastungsgeschwindigkeiten konstant
- + instrumentalisiert (Kraftverlauf über der Zeit)
- + Werkstoffverhalten (duktile, spröde) über Kurvenverlauf erfassbar
- - servo-hydraulische Zugprüfmaschine notwendig

Zeit- und Temperatureinfluss auf mechanisches Verhalten

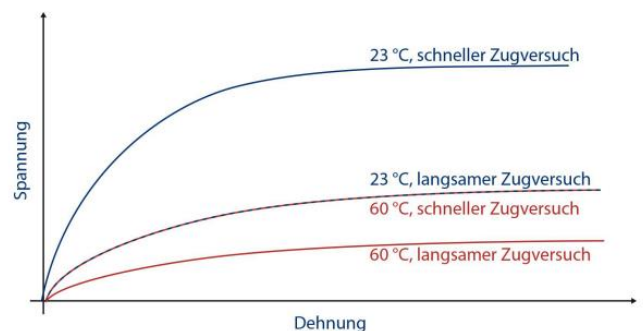
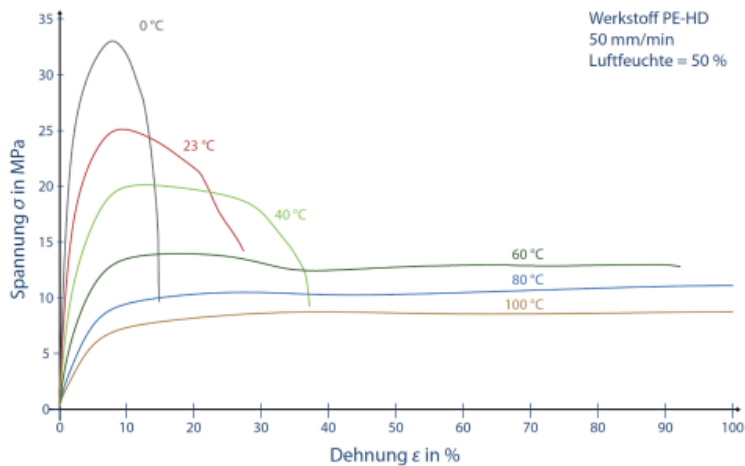
Zeiteinfluss:

- Polymerketten haben bei geringerer Dehngeschwindigkeit mehr Zeit, der aufgezwungenen Dehnung durch Drehungen und Entschlaufungen entgegenzuwirken → dehnt sich stärker bei weniger Spannungsaufbau
- Thermoplasten haben stärkeren Zeiteinfluss als Duromere und Elastomere aufgrund von Vernetzung



Temperatureinfluss:

- Höhere Temperatur → erhöhte Dehnbarkeit → geringere Spannung und geringerer E-Modul
- Brown'sche Molekularbewegung der Polymerketten nimmt mit der Temperatur zu
 → erleichtert das Drehen und Entschlaufen von Haupt- und Seitenketten
 → einer aufgezwungenen Verformung bei höherer Temperatur weniger Widerstand entgegengesetzt (nachgiebiger = weniger steif)
 → Prüfkörper antwortet auch mit geringerer Kraft, während er sich der Verformung entgegenstemmt.



Umrechnung:

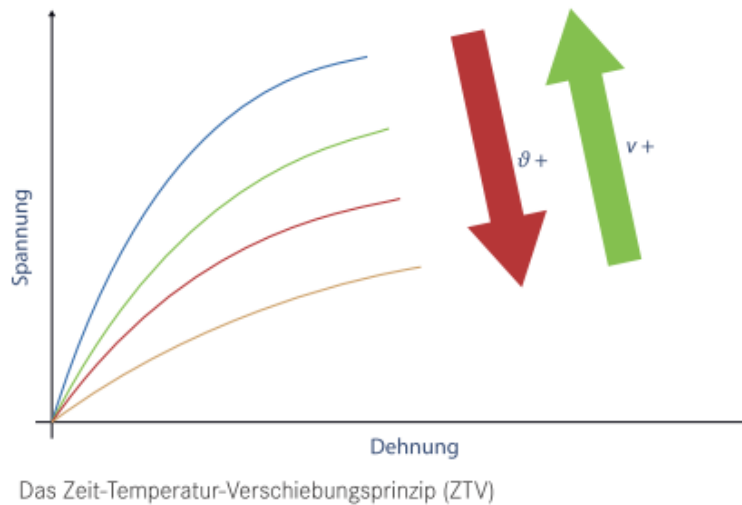
- Überführen ist möglich, jedoch Grenzen von Glasübergang und so beachten!
- So entspräche langsamer Zugversuch bei 23 °C einem schnellen bei 60 °C

Zeit-Temperatur-Verschiebungsgleichung (ZTV-Gleichung)

- stellt Zusammenhang zwischen Dehngeschwindigkeit und Temperatur her
- Referenzzustand nötig
- gilt nur, wenn Struktur des Kunststoffes nicht durch Temperatureinfluss verändert wird
 - amorphe: T_g und T_z nicht überschreiten
 - teilkristalline: T_g nicht unterschreiten, T_m und T_z nicht überschreiten

$$\log \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{ref}} \right) = k \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)$$

Aktivierungsfaktor k ist werkstoffspezifisch



Zeitstandversuch

- mechanisches Langzeitverhalten wird untersucht
- Prüfkörper wird von t_1 bis t_2 belastet, Dehnungsantwort ist zum Teil spontan (bei t_1 , elastisches Verhalten), und zum Teil zeitlich verzögert (bis t_2 viskoses Verhalten)
- Nach t_2 : Weiterdehnen ohne weitere Spannungserhöhung = „Kriechen“ oder „**Retardation**“
 - Höhere Temperatur: kriecht schneller bzw. bei geringerer Belastung
 - bei amorphen Thermoplasten besonders ausgeprägt, bei teilkristallinen bieten die Kristallite stärkeren Widerstand
- Bei Entlastung bei t_2 reagiert der Körper teilweise elastisch und ein Teil der Dehnung stellt sich spontan zurück. Ein anderer Dehnungsanteil stellt sich zeitverzögert zurück (viskoelastisch) und ein weiterer gar nicht mehr (teils irreversibel plastisch verformt, teils irreversible Mikrorisse).

Relaxation

- Viskoelastisches Verhalten kann auch zum Abbau von Spannungen führen
- Unter konstanter Dehnung stellt sich spontan eine Spannung im Prüfkörper ein, die dann aber mit der Zeit relaxiert
- Ebenfalls schneller bei höheren Temperaturen
- Auch das Relaxieren läuft bei amorphen Thermoplasten stärker ab als in teilkristallinen Thermoplasten

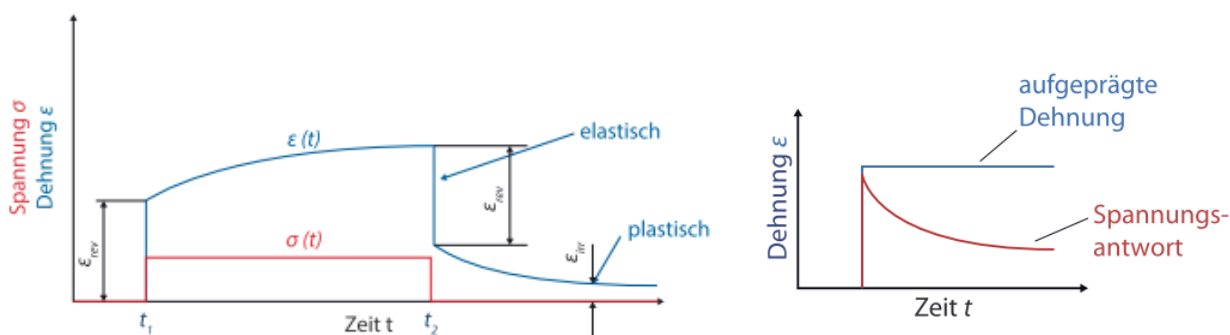


Bild 3.50 Relaxation

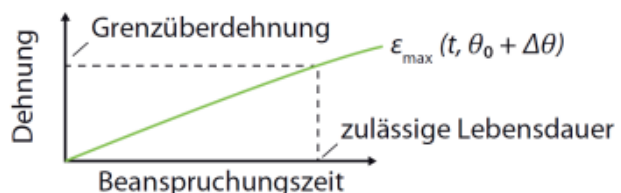
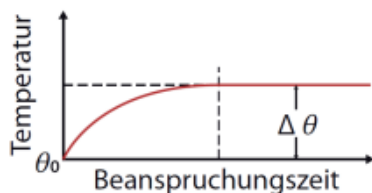
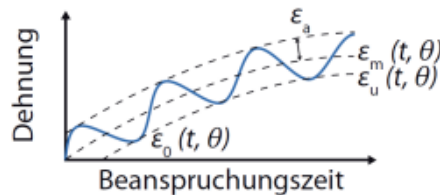
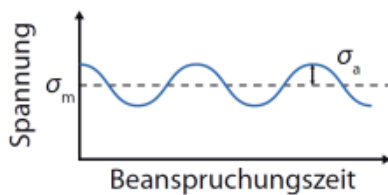
Retardation bzw. Kriechverhalten

Schwingversuch

- Mit Maximalspannung σ_a wird ein Bauteil um eine Mittelspannung σ_m geschwungen
- Kunststoff verhält sich viskoelastisch: mit jedem Spannungsanstieg findet Fließen statt, welches beim Spannungsabfall teilweise zurückfließt (ist zeitverzögert)
→ Probe erwärmt sich dabei leicht!
- Durch diesen Temperaturanstieg: Makromoleküle werden beweglicher → Dehnungsantwort größer → Aufschaukeln der Temperatur bis zum Versagen

Der Schwingversuch

Messwerte in Abhängigkeit von der Belastungsdauer



Typische Phänomene: Schwingstreifen oder Schwingmuster erkennbar

Biegeversuch

- zweiseitig aufgelagerter Prüfkörper wird auf Biegung belastet
- sich dabei einstellende Spannung wird über der berechneten Randfaserdehnung dargestellt

Berechnung der Randfaserdehnung ϵ_f nach DIN EN ISO 178,
„Kunststoffe - Bestimmung der Biegebeanspruchung“

$$\epsilon_f = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2}$$

mit

s: Durchbiegung

h: Höhe der Probe

L: Auflageabstand

Eigenschaften:

- Biegebeanspruchung (mehrachsiger Spannungszustand)
 - Kennwert: (Biege-)Spannungs-(Randfaser-)Dehnungs-Diagramm
- + Prüfung für Biegebeanspruchung
+ Praxisnäher als einachsige Zugbeanspruchung
- Gegenüber Zugprüfung aufwendigerer Aufbau (Auflagerabstand von Probendicke abhängig)

Biegebelastung und Zugbelastung im Schlagpendel

Schlagbiegeversuch

- Wird das Pendel ausgelöst, wird dessen potentielle Energie in kinetische umgewandelt
- Die beim Durchschlagen des Probekörpers verbrauchte Energie wird über den Pendelausschlag gemessen und als Schlagzähigkeit ausgewiesen.

Eigenschaften

- Biegebeanspruchung (mehrachsiger Spannungszustand)
- Kennwert: Energie (Arbeitsaufnahme pro Querschnittsfläche)
- Gekerbte und ungekerbte Prüfkörper möglich
- Durch Kerbe definierte Schwachstelle (bei zähen Materialien)

- + einfacher Aufbau und einfache Bedienung
- - Geschwindigkeit nicht frei wählbar (Schlagpendel)
- - Geschwindigkeit nicht konstant, Pendel durch Probe gebremst
- - Meist nicht instrumentalisiert
- - Ergebnis stark von Probenherstellung abhängig (Kerbengeometrie)

Schlagzugversuch

- Schlagpendel schlägt gegen das Querjoch und zieht dadurch an der Probe

Eigenschaften:

- Uniaxiale Zugbeanspruchung
- Kennwert: Energie
- Gekerbte Prüfkörper möglich

- + einfacher Aufbau und Auswertung
- + einfacher Spannungszustand
- - Geschwindigkeit nicht frei wählbar (Schlagpendel)
- - Geschwindigkeit nicht konstant, Pendel durch Probe gebremst
- - Meist nicht instrumentalisiert
- - Ergebnis stark von der Probenherstellung abhängig (Kerbengeometrie)

3.3. Beeinflussung durch Zusatzstoffe

- Meiste Polymere benötigen mindestens einen Schutz gegen Wärme- und Sauerstoffeinwirkung sowie andere Umweltbedingungen!
- Andere Zusatzstoffe je nach Anwendung

3.3.1. Verstärkungsstoffe (aktive Zusatzstoffe)

- Fasern zum Einbringen von Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) verschiedener Eigenschaften
- Hohe gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften
- Durch Fasern wird:
 - Festigkeit und Steifigkeit in Faserrichtung stark erhöht
 - Dehnbarkeit verringert
 - Wärmeformbeständigkeit erhöht
 - Schwindung und Kriechneigung verringert

- Faserkunststoffverbunde sind bekannt für ihr Leichtbaupotenzial
- eingesetzte Fasern und Duomere sind recht kostengünstig, aber die Verarbeitung gegenüber anderen typischen Kunststoffverarbeitungsverfahren sehr aufwendig und teuer
- Anwendungen
 - Flugzeugbau
 - Windenergie
 - Automobilbau, bisher nur Kleinserien
 - Freizeit, z.B. Carbon-Fahrradrahmen, Bootsrümpfe

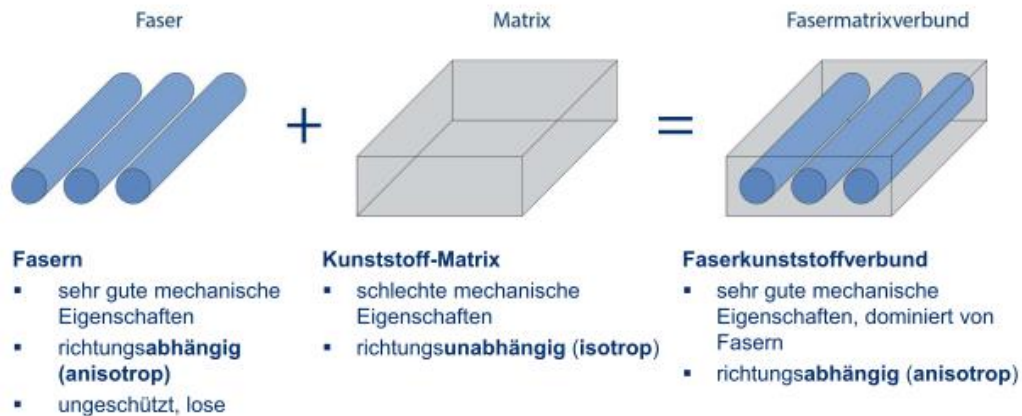
Fasern und das Prinzip der Verstärkung

Einteilung

- Nach verwendeten Fasern
 - Glasfasern Massenware
 - Basaltfaser Alternative zur Glasfaser
 - Kohlenstofffasern für Hightech-Anwendungen
 - Aramidfasern
 - Naturfasern
 - Vorteile:
 - nachhaltige Ressourcennutzung
 - preiswerter Rohstoff
 - gute thermische und stoffliche Wiederverwertbarkeit
 - arbeitsmedizinische Vorteile bei Verarbeitung und Entsorgung
 - E-Moduln wie Glasfaser möglich
 - Nachteile:
 - schlechte mechanische Eigenschaften (besonders Zugfestigkeit)
 - stark wechselnde Eigenschaften je nach Herkunft und Wachstumsbedingungen
- Nach Länge
 - Kurzfasern: 0,1 – 0,5 mm (geringste Kraftübertragung)
 - Langfasern: 0,5 – 50 mm
 - Endlosfasern: > 50 mm (höchste Kraftübertragung)

Eigenschaften

- Einzelfäden = Filamente, $d = 5\text{-}50\mu\text{m}$
- Faserbündel = „Roving“
- Generell: je feiner eine Faser (in Tex = $1\text{g}/1000\text{m}$), desto höher die Festigkeit, da die Wahrscheinlichkeit von Schädigungen geringer wird (Faserparadoxon nach Griffith)
- Fasern werden nie einzeln verarbeitet, sondern in Faserbündeln (Rovings) von 1000 (sehr teuer, Raumfahrtindustrie) bis 24000 oder mehr Einzelfilamenten (relativ kostengünstig: Automobilbranche)
- Halbzeug = unfertige Bauteile oder Bauteilelemente:
 - Rovings, meist aufgespult
 - Wirrfasermatten, unidirektionale Gelege, Gewebe, Gestricke
 - Leicht vernähte Multi-Axial-Gelege (MAG) – Schichten mit verschiedenen Orientierungen der Fasern



Beispiel aus der Natur: Holz

Aufgaben der Matrix

Duomere

Varianten

- Epoxidharze: größte Verbreitung, beste mechanische Eigenschaften
- Phenolharze: ältestes verwendetes Duomer (Bakelite®)
- Spezialfälle: Bismaleinimidharze, Polyimidharze
- kostengünstig: ungesättigte Polyester, Vinylester

+ vor der Vernetzung niedrigviskos, daher exzellente Filamentdurchtränkung

+ höhere Temperaturbeständigkeit

- Nicht schweißbar, nur thermisch recyclebar, oft Nacharbeit erforderlich

Thermoplaste

Varianten

- Amorph: PVC, PS, PMMA, PEI, PES, PC
- Teilkristallin: PE, PB, PP, PA, PEEK

+ Dehnfähigkeit erlaubt Energieaufnahme (Zähigkeit)

+ geringere Zykluszeiten

+ Schweißbarkeit

+ werkstoffliche Recyclebarkeit

- geringere Festigkeiten als Duomere

- nicht niedrigviskos genug für Filamentdurchtränkung

Kraftübertragung des Faserkunststoffverbunds

Mischregel: Berechnung des E-Moduls

Voraussetzung: gute Haftung zwischen Faser und Matrix

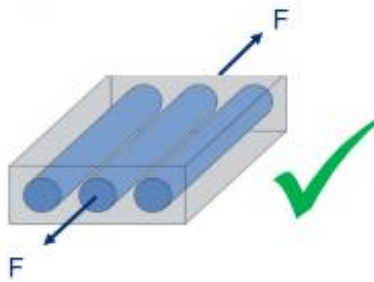
Faservolumengehalt $\varphi = \frac{V_{Faser}}{V_{gesamt}}$; typischer Wert 40–65 %

E-Modul der Faser in Lastrichtung

$$E_{Lage||} = \varphi E_{F||} + (1 - \varphi) E_{Matrix}$$

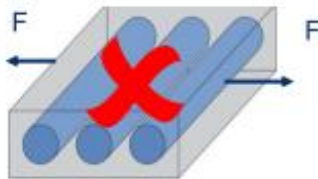
E-Modul der Matrix

Mischungsregel



Fasern dominieren Werkstoffeigenschaften,
Belastungsfall erwünscht

$$E_{Lage_{II}} = \varphi E_{F_{II}} + (1 - \varphi) E_M$$



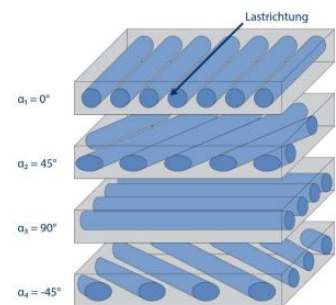
Matrix dominiert Werkstoffeigenschaften,
Belastungsfall ungünstig

$$(E_{Lage_{\perp}})^{-1} = \varphi E_{F_{\perp}}^{-1} + (1 - \varphi) E_M^{-1}$$

→ Es ist wenig ratsam, einen Faserkunststoffverbund quer zur Faserausrichtung zu belasten, da die „schwache“ Matrix die mechanischen Eigenschaften dominiert. In Faserausrichtung dominieren hingegen die Fasern die mechanischen Eigenschaften.

In Realität: mehrachsige Belastungsfälle → Fasern müssen mehrachsig ausgerichtet werden

→ geschichteter Verbund, in dem die Fasern in jeder Schicht verschieden ausgerichtet werden



Steifigkeit eines Mehrschichtverbundes – Rechnung:

Bekannte
Elastizitätsmodule:

$$E_{Lage_{II}} = \varphi E_{F_{II}} + (1 - \varphi) E_M \quad (\text{Parallelschaltung})$$

$$(E_{Lage_{\perp}})^{-1} = \varphi E_{F_{\perp}}^{-1} + (1 - \varphi) E_M^{-1} \quad (\text{Reihenschaltung})$$

Lage mit
Verdrehwinkel:

$$E_i = E_{Lage_{II}} \cos^4(\alpha_i) + E_{Lage_{\perp}} \sin^4(\alpha_i) \quad (\text{vereinfacht})$$

Gesamtes Laminat:

$$E_{gesamt_{II}} = \frac{\sum E_i d_i}{d_{gesamt}} \quad (\text{Mischungsregel})$$

Ultrahochmodul (UHM) Kohlenstofffaser: $E_{F_{II}} = 700 \text{ GPa}$,

$$E_{F_{\perp}} = 16 \text{ GPa}$$

Epoxidharzmatrix:

$$E_M = 4 \text{ GPa}$$

Faservolumengehalt:

$$\varphi = 0,6$$

Laminataufbau:

$$[0,30,-30,90]_S$$

Lagendicke:

$$d_i = 0,125 \text{ mm}$$

Gesucht: Laminatsteifigkeit in 0°-Richtung

→ Lösung: $E_{II} = \varphi E_{F_{II}} + (1 - \varphi) E_M = 421,6 \text{ GPa}$

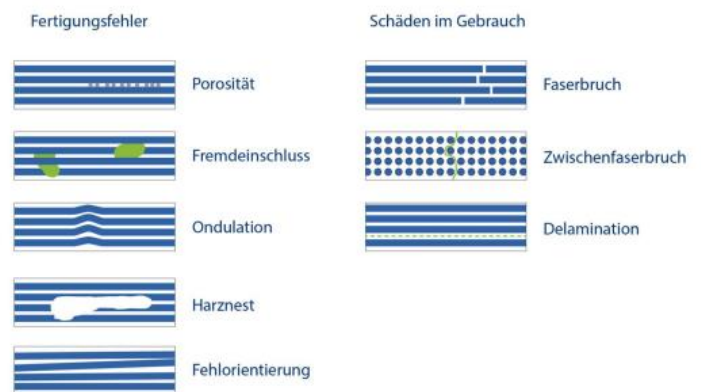
Defekte in Faserkunststoffverbunden

Fertigungsfehler

- Porosität
- Fremdeinschluss
- Ondulation (Wellenbildung)
- Harznest (=Harzanhäufung)
- Fehlorientierung

Schäden im Gebrauch

- Faserbruch
- Zwischenfaserbruch (Matrixbruch)
- Delamination (Abtrennung von Schichten)
 - von außen nicht sichtbar → führt zu totalem Verlust der Schubfestigkeit



Zerstörungsfreie Prüfung zur Defekterkennung

- Thermographie zur Visualisierung
 - Berührungslos, bis ca. 5mm Messtiefe, Messdauer 1 bis 5min
 - Erkennen von Delaminationen, Porositäten, Harznestern, Fremdeinschlüssen, Ondulationen
- Shearografie
 - Berührungslos, bis ca. 8 mm Tiefe, Messdauer ca. 1 bis 10 min
 - Erkennen von Delaminationen, Fremdeinschlüssen, Zwischenfaserbrüchen, Faserbrüchen, Ondulationen
- Luftgekoppelter Ultraschall
 - Berührungslos, Messdauer ca. 30 min, je nach Größe
 - Erkennen von Delaminationen, Fremdeinschlüssen, Zwischenfaserbrüchen, Faserbrüchen, Ondulationen, Harznestern, Porositäten

Nanopartikel als Zusatzstoffe

- Füllstoffe mit mindestens einer charakteristischen Dimension im Größenbereich von einem bis ca. 100 Nanometern
- Neben Art des Ausgangsmaterials führen insbesondere Größe und Gestalt der Nanostrukturen zu neuartigen (mechanischen, optischen, magnetischen, elektrischen und chemischen) Eigenschaften
- Zunahme der Rolle von Oberflächen und Grenzflächenwechselwirkungen
- Für maximale Wirksamkeit von Nanopartikeln: feinverteilte, sog. dispergierte Verteilung der Partikel angestrebt (technisch anspruchsvoll!).



- Beispiele:
 - Schichtsilikate Verbesserung des Flammschutzes und Barriere-Eigenschaften
 - Kohlenstoff-Nanoröhrchen Verbesserung der elektrischen und thermischen Eigenschaften
 - Titandioxid-Partikel Absorption von UV-Strahlen
 - Silber-Partikel Antibakterielle und fungizide Wirkung
 - Siliziumdioxid-Partikel Erhöhung der Oberflächenhärte

3.3.2. Funktions-Zusatzstoffe (hier Additive genannt)

Eigenschaften aller Additive:

- Wirkung hängt von Löslichkeit und Verteilung im betreffenden Polymer ab
- Z.B. Flammenschutz!

Beispiele:

- Fließhilfsmittel
 - Viskositätserniedrigende Zusätze senken Druckbedarf der Maschine oder Temperaturbedarf der Schmelze (meist niedermolekulare Bestandteile, welche die Nebenvaleanzkräfte in der Schmelze verringern, jedoch Gefahr der Migration).
 - Polymerketten mit Zwischeneinlagerungen von Zusatzstoffen
- Weichmacher
 - Erhöhen Dehnbarkeit und verringern Steifigkeit
 - Lagern sich zwischen den Molekülketten
 - Äußere Weichmachung
 - chemischer Grundcharakter des Werkstoffes wird nicht verändert
 - physikalische Mischung mit meist niedermolekularen Stoffen
 - keine chemische Verbindung, daher Gefahr der Migration und des Weichmacherverlusts
 - z.B. durch Wasser bei Polyamiden
 - Innere Weichmachung
 - Einpolymerisieren einer „abstandshaltenden“ Komponente, dadurch Reduktion der Nebenvaleanzkräfte und Beeinflussung der Beweglichkeit
- Zumischung anderer Polymere – Bildung von Polymerblends
 - Mischungen von mindestens zwei Thermoplasten
 - meist homogene physikalische Mischung durch Aufbereitung mit Doppelschneckenextruder
 - kostengünstige Neuentwicklung maßgeschneiderter Werkstoffe
 - kostengünstige Kombination der Eigenschaften der Blendpartner in vorteilhafter Weise, um sogar synergetische Eigenschaften zu erhalten
 - außerordentliche Bedeutung der Wechselwirkungen in der Grenzschicht der beiden Phasen
- Schlagzähmodifizierer
 - sehr spröden Werkstoffen werden Partikel aus sehr dehnfähigen Werkstoffen zugesetzt → Startende Risse pflanzen sich schnell durch spröde Werkstoffe hindurch, werden aber durch die dehnfähigen Partikel „aufgefangen“.

- Keimbildner (Nukleierungsmittel)
 - Keimbildner bilden viele kleine Sphärolite → erhöhter Kristallinitätsgrad, höhere Bruchdehnung, höhere Zugfestigkeit des Kunststoffes
 - Kristallbildung findet beim Abkühlen bereits bei höheren Temperaturen statt, je höher die Keimdichte ist.
 - Zykluszeitverkürzung, Kostenersparnis
 - Homogeneres Gefüge → Verringerung von Schwindung
- Haftvermittler
 - Substanzen, die in der Grenzfläche zwischen Stoffen eine enge physikalische und/oder chemische Bindung herstellen
 - bilden Brücken zwischen den Grenzflächen der zu verbindenden Trägermaterialien.
 - Partner bleiben thermoplastisch verarbeitbar
 - Führen zu guter Faser-Matrix-Anhaftung
- Veränderung der Wärmeleitfähigkeit
 - Vorteile: höhere Lebensdauer der Bauteile, größere Leistungen übertragbar, elektrische Isolation kann erhalten bleiben, komplexe Geometrien kostengünstig herstellbar.

3.3.3. Füllstoffe (inaktive Zusatzstoffe)

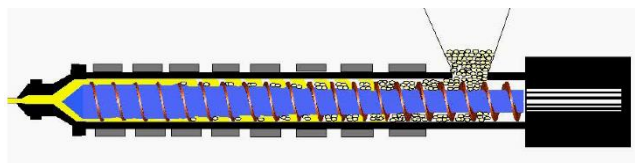
- erhöhen das Volumen und verringern den Preis
- ABER: meist erhöhen sie die Dichte, den E-Modul, die Härte und die Wärmeformbeständigkeit; geringere Gesamtschwindung!
- Beispiele:
 - Holzmehl, Cellulosepulver, Schalen- und Kernmehl
 - Calciumcarbonat, Talkum, Feldspat
- Nachteile:
 - Reduzierung der Dehnfähigkeit und Zähigkeit
 - beim Zerspanen erhöhter Werkzeugverschleiß
 - Rückstände bei der Verbrennung („Glührückstand“)

3.4. Einführung in die Kunststoffaufbereitung

Aufbereitung

= alle Verfahrensschritte, die erforderlich sind, um aus Polymeren verarbeitbare Kunststoffformmassen mit definierten Eigenschaften zu erstellen:

- Mischen (Blenden)
- Additive Dispergierer
- Füllen (z.B. mit Kreide)
- Verstärken (z.B. mit Fasern)
- Entgasen
- Filtern



Doppelschneckenextruder

- wird zur Aufbereitung von Thermoplasten verwendet, bei Duromeren und Elastomeren idR nicht eingesetzt

- „extrudere“ = [lat.] hinausstoßen, hinausdrücken
→ Rohstoff wird aufgeschmolzen und kontinuierlich ausgestoßen
- kontinuierlich arbeitende Fördermaschine, die unter Einfluss von Wärme und Druck Schmelze erzeugt und durch ein formgebendes Werkzeug presst
- Typen:
 - Gegenläufig
 - Gleichläufig (für Aufbereitung meist eingesetzt)
 - Konisch
 - Parallel

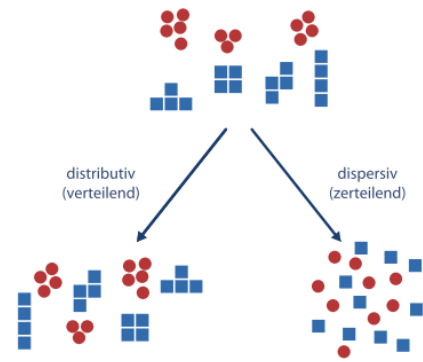
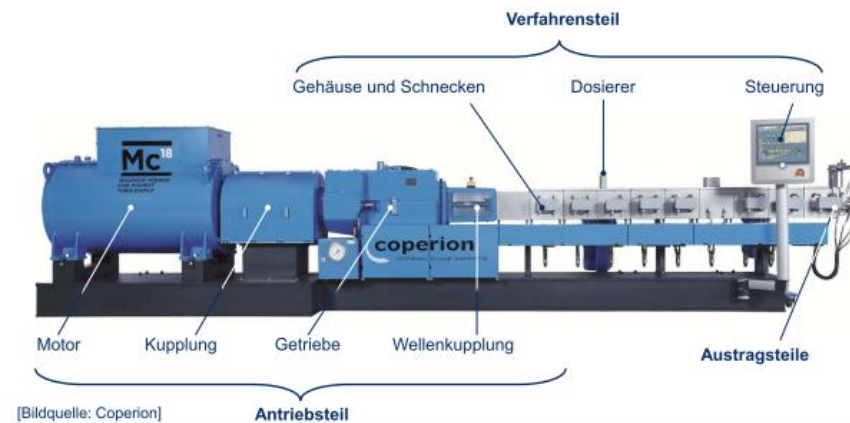


Bild 3.128
Distributives und dispersives Mischen



Bestandteile:

- **Antriebsenteil:** Motor, Kupplung, Getriebe, Wellenkupplung
→ treibt die Schnecken an
- **Verfahrensteil:** Gehäuse und Schnecken, Dosierer, Steuerung
→ Einziehen von Granulat, Erzeugen von Schmelze und Vermischung mit den Zusatzstoffen
- **Austragsteil:** Düsen
→ erzeugen einen Schmelzestrang, der hinausgedrückt wird
- **Zylinder:** eine oder zwei Wellen mit wendelförmigen Stegen rotieren darin
→ Material durch die Gänge zwischen den Stegen gefördert, aufgeschmolzen und homogenisiert

Verfahrenstechnik

Distributives Mischen = Verteilen und Homogenisieren

Dispersives Mischen = Zerkleinern oder De-Agglomerieren

Schneckenelemente

- **Förderelemente:**
 - ziehen dosierte Stoffe wie Granulat, Mahlgut, Pulver in den Extruder ein
 - verdichten und transportieren sie zur ersten Verfahrenszone
 - Druckaufbau am Extruderende, um das Produkt durch die Austragsteile zu pressen
- **Knetelemente:**
 - plastifizieren Polymere

- dispergieren Füll- und Verstärkungsstoffe

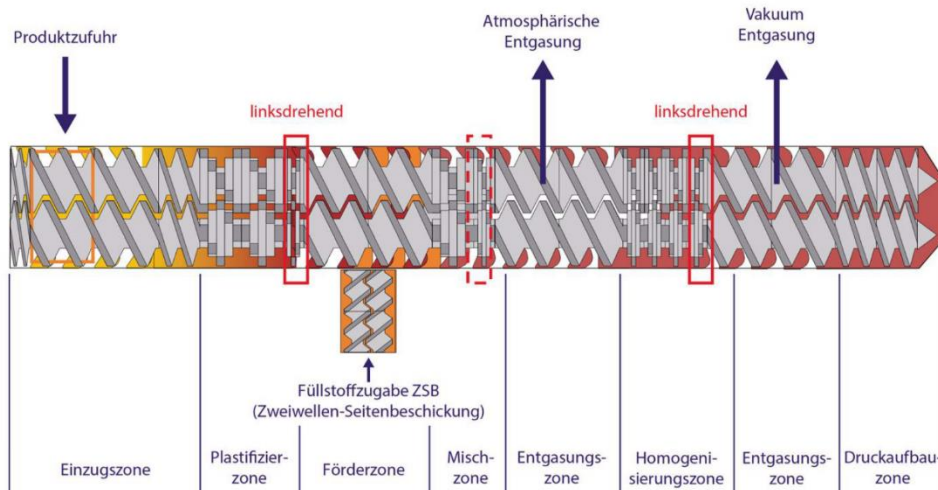
$$P_{spez} = \frac{P_{Antrieb}}{\dot{m}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_d(n)}{\dot{m}} \quad [\text{kWh/kg}]$$

- **Abstaelemente:**

- zur Trennung zwischen intensiv arbeitender Plastifizierzone
- für eine teilgefüllte Vakuum-Entgasungszone
- für die Zugabe von Füllstoffen

- **Mischelemente:**

- Aufgabe des distributiven (verteilendes) Mischens
- dispersiver, scherintensiver Mischanteil ist vernachlässigbar



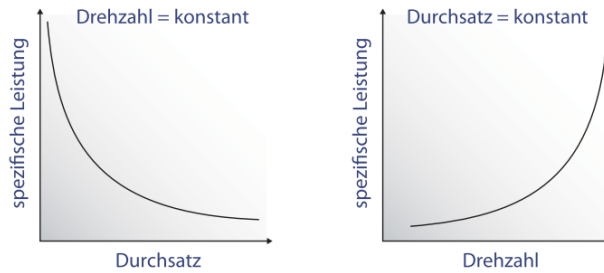
Verfahrenszonen

1. Einzugszone: Feststoff fördern und verdichten, Luft entfernen
2. Plastifizierzone: Polymer aufschmelzen, Füllstoffe vordispergieren
3. Schmelzförderzone: Schmelze fördern
4. Mischzone:
 - a) distributive Mischzone: Verteilen von Feststoffen, Flüssigkeiten in Schmelze
 - b) disperse Mischzone: Zerteilen von Feststoffpartikeln, Flüssigkeitstropfen
5. Entgasungszone: Entfernen von Wasser, Restmonomeren, Lösemitteln
6. Homogenisierungszone
7. Entgasungszone
8. Druckaufbauzone: Druckaufbau zur Überwindung der abstauenden Elemente; Druckgenerator in der Austragszone zum Ausgleichen des vom Werkzeug verbrauchten Drucks

Charakteristische Kennwerte

Spezifische Energie P_{spez_mech} :

- ermittelt, wie viel Energie in kWh pro kg compoundiertem Werkstoff eingesetzt wurde
- abhängig von Drehmoment M_d und Drehzahl n der Schneckenwellen sowie vom Massendurchsatz $\dot{m}$
- je weniger, desto energieeffizienter
- Bei konstantem Durchsatz vergrößert sich mit steigender Drehzahl auch das Drehmoment $M(n) \rightarrow$ nichtlinearer Zusammenhang



Mittlere Verweilzeit:

- beeinflusst die Eigenschaften des Werkstoffs (evtl. Alterung), wenn zu groß
- entscheidende Einflussgröße bei reaktivem Compoundieren

weitere:

- Schneckenkonfiguration (s.o.)
- Temperaturprofil
- L/D-Verhältnis (Verhältnis der Schneckenlänge zu ihrem Durchmesser)

Zusatzaggregate

Für die Aufbereitung von Kunststoffen müssen mehrere Komponenten (Granulate, Pulver, Fasern, etc.) in definierten Mengen in den Doppelschneckenextruder dosiert werden

Dosiersysteme

- Volumetrische Dosiersysteme
 - Dosieren eines gewissen Volumens pro Zeiteinheit
 - Kostengünstiger
- Gravimetrische Dosiersysteme
 - Dosieren eines definierten Massenstroms
 - Teurer, aber genauer

Filter

- Kurz vor Austritt der Schmelze
- Verunreinigungen in der Kunststoffschmelze sollen getrennt werden
- Zur Verbesserung der Produktqualität (z. B. eine verringerte Dickentoleranz bei Herstellung von Folien und Filamenten)
- Besonders im Einsatz beim Recycling von Post-Consumer-Kunststoffabfällen

Entgasungsanlagen

- Restentgasen von Monomeren und Lösungsmitteln
- Entgasen von Reaktionsprodukten (Reaktionsprodukte werden aus der Polymerschmelze abgezogen, z.B. das abgespaltene Wasser bei einer Polykondensationsreaktion von PA66 (sog. reaktive Extrusion).)
- Entgasen von flüchtigen Bestandteilen während des Aufbereitungsschritts

Granulatoren

- Aus aufbereiteter Kunststoffschmelze sollen Pellets hergestellt werden
- „Kaltgranulierung“: Schmelzestränge direkt durch Luft oder Wasser abgekühlt und durch Granulator mit rotierendem Messer abgetrennt

3.5. Prozess, Struktur, Eigenschaften - Beeinflussung durch den Verarbeitungsprozess

- Eigenschaften des fertigen Produktes erst durch den Verarbeitungsprozess festgelegt
- Temperatur hat großen Einfluss!

Eigenspannungen

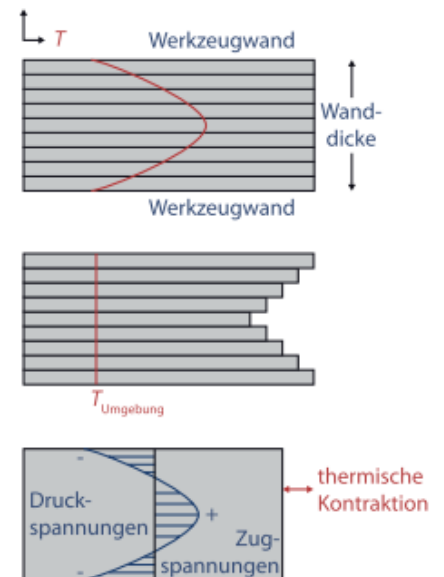
= wenn ein Bauteil ohne äußere Beanspruchung einen inneren mechanischen Spannungszustand aufweist

Ursachen

- lokal unterschiedliche Ausdehnung oder Kontraktion benachbarter Bereiche durch
 - thermische Kontraktion
 - Reaktionsschwindung (Schwindung = lokal unterschiedliche Wärmekontraktion)
 - Medienaufnahme/-abgabe

Abkühleigenspannungen durch unterschiedliche Schwindung

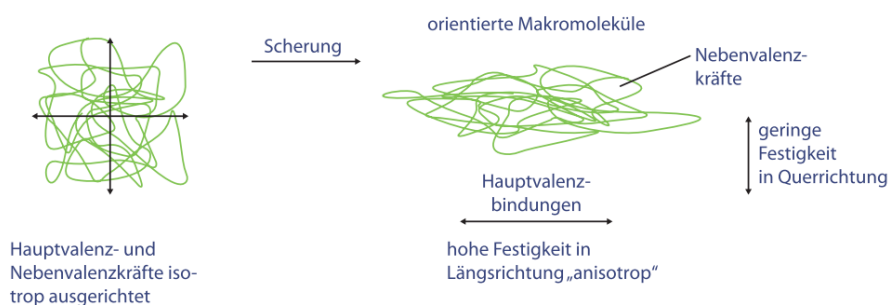
- Temperaturverteilung beim Abkühlen eines gerade gefüllten Bauteilabschnitts:
→ warmer Kern, kalter Rand
- nach der Abkühlung, wenn alle Schichten unabhängig voneinander frei thermisch kontrahieren könnten: → keine inneren Spannungen
- nach der Abkühlung, Dehnungsbehinderung der einzelnen Schichten
→ mittlere thermische Kontraktion (Schwindung) und Eigenspannungen



Weniger Eigenspannungen, wenn Schmelze durch höhere Werkzeugtemperatur sehr langsam abkühlt, können alle Schichten in ähnlicher Weise kontrahieren!

→ Abwiegen von Wirtschaftlichkeit vs. Risiko hoher Eigenspannungen!

Orientierung von Makromolekülen



Entstehung:

- **durch Scherung** insb. an Formwand werden Makromoleküle ausgerichtet und beim raschen Erstarren in diesem Zustand eingefroren
- bei hoher Temperatur und ausreichenden Verweilzeiten verknäulen („relaxieren“) die Orientierungen wieder → **Orientierungen sind meist unerwünscht**

Bindenaht

- zwei Fließfronten stoßen aufeinander → Bereich des Aufeinandertreffens: extreme Orientierung senkrecht zur Fließrichtung
- geringere Kraftübertragung als im Rest des Bauteils
- Ist genügend Beweglichkeit vorhanden, können die orientierten Moleküle über die Grenzfläche hinweg verknäulen und die Schwachstelle reduzieren

Auswirkung auf die Schwindung:

- Durch Fließvorgänge entstehen Orientierungen („anisotrope“ Eigenschaften) → thermische Kontraktion kann unterschiedlich ausfallen → Verzug möglich
- **REGEL 1: In Orientierungsrichtung ist Schwindung kleiner als senkrecht zur Orientierungsrichtung.**

Orientierung von Fasern

Faserorientierung in Schmelzeströmung

- **REGEL 2: Fasergefüllte Formmassen weisen stärkere Anisotropien bei den Schwindungswerten auf als unverstärkte Formmassen.**
- Strömt Schmelze durch einen gekühlten Schlitz: an Front entsteht Quellströmung, die die Kurzglasfasern von den Kernschichten in die Randschichten transferiert und dabei umorientiert
- Schichtartiger Aufbau: Randfasern in Fließrichtung und Kernfasern quer zur Fließrichtung
- Je dicker das Bauteil, desto größer der Anteil an Kernfasern
- Können nicht relaxieren!

Kristallisation

Bestimmte Thermoplaste können sich bei der Erstarrung teilweise ordnen (kristallisieren → teilkristalline Kunststoffe)

Aufbau kristalliner Ordnungszustände erfolgt an Grenzflächen („Keimen“) in der abkühlenden Schmelze

- Je niedriger die Abkühlgeschwindigkeit, umso gleichmäßiger können Makromoleküle kristallisieren (Kristallisationsgrad steigt)!
- Bei sehr hohen Abkühlgeschwindigkeiten kann die Kristallisation sogar unterdrückt werden (z.B. Getränkeflasche aus PET)!
- Je weniger Keime vorhanden sind, desto größer wird der einzelne Kristall (z.B. Sphärolithdurchmesser)!
- Je geordneter die Makromoleküle in der Schmelze liegen (Orientierung), umso besser können die Makromoleküle kristallisieren (sogenannte „scherungsinduzierte Kristallisation“)!

Bildung einer inneren Makrostruktur: Schäumen von Kunststoffen

offenzellig: gute Schallisolierung

geschlossen zellig: gute Wärmeisolierung

Definition:

Nach DIN 7726 ist ein Schaum(kunst)stoff ein „Kunststoff, dessen Dichte durch die Anwesenheit zahlreicher, in seiner Masse verteilter, kleiner offener oder geschlossener Hohlräume (Zellen) verringert ist“.

Dichte: leichte Schaumstoffe $< 0,1 \text{ g/cm}^3$, schwere Schaumstoffe $> 0,1 \text{ g/cm}^3$

Polymere:

- Thermoplaste (PE, PP, PS) → Polystyrol wird zu expandiertem Polystyrol (EPS, Styropor®)
- Elastomere (EPDM, SBR, NBR)
- Duromere (PUR, EP, UP)

Schäumverfahren:

- Physikalisch: Expansionsverfahren
 - Expansion einer flüssigen in eine gasförmige Phase
- Chemisch (z.B. Polyurethan): Mischverfahren
 - zwei flüssige, reaktive Komponenten und ein Treibmittel
- Mechanisch: Schaumschlagverfahren:
 - Luft oder ein anderes Gas wird mechanisch der Schmelze eingeschlagen, ähnlich dem Aufschäumen von Milch → bei Erstarren der Schmelze bleiben die Schaumblasen bestehen

3.6. Kurzdarstellung wichtiger Kunststoffe

4. Kunststoff – Verarbeitungstechnik

Allgemeines

Verarbeitung = alle Verfahrensschritte, die erforderlich sind, um Kunststoffformmassen zu Kunststoffbauteilen mit definierten Formen und Eigenschaften zu verarbeiten

- Spritzgießen und Extrusion
- Blasformen
- Thermoformen
- Pressen
- Schäumen

6 Hauptgruppen:

Schaffen der Form	Ändern der Form				Ändern der Stoffeigenschaften
Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		Hauptgruppe 6 Stoffeigenschaft ändern
Hauptgruppe 1 Urformen	Hauptgruppe 2 Umformen	Hauptgruppe 3 Trennen	Hauptgruppe 4 Fügen	Hauptgruppe 5 Beschichten	

→ Verarbeitung von Kunststoffen meist über urformende Prozesse (Hauptgruppe 1)

Urformprozesse → Extrusion, Spritzgießen

- Benötigen ein Werkzeug zur Formgebung in der Großserie
- Diese Werkzeuge zusammen mit den Kunststoffverarbeitungsmaschinen entscheidende Fertigungsmittel bei der Herstellung von Kunststoff-Serienteilen
- Hohe Drücke und Temperaturen → spezielle Werkstoffstähle nötig → Werkzeuge sehr robust, aber auch sehr teuer

4.1. Einführung in die Extrusion

- kontinuierlich arbeitende Fördermaschine, die unter Einfluss von Wärme u. Druck Kunststoffgranulat aufschmilzt, durch formgebendes Werkzeug presst u. daraus ein Profil formt
- Doppelschneckenextruder in der Aufbereitung vs. Einschneckenextruder in der Verarbeitung → Einschneckenextruder höheres Druckaufbauvermögen!
- Unterteilung
 - Schmelzeextruder
 - Plastifizierextruder
 - Glattrohr
 - Nutbuchse

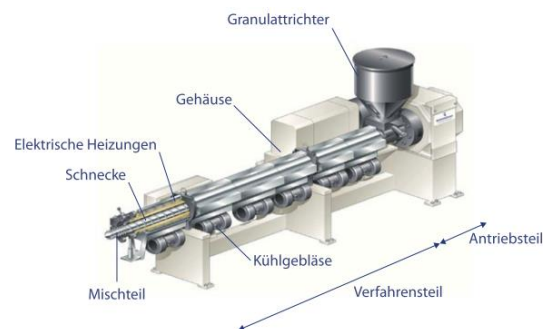


Bild 4.2 Schema eines Einschneckenextruders [Bildquelle: Reifenhäuser]

Aufbau eines Einschneckenextruders

- Antriebsteil
- Verfahrensteil: Granulattrichter, elektrische Heizungen, Kühlgebläse, Gehäuse und Schnecke, Mischteil

Extruderschnecke und Zylinder

Konventionelle Drei-Zonen-Schnecke

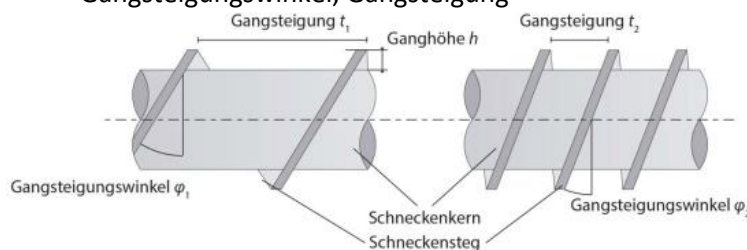
- Verfahrenszonen:
 - Einzugszone: Granulat wird in Trichter aufgenommen und gefördert
→ vorgewärmt und verdichtet
 - Aufschmelzzone: Umwandlung von Festkörper in Schmelze
 - Austragszone: thermische und stoffliche Homogenisierung der Schmelze, Druck aufbauen
- Charakteristisches Merkmal eines Extruders ist Verhältnis von L zu D der Schnecke

Beispiel: 90-25D oder 90/25D

Bedeutet: Schneckendurchmesser $D = 90 \text{ mm}$

Schneckenlänge $= 25 \times 90 = 2250 \text{ mm}$

- Geometrie:
 - Charakteristisch: Schneckendurchmesser, Länge, Kerndurchmesser, Ganghöhe, Gangbreite, Stegbreite, Schneckenpiel (Abstand zw. Steg und Zylinder), Gangsteigungswinkel, Gangsteigung

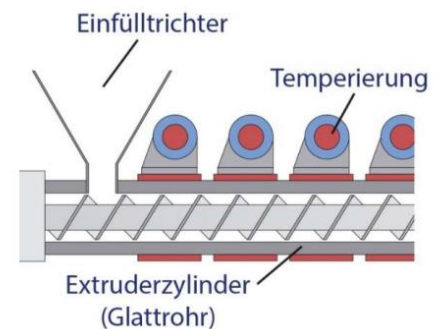


- Je größer die Ganghöhe h , desto mehr Material wird gefördert
- Je größer der Gangsteigungswinkel φ , desto größer ist die Gangsteigung t
- Je größer die Gangsteigung t , desto kleiner ist der aufgebaute Druck

Zwei Grundformen von Einschneckenextrudern:

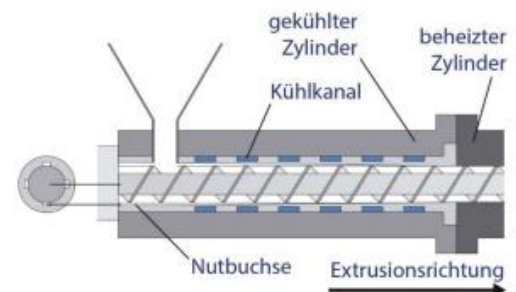
Glattrohretruder

- Glatter Zylinder im Bereich der Einzugszone (kostengünstiger)
- Üblicherweise Drei-Zonen-Schnecke
- Ausstoßmenge ist vom Werkzeuggegendruck abhängig



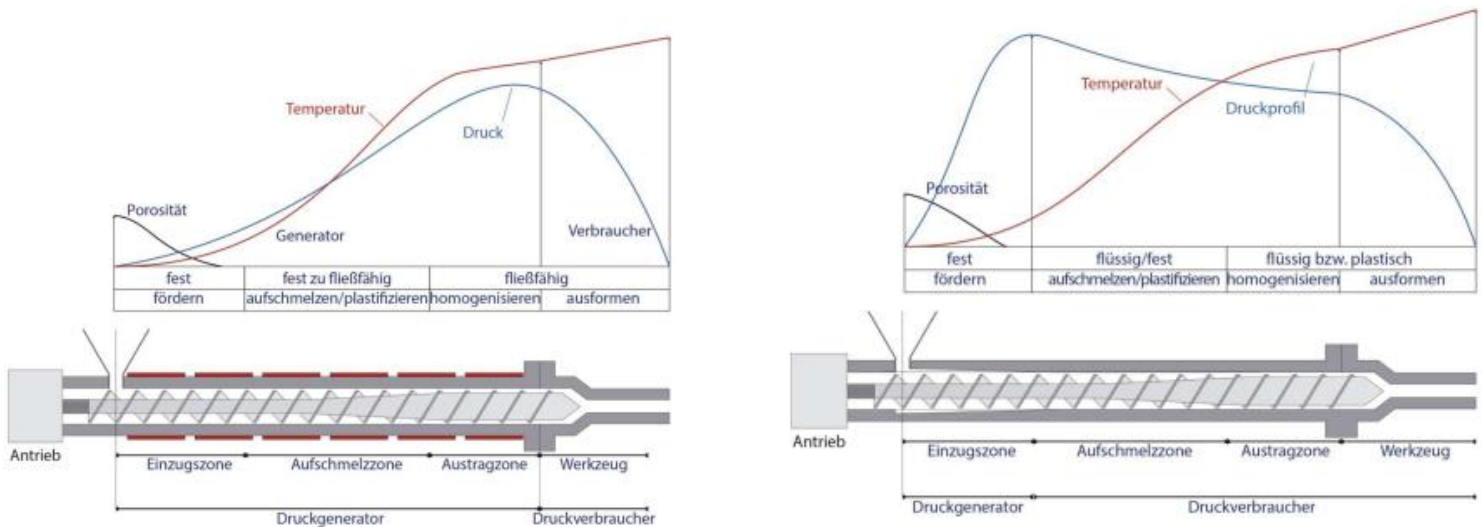
Nutbuchsentruder

- Axial- oder Wendelnuten in der Einzugszone
- Nuten verhindern die Drehbewegung der Granulatkörner mit der Schnecke.
- Material wird **zwangsgefördert**.
- Ausstoßmenge ist vom Werkzeuggegendruck unabhängig.
- Befindet sich Schmelze in den Nuten, funktioniert das Förderprinzip nicht mehr.



Druck- und Temperaturverlauf eines **Glattrohretruders**

- Kontinuierlicher Druckaufbau über gesamte Schneckenlänge
- Mischwirkung mittels Gegendruck am Werkzeug steuerbar
- Durchsatz ist gedruckabhängig



Druck- und Temperaturverlauf eines **Nutbuchsentruders**

- Zwangsförderung
- Druckaufbau mittels Feststoffförderung im Einzug
- Weitere Extruderzonen sowie Werkzeug wirken als Druckverbraucher
- Durchsatz ist gedruckunabhängig

Vergleich der beiden Extruderkonzepte:

Glattrohretruder:

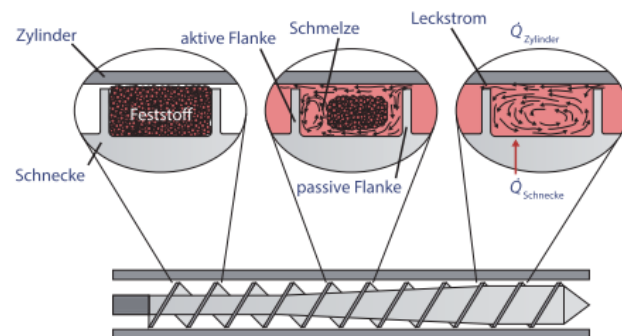
Bei konstanter Schneckendrehzahl und steigendem Werkzeugwiderstand sinkt der Massedurchsatz.

Nutbuchsentruder:

Bei konstanter Schneckendrehzahl und steigendem Werkzeugwiderstand bleibt der Massedurchsatz konstant. Ein verringerter Massedurchsatz kann erst bei sehr hohen Werkzeugwiderständen beobachtet werden.

Aufschmelzzone

- An der sogenannten aktiven („anschiebenden“) Flanke sammelt sich zunehmend Schmelze, während der Granulatbereich kleiner und kleiner wird
- Dieser Leckstrom überfließt die Flanken und umfließt das Granulat ebenso → Granulatansammlung ist somit stets von Schmelze umgeben und von den Wärmeströmen abgeschottet

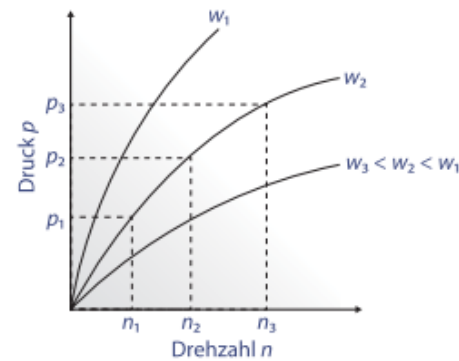


Austragszone (=Homogenisierungs- oder Meteringzone)

- Homogenisieren der Schmelze
 - Zerteilen von Agglomeraten, Aufschmelzen von restlichen Granulatkörnern
 - Gleichmäßiges Verteilen von Stoffkomponenten, wie z.B. Pigmenten, Additiven
 - Vereinheitlichen der Plastifikattemperatur

Der bis zum Ende des Extruderzylinders aufgebaute Druck hängt ab von:

- Werkzeugwiderstand w ,
- Fließwiderstand der Schmelze (Viskosität),
- Schneckendrehzahl n .
- Druck wächst bei strukturviskosen Materialien unterproportional mit der Durchsatzleistung an
- Praxisübliche Werte liegen zwischen 100 und 300 bar

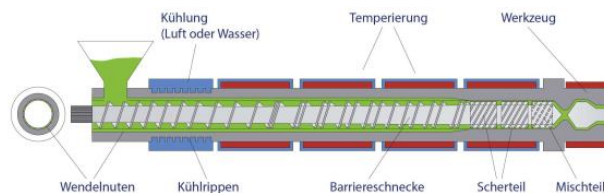


Ist noch nicht gut genug homogenisiert, dann Verweilzeit und Mischwirkung erhöhen ODER Mischelemente einbauen

- Schmelze gut vermischen und möglichst wenig Druck verbrauchen
- Standard-Mischteil:
erst überwiegend dispersiv, dann überwiegend distributiv mischender Bereich

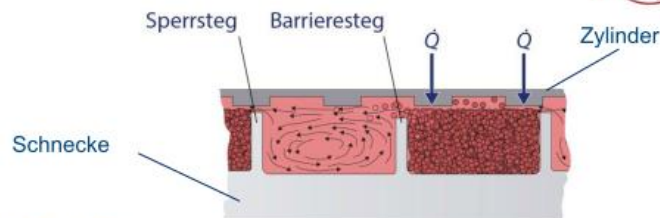
Hochleistungsextruder Helibar®

- durchgehend genuteter Zylinder (Axial- oder Wendelnuten)
- Barrierschnecke mit Scher- und Mischelementen



- Verfahrenstechnische Vorteile
 - hohe Aufschmelzleistung mit entsprechend hohem spezifischen Massedurchsatz
 - hohes Druckaufbauvermögen (bzw. hohe Pumpenleistung)
 - geringer mechanischer Verschleiß
 - geringe Kühlleistung in der Einzugszone erforderlich (z.B. Luftkühlung reicht aus)
 - gute Schmelzehomogenität
 - geringe thermische Schädigung des Kunststoffs
- Wirtschaftliche Vorteile
 - niedrige Herstellkosten
 - sehr kompakte Baugröße
 - Erhöhung der Durchsatzleistung um bis zu 50 %

Der Hochleistungsextruder Helibar®
Aktuelles aus der IKT-Forschung



Förderung und Druckaufbau:

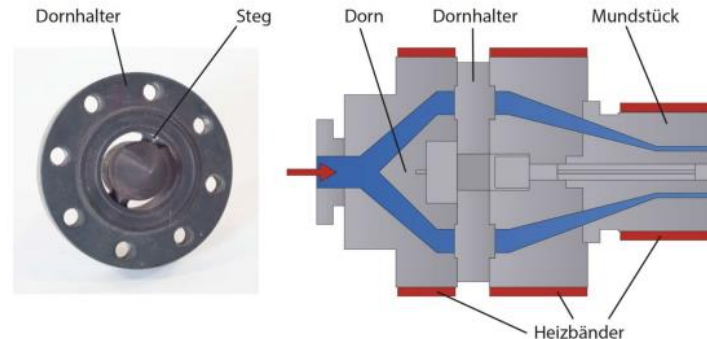
Das Einpressen der Schmelze in die Nuten und das Verhaken des Feststoffs an den Nutkanten erzeugen einen dünnen Schmelzefilm an der Zylinderwand, hohe Schubkräfte auf den Feststoff und damit hohe Pumpleistung im Feststoffkanal.

Dünnere Schmelzefilm δ → gute Wärmeleitung und Aufschmelzleistung
hohe Schubspannung τ_w und Förderleistung

Rohr- und Profilextrusion

Extrusionswerkzeug für Rohre

- trennt die Schmelze radial und lässt sie um einen Dorn laufen
- Dorn temperierbar, mechanisch gut ausgelegt
- Dorn muss steif genug sein, damit es nicht zu ungleichmäßiger Druckverteilung kommt



Dornhalter

- Einfachstegdornhalter
 - Bindenähte evtl. deutlicher
 - evtl. schlechtere mechanische Eigenschaften
- Doppelstegdornhalter
 - Stege sind versetzt
 - Bindenähte weniger sichtbar
 - bessere mechanische Rohreigenschaften
 - teurer

Gängige Profiltypen (Querschnitt)



Profilextrusion

- Werkzeugaustritt hat i.d.R. nicht exakt dieselbe Form wie das spätere Produkt
- Form und Maße des Extrudatstrangs werden nach Austritt aus Werkzeug von mehreren Faktoren beeinflusst:
 - Abzugskraft
 - Relaxation bereits im Werkzeug
 - Abkühlgeschwindigkeit
 - Strangaufweitung (Moleküle nehmen nach Druckabfall wieder mehr Volumen ein und „erinnern“ sich an die Konfiguration vor dem Werkzeug)

Verschiedene Abzugsgeschwindigkeiten

- Bei Austritt weitet sich Schmelzestrang meist etwas auf → Moleküle werden zusammengedrückt und durch Scherung orientiert
- Erhöhte Abzugsgeschwindigkeit: Strang kann wieder auf Düsenmaß gelangt werden
- Weitere Erhöhung: Maß kleiner als Düsenmaß erzielen

Lunkerbildung (Materialanhäufung) durch ungleichmäßige Abkühlung:

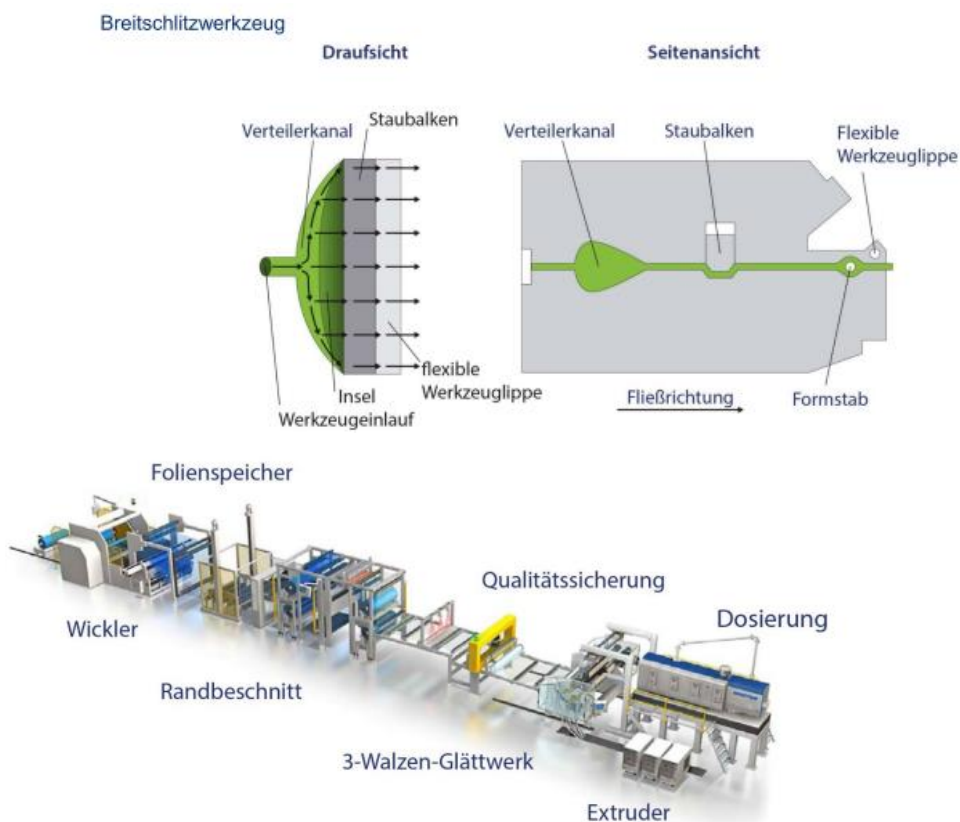
- Makromoleküle teilkristalliner Kunststoffe sind geordneter und ermöglichen eine höhere Dichte → größere Schwindung
- an Dickstellen und Materialanhäufungen können im Inneren Lunker entstehen, wenn Außenhaut zu schnell abkühlt und erstarrt

Einfallstellen und Verzug durch ungleichmäßige Abkühlung:

- Wenn Extrudat innenliegende Stege, Rippen oder Vorsprünge hat, können eine Verformung sowie Einfallstellen als Folge der ungleichmäßigen Abkühlung eintreten
- Ungleichmäßige Wanddicken können zu Verzug führen.

Platten- und Flachfolienextrusion

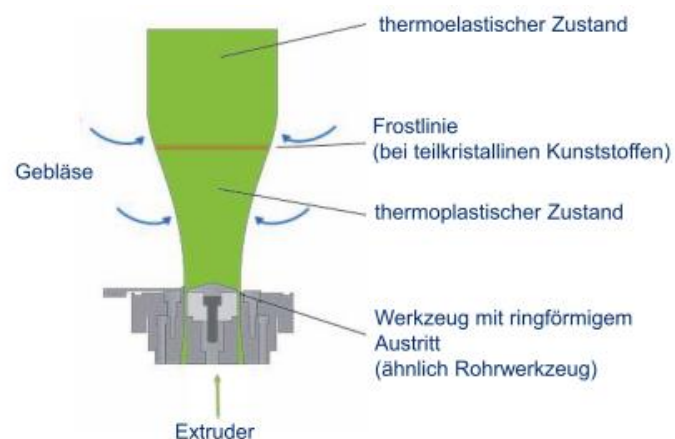
- Schmelze wird mittels Breitschlitzwerkzeugen mit kleiderbügelförmigem Verteilerkanal ausgeformt

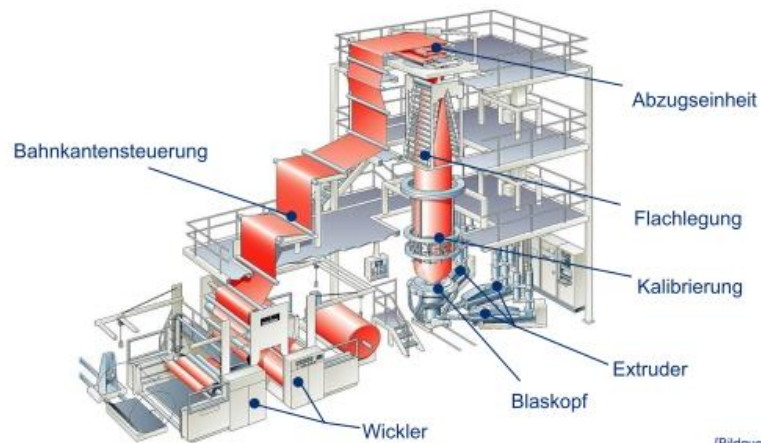


Schlauchextrusion

- Folien im Bereich von 0,01 (!) bis ca. 1 mm Dicke gefertigt werden

Blasfolien- und

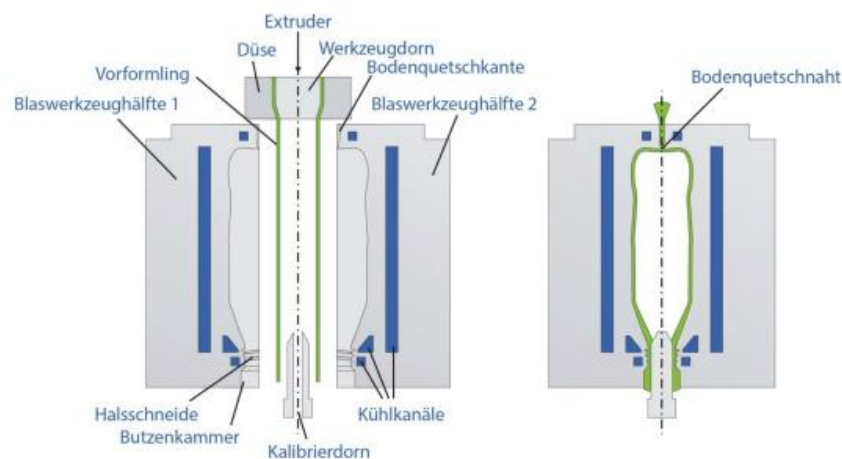




[Bildquelle: contiMETA]

Extrusions-Blasformen

- Hohlkörper aus thermoplastischen Kunststoffen werden heute überwiegend im Extrusionsblasformen hergestellt
- Hohlkörper = Verpackungsartikel wie Flaschen, Kanister oder Fässer, aber auch technische Teile wie Lüftungskanäle, Surfbretter, Kraftstoffbehälter oder Kofferhalbschalen.



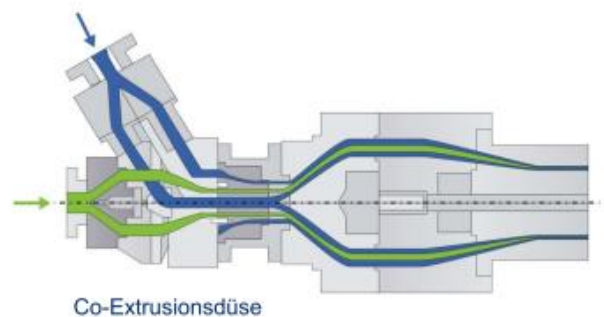
Co-Extrusion

Extrusionswerkzeuge für die Blasfolienextrusion

- Kombination von verschiedenen Werkstoffeigenschaften
- z.B. teure Funktionsschicht und kostengünstige, tragende Restwandung

Spezialform: Ummantelung von Elektroleitung:

- Werkzeug mit kreisförmigem Austritt
 - Pinole wird mit Schmelze umströmt
 - Durch die Pinole laufen die zu ummantelnden Halbzeuge (Draht, Kabel, etc.)



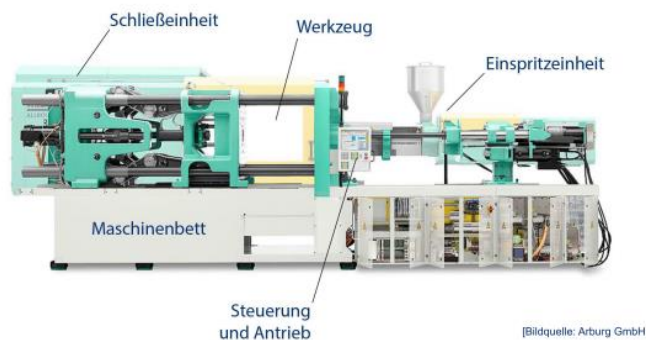
4.2. Einführung in das Spritzgießen

Allgemeine Merkmale

- Weltweit das meist genutzte Verfahren zur Herstellung von Kunststoffen
- im Vergleich zur Extrusion: hier auch komplexe 3D-Formen möglich
- im Vergleich zur Extrusion: höherer Druck verwendet
- Serienverfahren zur Herstellung von Kunststoffprodukten benötigen ein Werkzeug zur Formgebung → „robust“, gehen erst nach mehr als x100 000 Teilen kaputt
→ müssen sich von den Stückzahlen her lohnen
- Thermoplaste (bei 200-300°C), Elastomere und Duromere können verarbeitet werden

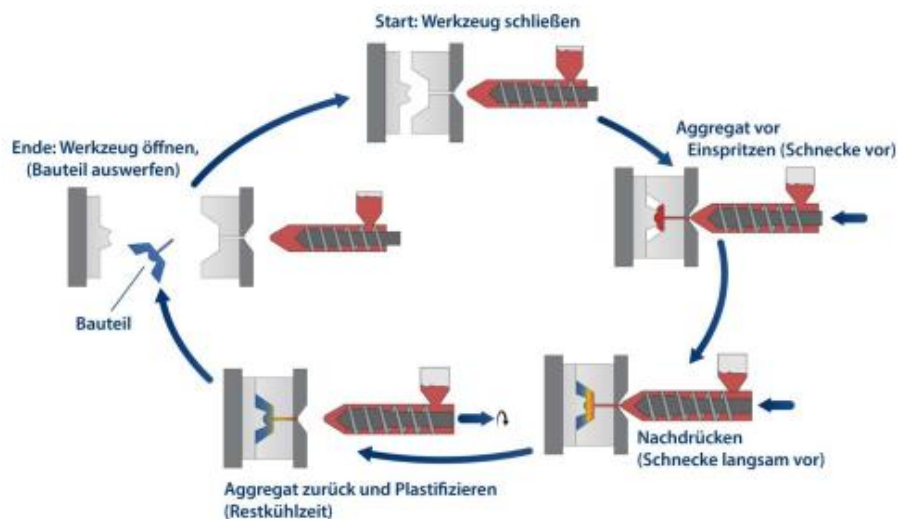
Der Spritzgießprozess (für Thermoplaste)

Aufbau



- Einspritzeinheit: Kunststoff wird von Granulatform (fest) in den schmelzeflüssigen Zustand überführt und unter hohem Druck in das Werkzeug gespritzt → mittels Kolben

Ablauf des Zyklus:



Start

- Werkzeug schließt und Aggregat fährt vor
- Schnecke fährt vor
- mit Beginn des Einspritzens: Kühlzeit beginnt → hohe Viskosität von Kunststoff erfordert hohe Drücke beim Füllen der Kavität (oft 1000 bis 3000 bar)
- Volumenreduktion durch Schwindung an der Werkzeugwand

Nachdruckphase

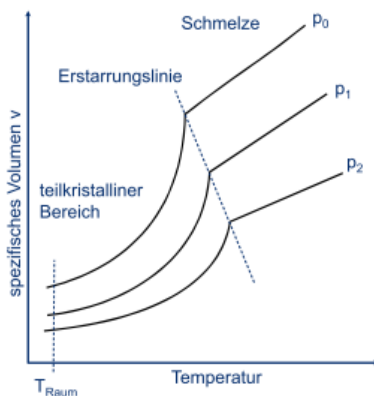
- Volumenschwindung wird durch Nachdrücken mit zusätzlicher Schmelze ausgeglichen
- So lange bis der Anguss erstarrt ist („Siegelzeit“)

Restkühlzeit

- Nachdruck bewirkt nichts mehr, beheizte Schnecke fährt weg
- Während Formteil erstarrt: Schnecke fährt ebenfalls zurück und wird neu mit Schmelze befüllt

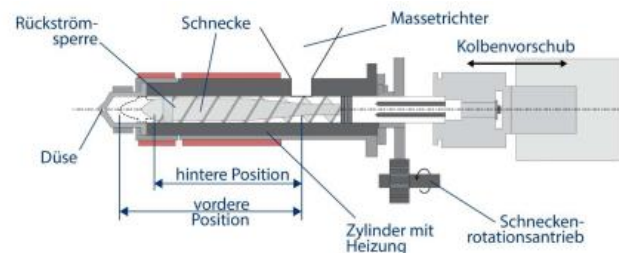
Ende

- Werkzeug wird geöffnet, Formteil ausgeworfen und Werkzeug wieder geschlossen



Beispiel für teilkristallinen Thermoplasten

- 1:
- 2:
- 3:
- 4:



Das Plastifizieraggregat

Aufgaben

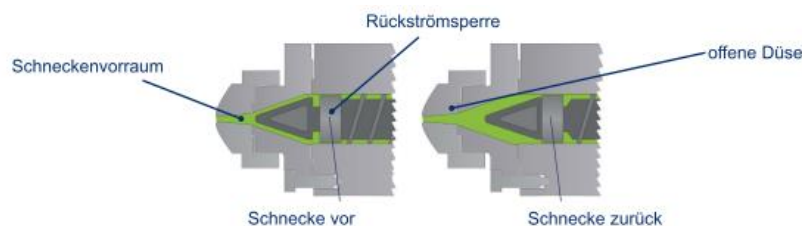
- Fördern, aufschmelzen und homogenisieren des Kunststoffs (Rotation)
- Speichern der Kunststoffschmelze
- Einspritzen der Kunststoffschmelze in das Werkzeug (axiale Bewegung)
- Nachdrücken zur Schwindungskompensation des Formteils (axiale Bewegung)

Rückstromsperre

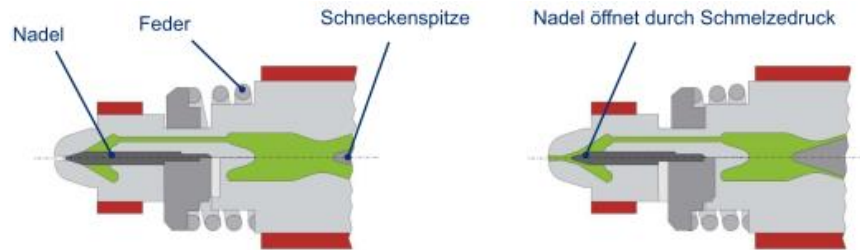
- Es soll keine Schmelze zurück in die Schneckengänge gedrückt werden
- Während des Dosierens geöffnet, während des Einspritzens geschlossen

Einspritzdüse

- Dichtung zwischen Spritzzylinder und Werkzeug
- Ausgleich des Durchmesserunterschieds zwischen Spritzzylinder und Angusskanal
- Typen:



- Offene Düse
 - Glatte Bohrung → leicht zu reinigen und zu spülen, strömungstechnisch günstig, geringe Gefahr der thermischen Zersetzung
 - Für hochviskose und temperaturempfindliche Kunststoffe



- Verschlussdüse: für niedrigviskose Schmelzen!
→ z.B. federbelastete Nadelverschlussdüse

Die Schließeinheit mit Spritzgießwerkzeug

Aufgaben der Schließeinheit

- Aufnahme des geteilten Werkzeuges und dessen Zuhaltung gegen den Fülldruck und Nachdruck der eingespritzten Formmasse
- Öffnungs- und Schließbewegung des Werkzeuges zur Entfernung des Spritzgussteiles
- Vollhydraulische Schließeinheit
 - + exakte Reproduzierbarkeit der Schließkraft → reproduzierbare Qualität
 - + kein nennenswerter Verschleiß
 - große Ölmengen erforderlich
- Schließeinheit mit Kniehebel (elektrisch oder hydraulisch)
 - + günstige Kinematik
 - schlechte Reproduzierbarkeit der Qualität
 - Gefahr der Überdehnung
 - einseitiger Verschleiß

Funktionen des Spritzgießwerkzeugs

- Schmelze verteilen (Angussystem)
- Form geben („Formnest“)
- Kühlen/Heizen (Temperierung)
- Befestigung an Maschinenaufspannplatten und Kraftaufnahme
- Entformen (Entformungssystem)

Formen von Spritzgießwerkzeugen

- Normalwerkzeug
- Schieberwerkzeug
- Abstreiferwerkzeug
- Backenwerkzeug

Anforderungen an Spritzgießwerkzeuge

- Mechanische Auslegung → hoher Innendruck
- Rheologische Auslegung → Wahl des Angussystems, Fließverhalten → möglichst gleichmäßige Füllung
 - Angussystem muss je nach Anwendungsfall gewählt werden: Abfallvolumen, Sichtbarkeit von Bindenähten, Füllstoff-/Faserorientierungen
 - **Tunnelanguss:** am häufigsten
 - Ringanguss, Scheibenguss, Schirm- oder Trichteranguss

Wärmestau im Kunststoffbauteil

- Unzureichende Wärmeabfuhr kann zu schlechter Bauteilqualität (Eigenspannungen, Lunker, Verzug) oder sehr hohen Zykluszeiten führen.

Einfluss des Spritzgießens auf Bauteileigenschaften

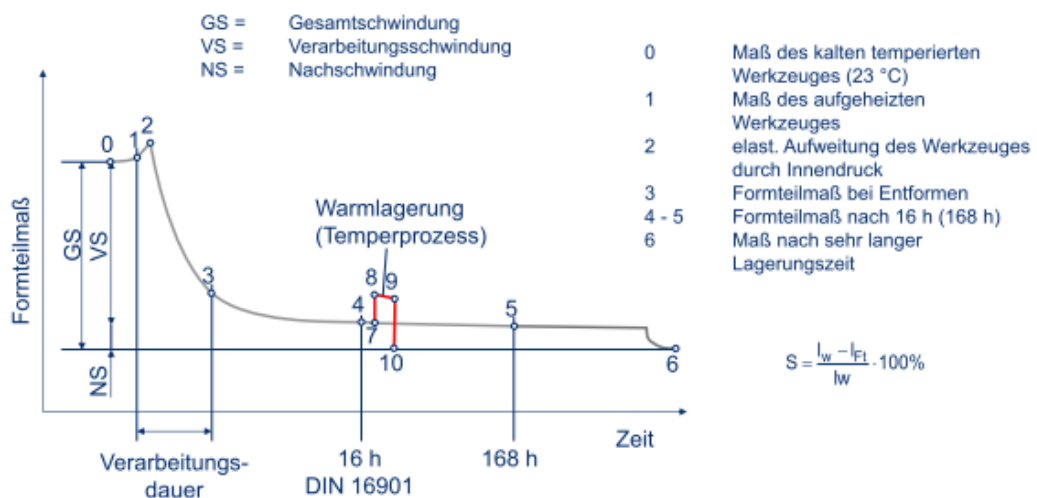
Einspritzphase

- Laminares Fließverhalten soll erreicht werden: Scher- und Dehndeformation orientiert die Schmelze (und ggf. Fasern)
- hohe Einspritzgeschwindigkeit führt zu hoher Schergeschwindigkeit, welche die Schmelze leichter fließen lässt (strukturviskoses Verhalten)
- Oberfläche, Aussehen und Orientierungszustand werden durch Einspritzphase beeinflusst

Nachdruckphase – bei zu hohem Nachdruck

- Schwindung wird überkompensiert
- Werkzeug öffnet sich geringfügig
- Schmelzeffluss in die Trennebene zwischen den Hälften

Schwindung von Kunststoffbauteilen



- $GS = \text{Gesamtschwindung} = NS + VS$
- $VS = \text{Verarbeitungsschwindung}$
 - Differenz der Werkzeugabmaße und des Formteiles nach 16 Stunden Lagerung im Normalklima bestimmt
- $NS = \text{Nachschwindung}$
 - Abwarten einer sehr langen Lagerungszeit und Vergleich mit Formteilmaß: Bauteil schwindet nach
 - Ursache im Relaxationsprozess

Sonderverfahren

Anpassung der Verfahren

- Kostendruck des Marktes
- Vermeidung mechanischer Schwachstellen durch Bindenähte

- Besondere Anforderungen an die Oberflächengüte
- Bauteile aus verschiedenen Farben/Werkstoffen
- Zunehmend moderne Hochleistungsbauteile mit hoher Funktionsdichte „Funktionsintegration“

1. Ein-Komponenten-Verfahren

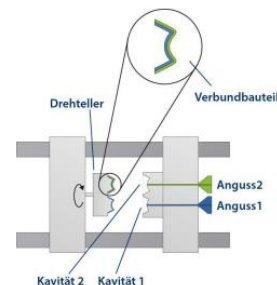
- Spritzprägen: Präge- statt Nachdruckphase → geringere Druckspitzen
Präzise Abformung von Mikrostrukturen (z. B. DVD)
hohe Maßhaltigkeit von Präzisionsbauteilen (z. B. Linsen)
- Kaskaden-Spritzgießen: Realisierung von langen Fließwegen
→ mehrere Angüsse mit mehreren Angussdüsen
teuer, aufwendige Steuerung



2. Mehr-Komponentenverfahren

a. Additiv (mehrere Angüsse)

- Montagespritzgießen
 - Herstellung beweglicher Formteile
→ Spiel entsteht durch unterschiedl. Schwindung
 - Werkstoffe dürfen nicht kompatibel zueinander sein
- Verbundspritzgießen



b. Sequenziell (ein Anguss)

- Sandwich-Spritzgießen:
 - Herstellung von Bauteilen aus zwei Materialien im Schichtverbund
 - Beide Komponenten werden hintereinander eingespritzt



3. Verfahren mit Einlegeteilen

Spritzsteck-Blasformen

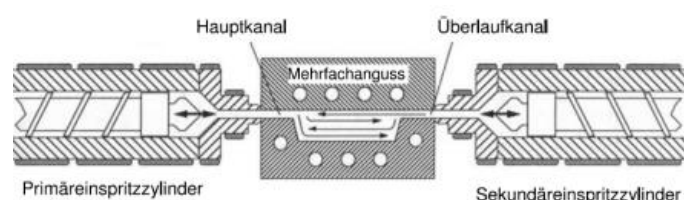
- Produkte: Coca-Cola-Flasche, Kanister
- Vs. Extrusionsblasformverfahren:
 - + meist dünnwandiger
 - + höhere Druckfestigkeit (für CO₂-haltige Getränke)

Maßnahmen gegen Bindenähte

- Konstruktiv: Verlegung der Bindenähte in mechanisch wenig beanspruchte Bereiche oder in Bereiche, in denen die Schmelze höheren Temperaturen und Drücken ausgesetzt ist
- Thermisch: Erhöhung der Masse- und Werkzeugtemperatur senkt die Viskosität

Gegentakt-Spritzgießen

- + verstärkte Orientierung im Bereich der Bindenaht → höhere Bindenahtfestigkeiten
- aufwendige Maschinenteknik
- Angussauslegung



Multi-Live Feed Injection Molding (MLFM)

- Schmelzestrom wird zuerst geteilt
 - In jedem Strom ist jeweils ein Kolben integriert
 - In der Nachdruckphase übernehmen diese Kolben abwechselnd die Nachdruckausführung
 - Dadurch schichtweise Versetzung der Binde naht (durch schichtweise Erstarrung)
- + nur ein Aggregat
+ Kolbenaggregat auf normale Maschine aufsetzbar
- Aufwendiger Umbau der Maschine
- Erzeugung von Binde naht durch Aufteilung des Schmelzestroms

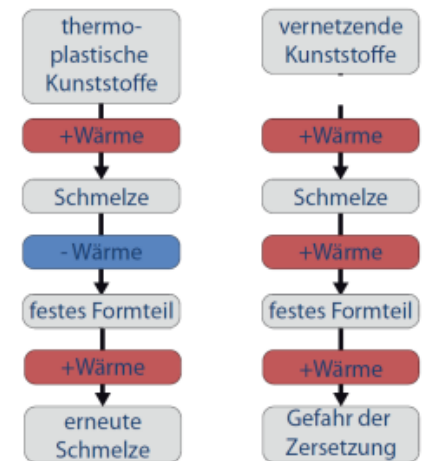
4.3. Verarbeitung von vernetzenden Formmassen

Einführung

! Während ein Thermoplast die Wärme benötigt, um in Schmelze zu gelangen und durch Abkühlen wieder fest wird, werden vernetzbare Formmassen durch Wärme fließfähig gemacht und zugleich die Vernetzungsreaktion gestartet!

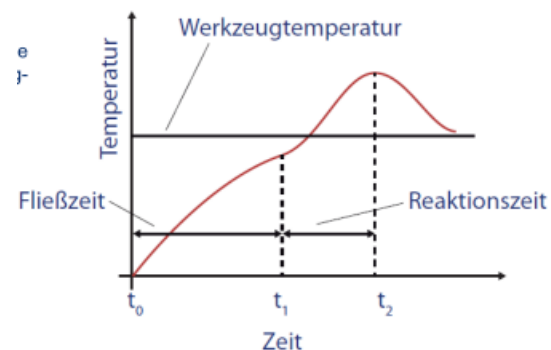
Besonderheiten vernetzender Kunststoffe = Duomere + Elastomere

- Gutes elektrisches Isolationsvermögen
- Hohe Dimensionsstabilität
- Hohe Temperatureinsatzgrenzen
- Hohe Medienbeständigkeit
- Sicherheitsreserven bei Temperaturspitzen
- Günstiges Brandverhalten
- Duomere besitzen darüber hinaus eine für Kunststoffe hohe Festigkeit, Steifigkeit und Oberflächenhärte. Sie stellen sich bei geringer Dehnbarkeit elastisch (vollständig) zurück.
- Elastomere stellen sich auch bei hoher Dehnbarkeit elastisch (vollständig) zurück



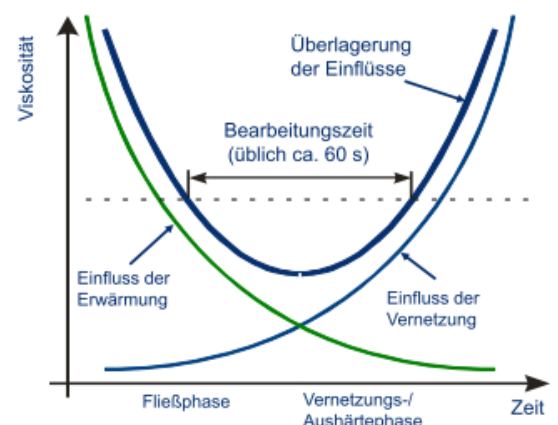
Härtungsreaktion eines Duomers:

1. Mit Werkzeugkontakt steigt die Temperatur der unvernetzten Harzmasse an.
2. Ab bestimmter Energiemenge startet exotherme Härtungsreaktion
→ zusätzlicher Temperaturanstieg
3. Nach abgeschlossener Reaktion nimmt die vernetzte Formmasse die Werkzeugtemperatur an.



Viskositätsverhalten eines Duomers:

- Das Vorprodukt wird erwärmt → Viskosität sinkt
- Mit Start der Vernetzungsreaktion steigt die Viskosität.
- für die Verarbeitung bleibt somit nur ein begrenztes Zeitfenster (ca. 60 s).



Pressen

Vulkanisation von Elastomeren (z.B. Vulkapressen von Kautschuk) → **Reifenherstellung**
= Vernetzung mithilfe von Schwefel oder Schwefelverbindungen

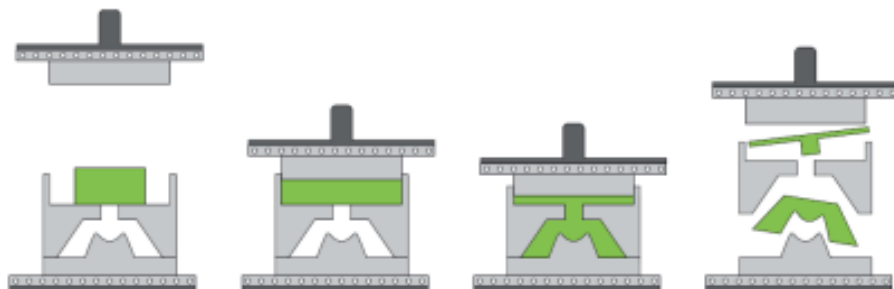
- Vernetzung von Elastomeren
- Mischung aus (unvernetztem) Kautschuk, Schwefel, Katalysatoren und Füllstoffen erhitzen
→ Kautschukmoleküle werden durch Schwefelbrücken vernetzt
- Elastizität:
 - abhängig von der Anzahl der Schwefelbrücken: je mehr Schwefelbrücken vorhanden sind, desto härter wird das Elastomer
 - Anzahl der Schwefelbrücken ist abhängig von der zugesetzten Schwefelmenge und der Vulkanisationsdauer
 - Alterung des Elastomers: Schwefelbrücken werden nach und nach durch Sauerstoffbrücken ersetzt → verliert Dehnfähigkeit und Elastizität (Rückstellfähigkeit)

Werkzeuge

- Tauchkanten- = Füllraumwerkzeuge
 - Benötigen eine genaue Dosierung der Formmasse
- Überlaufwerkzeuge
 - Nutzen Überschuss, um Reaktionsschwindung zu kompensieren
 - Entstehender Grat muss entfernt werden

Transferpressen

- Verfahren für die Verarbeitung von Kautschuk zu Elastomer
- Das unvernetzte Vorprodukt wird in einen Transfertopf gelegt.
- Erst nach dem Schließen der Presse wird die eigentliche Kavität gefüllt.
- Nach abgeschlossener Vulkanisation müssen sowohl Bauteil als auch das Transferfell entfernt werden



- + geringere Zykluszeit und gleichmäßigere Vernetzung als beim Vulkapressen
- hoher Abfallanteil ist teuer

Spritzgießen von Elastomeren und Duromeren

Verfahrensablauf

- Vorprodukte werden z. B. als körniges Haufwerk, Schnitzmassen klebriger Konsistenz oder als flüssiges Monomer in die Spritzgießmaschine eingefüllt und in den Schneckengängen erwärmt
- Sobald Reaktion startet, muss die Schnecke gekühlt werden, damit die Vernetzung nicht in der Schnecke bzw. im Schneckenvorraum stattfindet.
- Eingespritzt wird in ein beheiztes Werkzeug
- Vernetzungsreaktion kann bis zu mehreren Minuten dauern.

Besonderheiten

- Es bilden sich leicht Überspritzungen/Grate, die kostenintensiv entfernt werden müssen
- Rückstände im Werkzeug, die entfernt werden müssen
- Werkzeug leidet unter Korrosion durch Monomere und unter Abrasion
- Langsamer und teurer als Thermoplast-Spritzgießen, aber immer noch das schnellste für vernetzende Formmassen

Verarbeitung von Polyurethan

Schaumstoffe allgemein

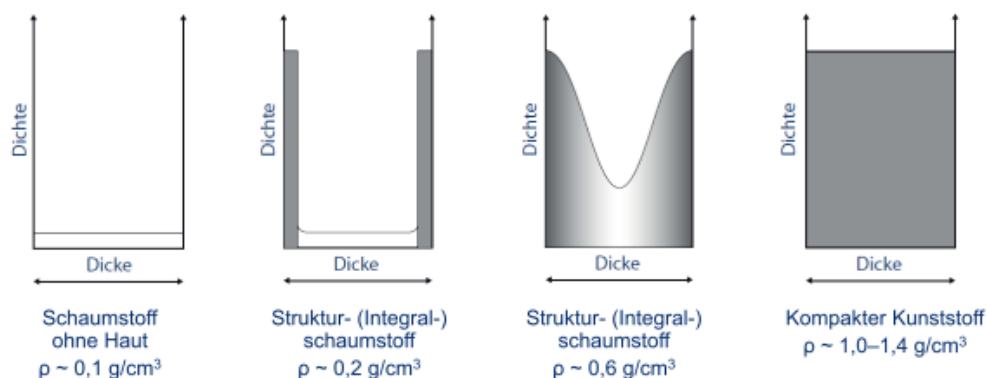
- Sehr niedrige Dichte, zellige Struktur mit Stegen und Zellwänden
- Eigenschaften verändern durch Wahl der
 - Rohstoffe,
 - Zusatzstoffe,
 - Art des Schäumungsprozesses
- Schaummorphologie wird charakterisiert durch
 - Zellgeometrie
 - Zellgröße und deren Verteilung
 - Gesamtdichte und der Dichteverteilung
- + Steigerung der Struktur-Steifigkeit (Hartschaum)
- + Energieabsorption, hohe Isolationswirkung (Weichschaum)
- geringe Festigkeit
- Oberflächenmängel
- keine exakte Eigenschaftsvorhersage



Dichteverläufe von Schäumen

→ je nach Wahl des Treibmittels und der physikalischen Bedingungen

→ Idealfall: Parabelförmiger Dichteverlauf



Polyurethan (PUR) – ein Werkstoff nach Maß

- Mögliche Zusatzstoffe: Fasern, Mineralmehl, Farbstoffe, Flammenschutzmittel
- Polyaddition von PUR:
 - aus Polyisocyanaten und Polyalkoholen
 - je nach Vernetzungsgrad entsteht Duromer oder Elastomer
- Treibreaktion: Treibmittel (z.B. Wasser) notwendig
 - Bei Reaktion von Isocyanat mit Wasser entsteht CO₂, welches das immer höher viskos werdende Reaktionsgemisch aufschäumt
 - CO₂ diffundiert wieder aus, schrumpft der Schaumstoff, und versprödet dabei

Reaction-Injection-Moulding (RIM)

- Herstellungsverfahren vieler Bauteile aus PUR
- Noch nicht reagiertes Gemisch in Form einbringen (offen oder geschlossen)
 - Offene Form: auf langsame Systeme und Herstellung von Produkten mit zusätzl. Verstärkungsmitteln
 - Geschlossene Form: schnelle Systeme, Integralschaumstoffe oder Schäume höherer Dichte

4.4. Einführung in die Technologie der Faserkunststoffverbunde

Einführung

Zwei entscheidende technische Vorteile von Faserkunststoffverbunden:

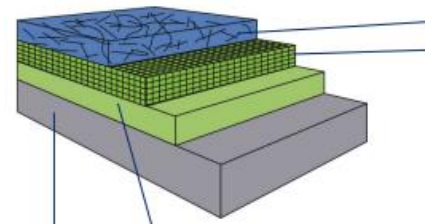
1. Festigkeit pro Dichte
2. Steifigkeit pro Dichte
 - Je länger die Faser, desto besser die Kraftübertragung.
 - Schlüssel zum Erfolg: kostengünstige Herstellbarkeit
 - Die gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften sind entscheidend

Technologie der Faserkunststoffverbunde: Wie kommt die Faser in die Matrix?

Handlaminieren und Faserspritzen

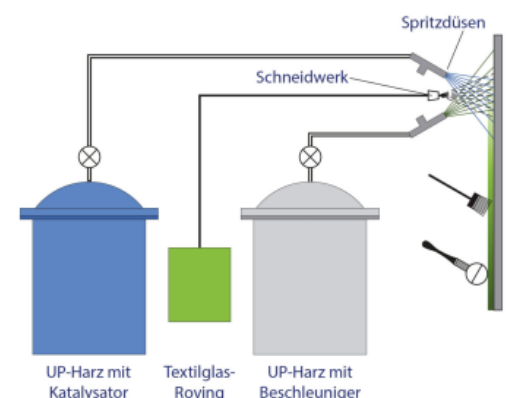
Handlaminieren

- für Kleinserien-Bau von z.B. Bootsrümpfen, Segelfluggbau, Rotorblätter für Windenergieanlagen
- Langfasern und Endlosfasern eingesetzt
- Manuelles Verfahren mit einer Form aus z.B. Holz
 - Auf die polierte Form werden schichtweise unausgehärtete Duromermatrix und Langglasfasern oder -matten aufgebracht, die mit der Zeit gemeinsam aushärten.



Faserspritzen mit handgeführter Sprühpistole

- z.B. Wasserrutschbahnen, Badewannen, Schwimmbecken
- Glas-Kurzfasern/UP-Harz
- Kostengünstig
- Automatisierbar
- Nur geringe Steigerung der mechan. Eigenschaften



Pressen von SMC/GMT

Sheet Molding Compound (SMC)-Verarbeitung

- Formstoffe aus mind. 1 ungesättigten Polyesterharz, Verstärkungsfasern und Füllstoffen
- PE-Trägerfolie + unvernetzte Harzmasse + Glasfaserrovings aufgerieselt + harzbeschichtete PE-Trägerfolie
- unvernetzten Pakete werden gestapelt, vorgewärmt und dann in die beheizte Presse gelegt

Typen von SMC-Halbzeugen



SMC-R

mit unausgerichteten
Langfasern



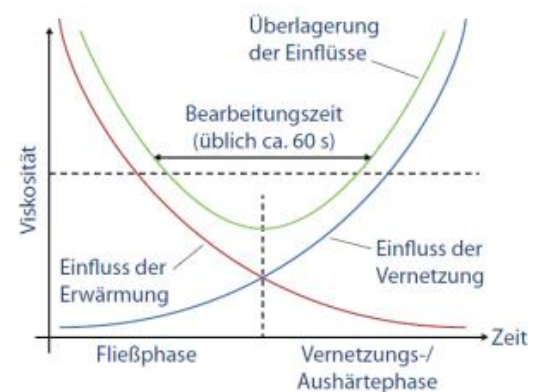
SMC-D

mit gerichteten
Langfasern



SMC-C

mit gerichteten
Endlosfasern



Viskositätsverlauf: (wie „Vernetzende Formmassen“)

- Erstarrung der Formmasse erfolgt durch Vernetzung nach Wärmezufuhr
- Das Vorprodukt wird erwärmt → Viskosität sinkt
- Mit Start der Vernetzungsreaktion steigt die Viskosität.
- Für die Verarbeitung bleibt somit nur ein begrenztes Zeitfenster

SMC im Vergleich zur Metallausführung



Sonnendach aus SMC:

- 25 % Gewichtsersparnis
- Integration von Funktionen
- ein Bauteil ersetzt 20 Metallbauteile
- Gestaltungsfreiheit (cw-Wert)

Stoßfänger aus SMC:

- Gestaltungsfreiheit
- geringere Investitionskosten
- keine Korrosion
- geringes Gewicht
- hohe Stoßfestigkeit

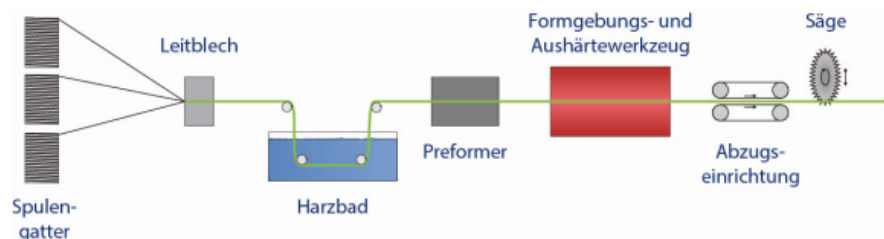
Kun:

Glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT)

- GMT-Halbzeuge werden vor dem Umformen erwärmt, dann im kalten Werkzeug umgeformt und zugleich gekühlt

SMC	GMT
höhere Steifigkeit	Höhere Schlagzähigkeit
Temperaturbeständiger	Geringere Materialkosten
Inhärenter Flammenschutz	Rohmaterial lagerbar
Besser lackierbar	Schönere Oberflächen ohne Lackierung

Pultrusion von Endlosfasern



- Endlosfasern bzw. -rovings auf Spindeln gelagert
- Durch Harzbad gezogen, dann durch Formgebungswerkzeug → im Werkzeug reagiert das Monomer zum Polymer

Arbeiten mit Prepregs (Vorimprägnierung)

Pre-impregnated – vorimprägnierte Fasern

- Es gibt „trockenes“ (reines Fasermaterial) und „nasses“ (Faser bereits mit Monomer oder Polymer verbundene) Halbzeuge
- duromere Prepregs müssen kühl gelagert werden, sonst evtl. vorzeitige Aushärtung des Monomers
- thermoplastische Prepregs (=Organobleche) müssen zur Verarbeitung erwärmt werden, Lagerung unkritisch

Verarbeitung von Thermoplast-Prepregs



Widerstandserwärmung als effiziente Aufheizmethode für Prepregs

- Ersetzen des Infrarot-StrahlungsOfens durch direkte Bestromung der Kohlenstofffasern
 - Hohe Wirkungsgrad

- Schnelle Erwärmung
- Schonende Erwärmung
- Einsparung von zwei Prozessschritten

Harzinjektionsverfahren

= Verfahren, bei denen die Verstärkungsmaterialien („Preform“ bzw. „Vorformling“) trocken vorliegen und nun mit der Matrix durchtränkt werden.

- Mit Überdruck: Resin Transfer Molding (RTM)
- Mit Unterdruck: Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI)

Resin-Transfer-Molding (RTM)

- Injektion durch **Überdruck**
- Halbzeug erhält Form durch Werkzeuggeometrie
- Aushärtung des Duromers („Harz“) im Werkzeug
- Vorteile:
 - geeignet für kleine und mittlere Serien (1.000 – 10.000 Stück/a)
 - Realisierung von Bauteilen mit hohen Faservolumengehalten (bis 65 %)
 - geschlossener Prozess, daher minimale Emissionen am Arbeitsplatz
 - beidseitig gute Oberflächenqualität
 - reproduzierbare Qualität: Faservolumengehalt, Wanddicke, Bauteilgewicht u Maße
- Nachteile:
 - zweiteilige Werkzeuge und Schließmechanismus notwendig
 - Zykluszeiten ab ca. 20 Minuten (→ hohe Prozesskosten!)
 - begrenzte Gestaltungsfreiheit
- Hochdruck-RTM: Höhere Werkzeugkosten erfordern höhere Stückzahlen zur Amortisation.
→ Der Prozess ist schneller und dadurch für größere Stückzahlen geeignet

Vacuum-Assisted-Resin-Infusion (VARI)

- Infusion durch **Unterdruck**
- nur geringe Formvariabilität
- Fließhilfe sorgt für Harzfluss in horizontaler Richtung, anschließend in Dickenrichtung
- geeignet für großflächige Bauteile, bei denen sich Werkzeuge nicht lohnen

Dreidimensionale Faserkunststoff-Verbundstrukturen

Flechten

- 2-dimensionales Halbzeug aus Rovings, durch Umflechten eines Kerns 3-dimensionale Strukturen in einem Verfahrensschritt möglich
 - demontierbare Kerne (meist Aluminium)
 - lösliche Kerne: z. B. wasserlöslicher Kern, wird nach Flechtprozess herausgelöst
 - verbleibende Kerne: z. B. mit Funktionsintegration durch Barrierschichten in Druckbehälter
- Duromer: Flechten von Fasern → trockenen Halbzeug, dann Harzinjektionsverfahren
- Thermoplast: ein Teil der Fasern besteht aus Thermoplast-Fasern (Hybridfasern), anschließend wird das Bauteil erwärmt und verpresst
- Faserwinkel:
 - Einstellbar über Vorschubgeschwindigkeit
 - Biaxial-Geflecht: zwei Faserrichtungen (20-85°)
 - Triaxial-Geflecht: zusätzlich eine 0°-Faser möglich

Wickeln

- Umwickeln eines rotierenden Kerns mit Rovings
- Verarbeitung aller Faser- und Harztypen, oder Prepregs (Autoklav nötig)
- einstellbarer Faserwinkel
- beschränkt auf rotierbare, konvexe Geometrien
- Wickelgeschwindigkeit aktuell bis 3,2 m/s
- hohe Reproduzierbarkeit
- gute Automatisierung

Vorteile von FKV (v.a. CFK)

- höchste gewichtsspezifische Materialeigenschaften
- Eigenschaften können dem Lastpfad angepasst werden
- Korrosionsbeständigkeit

4.5. Weiterverarbeitung

Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580:

Schaffen der Form	Ändern der Form				Ändern der Stoffeigenschaften
Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		Hauptgruppe 6 Stoffeigenschaftändern
Hauptgruppe 1 Urformen	Hauptgruppe 2 Umformen	Hauptgruppe 3 Trennen	Hauptgruppe 4 Fügen	Hauptgruppe 5 Beschichten	

Umformen (Hauptgruppe 2) – bedeutendstes Verfahren: Thermoformen

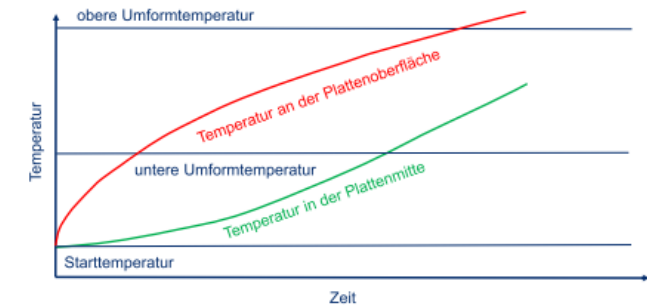
Anwendungen: Lebensmittelverpackungen, Kühlschrankinnengehäuse

Verfahrensschritte

- aus flächigen Kunststoffhalbzeugen werden 3D-Formteile erzeugt → Umformung und Ausformung erfolgt mit Druckluft oder auch durch Anlegen eines Vakuums
- Beispiel für Negativthermoformprozess
 - Halbzeug erwärmen durch Wärmeleitung, Konvektion, Wärmestrahlung, z.B. durch
 - Konvektionsofen
 - Kontaktheizung
 - Strahlungsheizung
 - Halbzeug einfahren
 - Werkzeug schließen
 - Stempel eintauchen
 - Formluft einströmen
 - Formteil abkühlen
 - Werkzeug öffnen
 - Formteil entformen
 - Formteil ausstanzen → Stanzgitter bleibt übrig (zerkleinert und weiterverarbeitet)

Halbzeuge

- Folien (rollbar, bis ca. 2.5mm Dicke)
- Platten (stapelbar, ab ca. 2.5mm Dicke)
- Häufig eingesetzt: sowohl amorphe als auch teilkristalline Thermoplaste, und thermoplastische Elastomere (TPE)
- Temperaturbereich für Thermoformen:
 - amorph: oberhalb Glasübergangstemperatur
 - teilkristallin: knapp unterhalb T_m
- Halbzeugerwärmung: wird durch obere und untere Umformtemperatur bestimmt
 - oberhalb des Bereichs: thermische Schädigungen
 - unterhalb des Bereichs: Mikrorisse



Formgebung – meist einseitig durch:

- Negativformung → maßgetreue Außenseite, schöne Innenseite
- Positivformung → maßgetreue Innenseite, schöne Außenseite
- Z.B. Becher: Vorstrecken notwendig, mechanisch oder pneumatisch
- Variierender Extrusionsprozess führt zu inhomogenen Halbzeugeigenschaften (z.B. unterschiedliche Orientierungen quer und längs zur Extrusionsrichtung)
 - inhomogene Deformation
 - Faltenbildung
 - Durchhang
 - geringe Verstreckgrade
 - Einreißen des Halbzeuges
 - Oberflächenrisse
 - Materialverfärbungen

Maschinen

- Einstationen-Maschinen: Erwärmung und Formgebung in 1 Station
 - sind „Plattenautomaten“
 - Für Artikel in kleineren und mittleren Losgrößen benötigt werden, schnelle Farbwechsel erfordern oder besonders großflächig sind.
 - z.B. Hausgerätetechnik, Automobiltechnik, allgemeiner Maschinenbau, Medizintechnik (z.B. CT-Scanner)
- Mehrstationen-Maschinen: Erwärmung und Formgebung in getrennten Stationen
 - sind „Rollenautomaten“ (es werden gerollte Halbzeuge verarbeitet)
 - für Artikel in mittleren bis sehr hohen Stückzahlen, geringflächig sind
 - z.B. Joghurtbecher, Trinkbecher, Schalen, Keks-Trays, ...

Vorteile und Nachteile technischer Teile ggüber Spritzgießen:

- + hohe Teilemasse (bis 125kg)
- + große Formteile (bis 4m²)
- + flexible Wanddicken durch Wechsel des Halbzeugs
- + kostengünstig bei kleinen Stückzahlen
- + geringe Änderungskosten, z.B. Farbwechselkosten
- + homogene Mehrschichtverbunde möglich

- wenig Gestaltungsmöglichkeit
- keine gleichmäßige Wanddickenverteilung
- schwierige Temperaturführung
- bei zugeschaffenem Halbzeug: keine Einflussnahme des Verarbeiters auf die Rezeptur der Folie möglich.

Vorteile und Nachteile von Verpackungsteilen ggüber Spritzgießen:

- + geringe Taktzeiten
- + Verarbeitung von Halbzeugen möglich
- wenig Gestaltungsmöglichkeit
- keine gleichmäßige Wanddickenverteilung
- schwierige Temperaturführung
- bei zugeschaffenem Halbzeug: keine Einflussnahme des Verarbeiters auf die Rezeptur der Folie möglich.

Mechanische Bearbeitung von Kunststoffen

Mechanische (spanende) Bearbeitung von Kunststoffteilen:

- Zuschneiden von Halbzeugen (z.B. für das Thermoformverfahren),
- Nachbearbeitung von Formteilen (z.B. Entgraten, Bohren),
- Herstellung massiver Bauteile (z.B. Modellbau, Zahnräder) oder
- Herstellung von Probekörpern für die Schadensanalyse.

Mechanische Bearbeitungsverfahren, bekannt aus der Holz- und Metallbearbeitung:

- Sägen, Fräsen, Schleifen, Polieren, Bohren, Drehen

Fügeverfahren (Hauptgruppe 4)

Schweißen

Welche Gruppen von Kunststoffen kann man schweißen? (potenzielle Prüfungsfrage)

- Thermoplaste lassen sich nochmal aufschmelzen
- Elastomere und Duromere lassen sich nicht mehr aufschmelzen!
- z.B. PMMA mit PC

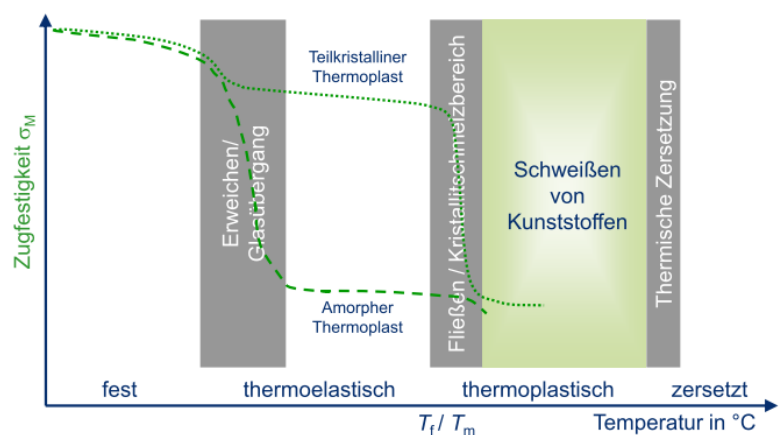
Definition

= „das unlösbare Verbinden von Bauteilen unter Anwendung von Wärme und/oder Druck, mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoffen“

→ Temperatur oberhalb T_f/T_m , unterhalb Zersetzungstemperatur!

Allgemeine Merkmale

- besondere Schwachstelle: Schweißnähte faserverstärkter Thermoplaste
- nur teilkrist. mit teilkristallinen Thermoplasten schweißen und amorphe mit amorphen; aber kann sein, dass es trotzdem nicht geht
- unerwünschte lokale Eigenspannungen und Orientierungen entstehen an Schweißnaht → aufgrund der lokalen Schmelzeerzeugung und wieder Abkühlung
- Kerben der Schweißwülste wirken lokal spannungsüberhöhend



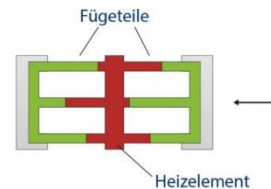
→Schweißnähte sind Schwachpunkte!

Schweißverfahren – Einteilung nach Wärmeübertragung

- Wärmeleitung → Heizelementschweißen
- Konvektion → Warmgas(-extrusions-)schweißen
- Reibung → Ultraschallschweißen (innere Reibung)
→ Vibrationsschweißen (äußere Reibung)
- Strahlung → Laserschweißen

Heizelementschweißen:

- Heizelement mit Kontur der zu verschweißenden Teile → nur kleiner Bereich wird erwärmt
- Ablauf: Angleichen, Erwärmen, Umstellen, Fügen, Abkühlen unter Druck
- + hohe Schweißnahtgüte
+ sehr hohe Kraftübertragung
- Hohe Zykluszeit
→ langsam, aber gut!



Warmgasschweißen

- mit heißer Luft wird an einer bestimmten Stelle der Schweißdraht und das Teil erhitzt

Ultraschallschweißen

- durch Vibrationen werden die Teile angeschmolzen
- z.B. bei Befüllen von Einwegfeuerzeugen, viele Medizintechnikprodukte
- + schnellstes Schweißverfahren!
- Qualität nicht so toll: schlechte Kraftübertragung, limitierte Schweißfläche, Werkstoffauswahl eingeschränkt

Vibrationsschweißen

- Fügeteile werden durch Reibbewegung erwärmt und plastifiziert

Laserschweißen

- Oft in der Medizintechnik verwendet und für hochsensible Elektronikbauteile
- Unteres Fügeteil wird mit speziellen Pigmenten verändert, sodass der Laser absorbiert wird; Oberes Fügeteil ist transmittierend (lässt durch)
- + filigrane Bauteile
+ minimale mechanische und thermische Belastung
+ keine Kontamination
- besondere Werkstoffe für die Unterseite benötigt → teurer

Kleben

Definition: Verbinden/Fügen mit Hilfe eines Klebstoffes

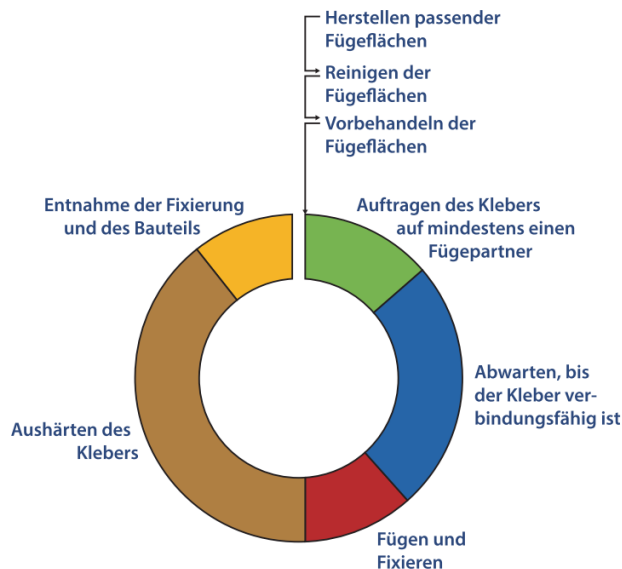
→ feste und dauerhafte Oberflächenverbindung → keine chemische Verbindung!

Eigenschaften:

- man kann alle Kunststoffe kleben → man kann auch Kunststoffe mit anderen Materialien kleben, z.B. Holz oder Glas

- Klebstoff verbindet die Teile durch Flächenhaftung (Adhäsion) und innere Festigkeit (Kohäsion)
- Vulkanisation: ist nicht Kleben!
- Schubbeanspruchung günstig, Schälbeanspruchung sehr ungünstig!
- Ein Klebstoff muss zunächst in flüssiger Form vorliegen, um in alle Zwischenräume zu gelangen und dann zu erstarren/abzudampfen!
- + Kann zus. Aufgaben erfüllen (Abdichten, thermische oder elektrische Isolation)
 - + Gute Flächenausnutzung
 - + Verzugsausgleich in Grenzen möglich
 - möglichst nur auf Scherung, nicht auf Zug belasten
 - aufwendige Vorbereitung der Fügeflächen
 - **einige Kunststoffe sind schwer zu kleben**
 - Aushärten oft sehr zeitaufwendig

Verfahrensschritte:

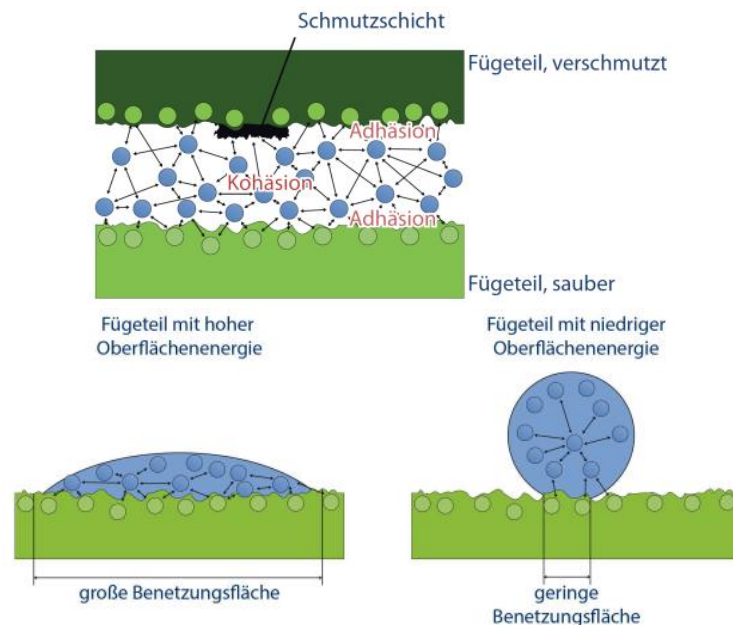


Einteilung von Klebstoffen

- Physikalisch abbindend – Erstarrung durch Abkühlen bzw. Abdampfen eines Lösungsmittels:
 - Lösungsmittelklebstoff
 - Dispersionsklebstoff (UHU®)
 - Schmelzklebstoff
 - Kontaktklebstoff (Pattex®)
- Chemisch abbindend – Erstarrung durch Bildung chemischer Bindungen/Netzstruktur:
 - Polymerisationsklebstoff
 - Polyadditionsklebstoff
 - Polykondensationsklebstoff

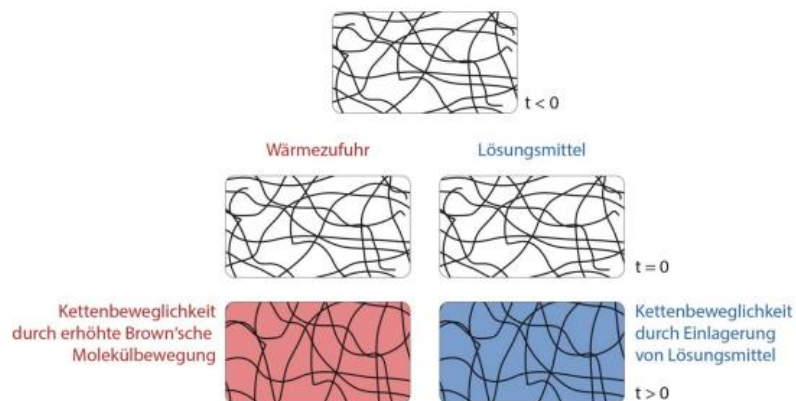
Wirkmechanismus Adhäsion

- *Mechanische Adhäsion:*
Haftung durch Verklammerung zwischen Klebstoff und Füge-teiloberfläche
- *Spezifische Adhäsion:*
Haftung durch Ausbildung zwischenmolekularer Kräfte (Dipol-Dipol, Dispersion, Wasserstoffbrücken → Nebenvalenzkräfte)



Fügen durch Kleben
„Kaltschweißen“ durch Anlösen der Oberfläche

IKT KUNSTSTOFF
TECHNIK
STUTT GART



Prof. Dr.-Ing. Christian Borten

72

Schnappen

Grundformen von Schnappverbindungen

- Schnapphaken
- Schnappkugel
- Schnappzylinder

Eigenschaften

- Geringer E-Modul von Kunststoffen wird ausgenutzt
- z.B. Duschgel-Flasche
- ermöglichen das Fügen unterschiedlicher Werkstoffe
- einfach und kostengünstige Montage → Kostenersparnis
- können direkt in das Bauteil integriert werden (Spritzgießen)
- gestaltunglich flexibel, lös- und unlösbar verbindungen konstruierbar

Schrauben

- wie beim Holz →schneidet sich ihr eigenes Gewinde
→5x maximal in die gleiche Stelle schrauben
- Rissanfälligkeit durch Kerben bei Verwendung von Blechschrauben (kostengünstig!)
→kunststoffgerechte Schrauben kosten das Doppelte
- z.B. Deckel-Gehäuse-Verbindungen
- bei Verschraubung >5x lösen: Metall-Inserts erforderlich

Nieten

Vorgang

- Nieten von Kunststoffen untereinander oder mit anderen Werkstoffen ist formschlüssiger Vorgang.
- Nietimpuls der Maschine muss der Bruchempfindlichkeit des Kunststoffes angepasst sein.
- Falls einer der Fügepartner ein thermoplastischer Kunststoff ist, kann das Ende des thermoplastischen Zapfens vor dem Nieten durch Wärmeeinbringung (z.B. Kontakt oder Ultraschall) relativ kraftarm plastisch zu einem Nietkopf umgeformt werden

→ Sollen Bauteile mit Nieten gefügt werden, so wird stets eine Seite der Fügepartner optisch beeinflusst werden.

→ Es gilt zu beachten, dass sich die Verbindung beim Fügen mit Nieten mit der Zeit lockern kann und Bewegungen möglich werden.

Beschichtung (Hauptgruppe 5)

- Trägermaterial ist z.B. billiger, Oberfläche soll anders sein, oft höherwertiger

Verfahren

- Bedampfen
 - PVD- und CVD-Verfahren
 - Verbesserung der Kratzfestigkeit und der Barrierewirkung
 - Durch Metaldampf elektrisch leitfähig
- Benetzen
 - Oberflächenspannung beeinflussen →hydrophil oder hydrophob
- Barrierewirkung
- Galvanisieren: fast nur ABS
- Lackieren
 - Farbgestaltung
 - Steigerung der Kratzfestigkeit + als Barrierschicht
 - Anforderungen an die Oberfläche und Kosten bestimmen die Auswahl des Lackierens
 - UV-aushärtende und thermisch aushärtende Lacke
- Bedrucken
 - Tampondruckverfahren (mit Stempel)
 - Siebdruckverfahren: Aufbringen über Gummirakel
- Kaschieren mit Folie
- Beflocken mit Klebstoff und elektrisch aufgeladenen Flockfasern

5. Produktentwicklung mit Kunststoffen

5.1. Einführung in das Konstruieren mit Kunststoffen

Einführung



Werkstoffauswahl



Warum der Aufbau so?

- Thermische und chemische Eigenschaften nicht mehr beeinflussbar später → deshalb erste Filterkriterien
- Mechanische Eigenschaften können noch konstruktiv beeinflusst werden (und Zusatzstoffe hinzufügen etc.) → deshalb weit unten

Spezielle Bauteilanforderungen: (Potentielle Prüfungsfrage)

- Reinheitsanforderungen (Medizintechnik)
- Preis
- Art des Fertigungsverfahrens
- Anforderungen an Weiterverarbeitung: Kleben, Einfärbbarkeit, Schweißbarkeit

Nutzen der Gestaltungsfreiheit – Integration von Funktionselementen (Spritzgießen!!)

Beispiele

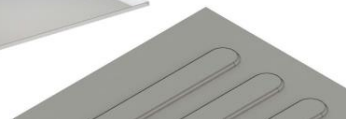
- z.B. Orte, an denen Schrauben später hineingeschraubt werden = Schraubdome
- Gänge für Kabelführungen

- Motor- und Getriebepositionierung
- Schnappverschlüsse:
ermöglichen kostengünstige und montagefreundliche Verbindung von Anbauteilen
- Gespritzte Gelenke für thermoplastische Bauteile besser als montierte metallische
- Schnapp- und Filmscharniere
- Inserts z.B. aus Metall

Nutzen der Gestaltungsfreiheit – Erhöhung des Flächenträgheitsmoments

Durch Rippen

- Natürliche „Rippen“ zur Versteifung - Erhöhung des Flächenträgheitsmomentes
- Flächenträgheitsmoment eines Bauteils erhöht sich mit steigendem Abstand des Schwerpunkts zur Drehachse („Steiner-Anteil“).
 - höhere Bauteilsteifigkeit im Vergleich zu einem massiven Bauteil
 - Materialeinsparung bei gleicher Tragfähigkeit
 - Reduzierung von Gewicht und Kühlzeit
- Flächenträgheitsmoment * E-Modul = Biegesteifigkeit
- **Dicke steigt im Quadrat → Kühlzeit steigt → so dünn wie möglich konstruieren → t proportional zu s^2**



Durch Wölbungen/Stufen

- Gewölbte Oberflächen oder abgestufte Zonen gewährleisten bessere Formbeständigkeit

Konstruktionskriterien

a) Werkstoffgerechte Konstruktion

Gründe für Bauteilverzug

- Ursache: unterschiedliche lokale Schwindung aufgrund von
 - Winkelverzug
→ Was später erkaltet, steht unter Zugspannung!
→ Ungleichmäßig verteilte Eigenspannungen bewirken Verzug!
 - Inhomogene Werkzeugkühlung
 - Waddickenunterschiede
 - Geometrie- und Orientierungseinfluss

Unterschiedliche Kühlung von Ecken

- Innenecke aufgrund von Geometrie schlechter zu kühlen
- Außerdem: Kühlbohrungen dort schwerer zu platzieren!

→ Jeder Werkstoff hat seinen eigenen Schwindungswert

→ wärmere Oberflächen schwinden mehr

Typische Bauteilfehler durch Massenanhäufung

- Einfallstellen
- Lunker (Löcher)



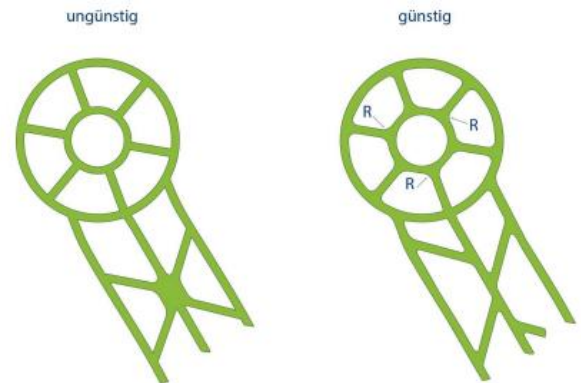
Massenanhäufung durch andere Gestalt vermieden

Vermeidung von Massenanhäufungen

- Gestalt ändern, z.B. Auskernung
- Abgerundete Ecken statt rechte Winkel (gleicher Durchmesser überall)

Empfehlungen:

- Empfehlung für Rippendicke und -radius:
Rippe dünner als Wanddicke ($s_{\text{Rippe}} = 0,5 \cdot s$)
- Kaschieren von Einfallstellen
- **Vermeiden von Rippenkreuzungen**



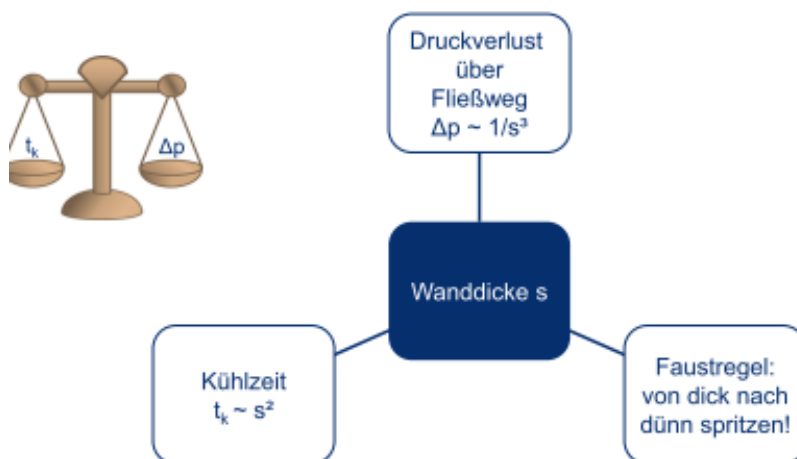
Anbringen von Schraubdomen

- Verstärkung durch Rippen
- Anbinden des Domes an benachbarte Wände
- Auch hier Materialanhäufung verhindern!
- daher normalerweise freistehend, versteift oder über dünne Rippen mit dem Bauteilrand verbunden, um die Biege- und Torsionssteifigkeit zu erhöhen und das Einschrauben zu erleichtern.

b) Fertigungsgerechte Konstruktion

Wanddickengestaltung ist stets ein Kompromiss

- Vermeidung langer Fließwege: so dünn wie möglich aber dann erhöhter Druckbedarf beim Einspritzen



Innere Eigenschaften

- Durch Verarbeitungsprozesse werden die inneren Eigenschaften verändert (bei Schmelzfluss und Erstarrungsvorgang).
- Durch das Erfassen der Verarbeitungseinflüsse auf die inneren Eigenschaften kann der Einfluss der Verarbeitung auf die Bauteileigenschaften genutzt werden.

- Im Wesentlichen beeinflusst werden:
 - Eigenspannungen
 - Orientierungen
 - Kristallisation

Ziele der fertigungsgerechneten Konstruktion

- Wenig Bindenähte (bzw. in schwach belasteten Bereichen)
- Geeignete Orientierung
- Gleichlange Fließwege

Ist das Bauteil entformbar (kann es einfach durch eine Öffnungsbewegung aus der Form entfernt werden)?

- Wenn man im Spritzgießwerkzeug einen Schieber verwendet, wird das teurer und komplexer
→ deshalb auf Schieber verzichten und Hinterschneidungen vermeiden
- Bei Gewinden: Drehmechanismus oder Zwangsentformung
- Zwangsentformung: wenn Dehnung es zulässt

Vorsehen von Entformungsschrägen

- Formschrägen erleichtern den Teileauswurf und verringern Werkzeugverschleiß
- Zur Reduzierung von Entformungskräften
- Alles was geht konisch konstruieren

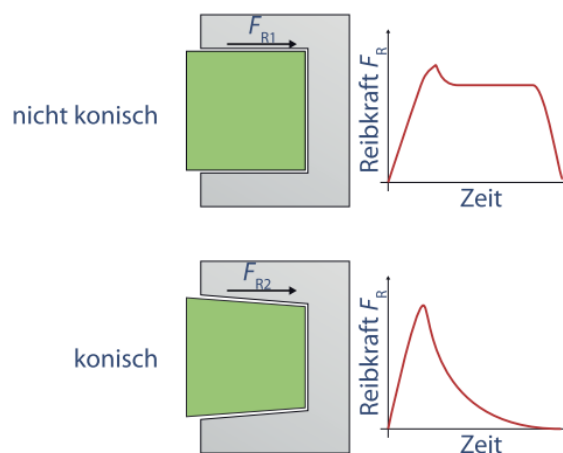


Bild 5.48

Entformungsschrägen vermindern Reibkraft bei Entformung

c) Beanspruchungsgerechte Konstruktion

Grundsatz: Gleichmäßige Lastverteilung

KERBEN reduzieren (z.B. Schweißnähte)

- Führt zu lokalen Spannungsspitzen
- ggf. „notwendige Überdimensionierung“, die bei gleichmäßiger Lasteinleitung vermeidbar wäre
- mit Radien abrunden → größere Biegung möglich

5.2. Nutzen von Prototypen

Rapid Prototyping

- Prototypen: Direkt erzeugte Kunststoffprototypen zur Überprüfung von Funktionen
- Modelle: Direkt erzeugte Modelle für Folgeverfahren wie Vakuumguss oder Feinguss

Rapid Tooling

= Anwendungen, die das Ziel haben, unter Einsatz von Rapid Prototyping-Verfahren Spritzgießwerkzeuge und Formen zur Herstellung von Prototypen und Vorserien zu bauen.

Allgemeine Charakteristika der Verfahren

- Komplexe Geometrien möglich
- Bis auf Tropfenablegeverfahren sind sehr spezielle Werkstoffe nötig
- Individualität der Produkte
- Geringe Korrekturkosten

Prinzipieller Ablauf

- Modell am Computer mit CAD
- Slicing am PC
- Schichtweise Aufbau, teils mit Stützstrukturen → jeweils eine Schicht des Werkstoffs aufgetragen und mit darunter liegender verbunden.
- Fertiges Bauteil, oft mit sichtbaren schichtartigen Strukturen

3D-Printing (3DP)

- Verfestigung eines Pulvers mit Bindemittel: „Tintenstrahldrucker“-Prinzip
- Pulver mit Klebstoff, z.B. Wasser-Gips, Kleber-Sand
- kostengünstig, Qualität nicht so toll → kompakte Anlage

Stereolithographie (SLA)

- punktgenaues Aushärten von flüssigem Photopolymer (Monomer) durch Belichtung mit einem UV-Laserstrahl
- Bauteile mit hoher Komplexität herstellbar (hohe „Auflösung“)

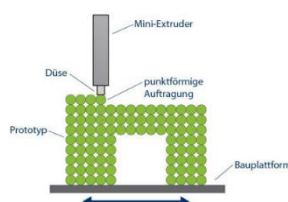
Selektives Lasersintern (SLS)

- Lokales Aufschmelzen von pulverförmigem Ausgangsmaterial durch einen CO₂-Laser (Infrarot-Strahlung)
- Resultat: Thermoplast
- Anlage teuer, hohe Komplexität möglich

Strangablegeverfahren/ Fused Deposition Modelling (FDM)

- Ablegen eines heißen Thermoplaststrangs mittels einer geführten Düse
- nicht so teuer, kompakte Anlage, komplexe Bauteile möglich

Tropfenablegeverfahren



6. Kunststoffe und Umwelt

6.1. Kunststoffabfälle

Entsorgung von Abfällen – juristische Lage

Europa: Richtlinie 2008/98/EG (Abfallrahmenrichtlinie)

Deutschland: Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG; seit 1996)

„Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen“

→ Produzenten anstelle der Kommunen zur Entsorgung verpflichtet

Das Duale System Deutschland = Interessengemeinschaft von Produzenten und Entsorgern

Tätigkeiten

- das Sammeln und Verwerten von Verkaufsverpackungen,
- das Recyceln von Elektro- und Elektronik-Altgeräten,
- das Verwerten von Transportverpackungen,
- die Standortentsorgung und
- das Pfandclearing.

→ „Der Grüne Punkt“! es gibt noch ähnliche Organisationen

→ medizinische Einmalartikel dürfen nicht recycelt werden: Kontaminationsgefahr (es wird verbrannt in hauseigener Verbrennungsanlage des Krankenhauses)

Regel: Entgelte richten sich nach Material und Gewicht der Verpackungen. Grob kann gesagt werden: Je geringer das Gewicht der Verpackung, desto niedriger ist das zu zahlende Entgelt.

→ Auswirkungen:

- Verpackungen wurden leichter
- überflüssige Umverpackungen wurden oft weggelassen
- schwer trennbare Blister-Verpackungen werden seitdem weniger eingesetzt.

Stoffliche und energetische Verwertung

Es wird unterschieden in: Kurzlebige Produkte – Verpackungen

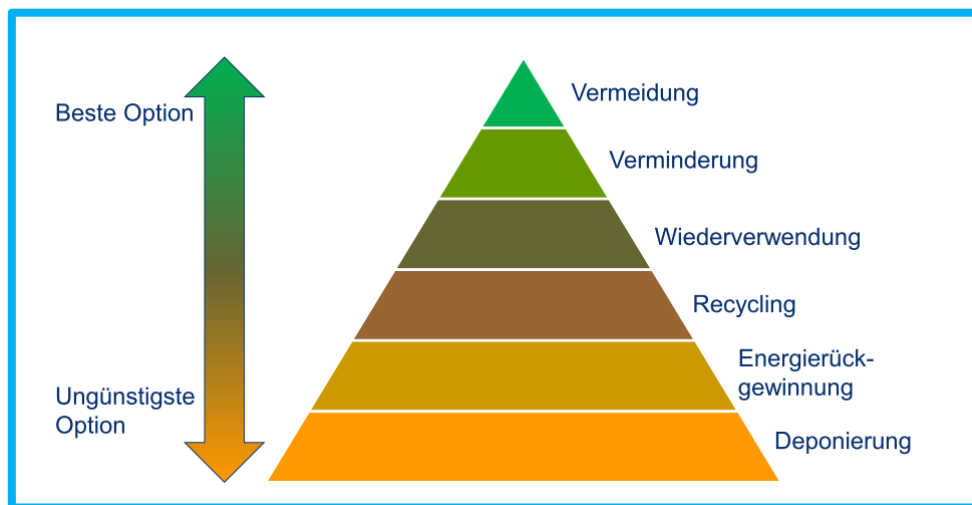
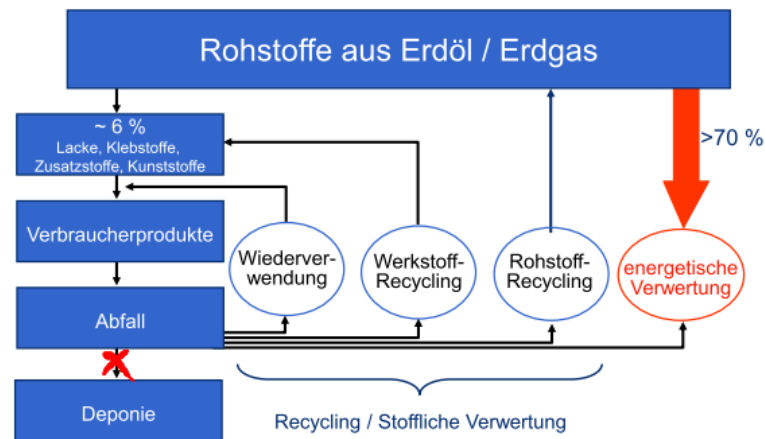
Langlebige Produkte – Bau

Produkte mit hohem Exportanteil – Automobil

- **Exportierter und importierter Abfall etc. beachten!**
- 99% der deutschen Kunststoffabfälle werden verwertet → 35% stofflich (Umwandlung in z.B. Granulat), 65% energetisch (Verbrennung)

Verwertung von Kunststoffabfällen

- Die stoffliche (werkstoffliche und rohstoffliche) Verwertung von Kunststoffen steigt weiter an und Kunststoff gilt deutschlandweit inzwischen als Wertstoff.
- nicht sinnvoll stofflich verwerten lassen sich: Mehrschicht-Verbundfolien; lackierte, beschichtete und stark verschmutzte Bauteile
- Durch Verbrennung (energetische Verwertung) kann Energie gewonnen werden (sog. Sekundärenergieträger) → Einsparung an Primärenergieträgern (Erdöl, Erdgas, Kohle)
- Am effizientesten: Kaskadennutzung → mehrfache stoffliche Verwertung der Kunststoffe, schließlich Verbrennung



Meeresverschmutzung

- Die Kunststoffindustrie beteiligt sich an konkreten Lösungen, z.B. „Operation Clean Sweep“, mit dem Ziel eines Null-Pellet-Verlusts entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Erzeuger zum Verarbeiter.
- 76% des Mülls im Meer sind Kunststoffe!
- **80% der Abfälle im Meer haben ihren Ursprung an Land**
- Flüsse mit den meisten Abfällen sind in Afrika und Asien (Niger, Nil, Mekong, Jangtsekiang, Huang Ge, Amur, Indus...)
- Durch Verwehungen, Auswaschungen und Erosion gelangen diese durch Flüsse und über Küsten in die marine Umwelt.
- „Stromaufwärts“ zur Ursache gesehen, müssen die Eintragungspfade in die Gewässer stärker untersucht werden. Unberücksichtigt bleibt z.B. der Eintragungspfad in terrestrische Umwelt über Ausbringung von Komposten und Gärprodukten

Mikroplastik: Mikroskopisch kleine Kunststoffpartikel

- primäre Kunststoffpartikel: durch Herstellung in mikroskopischer Größe (kosmetische Mittel, Wasch- und Reinigungsmittel)
- sekundäre Kunststoffpartikel: durch Zersetzung größerer Kunststoffteile (Fasern aus Textilien, Verpackungen, Reifenabrieb)
- Problematik:
 - schwer quantifizierbar und werden in Wasseraufbereitung nicht zurückgehalten

→ geraten über Flüsse in marine Lebensräume & werden von marinen Lebewesen mit Futter verwechselt

Kunststoffpartikel in komplexer organischer Matrix

- Problematik:
 - Kunststoffpartikel äußerst schwer von organischer Matrix unterscheidbar
 - Kein standardisiertes Verfahren zur Detektion und Quantifizierung
- Forschungsschwerpunkt:
 - Entwicklung eines Separators
 - Dichteseparation, Aufbereitung und Detektion mit IR-Spektroskopie

Biofilmbildung auf Kunststoffen

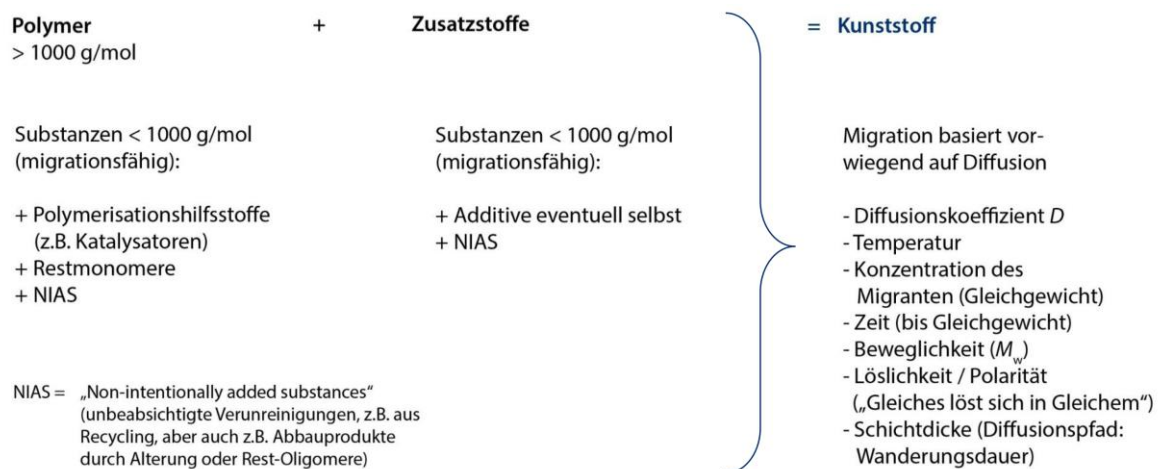
- Breitet sich mit zunehmender Einlagerungszeit aus & besteht hauptsächlich aus Grün- und Kieselalgen

6.2. Sind Kunststoffe „giftig“?

„Bedarfsgegenstände“: Gegenstände des alltäglichen Gebrauchs, welche direkt oder indirekt im Kontakt mit dem Menschen stehen

→ unterliegen dem Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch (LFBG)

Kunststoffe für Medizinprodukte werden durch das Medizinproduktegesetz geregelt (MPG)



Migration

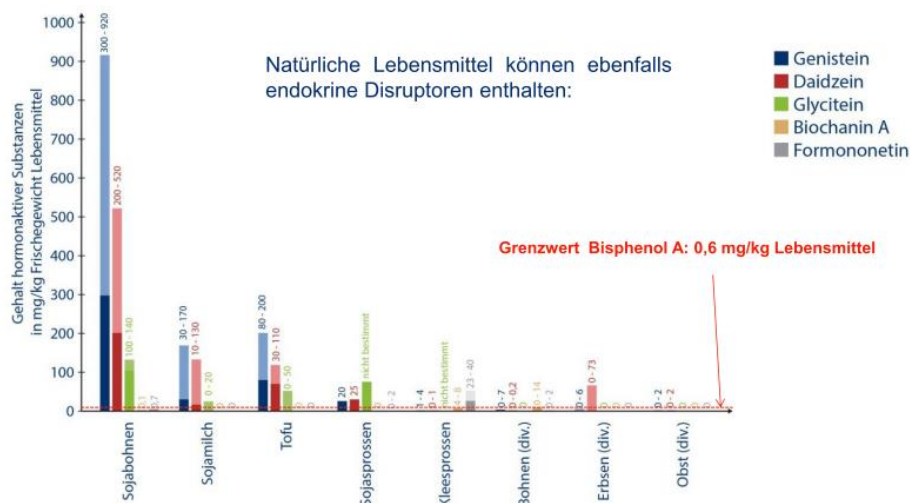
- nur Zusatzstoffe mit Molmasse < 1000 g/mol (Migrationsgrenzwert) → Polymere selbst gelten nicht als migrationsfähig, da ihre Molmasse größer 1000 g/mol ist
- basiert vorwiegend auf Diffusion und ist somit abhängig von
 - Diffusionskoeffizient D
 - Temperatur
 - Konzentration des Migranten
 - Zeit
 - Beweglichkeit
 - Löslichkeit bzw. Polarität
 - Schichtdicke

- Restmonomere und andere Chemikalien aus der Synthese können migrieren
 - Benzol ist krebserregend (Herstellung für Benzolderivate, z.B. Styrol)
 - Styrol ist fortpflanzungsschädigend (Herstellung von Polystyrol)
 - sicherstellen, dass Vorprodukte vollständig zu Polymeren umgesetzt sind
- Bisphenol A:
 - bei Herstellung von Polycarbonat (PC), Polyetherketon (PEK), Polysulfon (PSU) und Epoxidharz (EP) eingesetzt
 - nicht giftig, aber hormonähnliche Wirkung → endokriner Disruptor (im Körper innerhalb weniger Stunden umgewandelt und über die Niere ausgeschieden)
- Weichmacher für PVC: Phthalate gelten als reproduktionstoxisch und dürfen nicht in Konzentrationen > 1 M.-% in Spielzeug und Babyartikeln enthalten sein.

→ Die meisten Lebensmittelverpackungen sind aus PE und PP, welche weder Weichmacher noch Bisphenol A enthalten. Auch Getränkeflaschen aus PET sind frei von Phthalaten und Bisphenol A!
 → Vorsicht mit den Medien!

Sind Kunststoffe „giftig“?

- Kunststoffe sind umfassend reglementiert und kontrolliert im Vergleich zu anderen Werkstoffen → dennoch häufig sofort in Verdacht
- Lebensmittelverpackungen sind häufig großflächig oder vollständig bunt bedruckt
 → Druckfarben oder Lacke können durch die Kunststoffverpackung migrieren, was zu einer äußerlichen und/oder geschmacklichen Veränderung führt
- **Zahlreiche Lebensmittel enthalten ebenfalls Gifte oder Substanzen, die hormonähnlich wirken (sog. endokrine Disruptoren):**
 - in Pilzen, Mohn und Erdnüssen → Aflatoxine (1-10 mg/kg bestimmter Aflatoxine können einen Menschen töten)
 - Champignons → toxische und krebserregende Hydrazinverbindung Agaritin
 - Muskatnüsse → Myristicin, in größeren Mengen giftig
 - Waldmeister → Cumarin, max. 2 mg/kg in zubereiteten Speisen enthalten sein darf, größere Mengen an Cumarin sind gesundheitsschädlich
 - Himbeeren → natürliches Phenol 4-(4-Hydroxyphenyl)-butan-2-on, gesundheitsschädlich. Darüber hinaus sind auch das Keton Jonon und der Alkohol Geraniol mit allergischem Potential enthalten...



→ viele östrogenartige Substanzen in der Sojabohne!

6.3. Biopolymere und Biokunststoffe

Biopolymere im Körper: Haare, Fingernägel, DNA, Eiweiße im Körper

Begriff „Nachhaltigkeit“:

„Nachhaltigkeit ist eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten zukünftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“

Biokunststoffe – Einteilung (in Klausur erklären können, nicht unbedingt auswendig)

a) Bioabbaubare Kunststoffe (fossiler oder nachwachsender Kohlenstoff)

Allgemeines

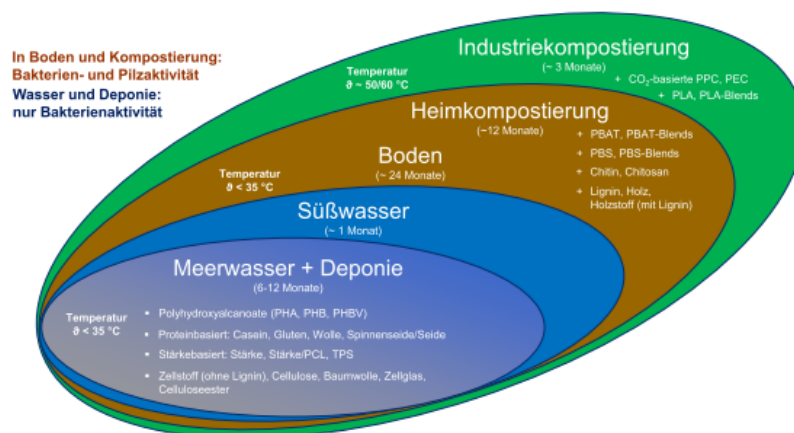
- Kann auch künstlich geschaffen sein im Labor, muss nur abbaubar sein
- Bioabbaubarkeit = biologischer Prozess organischer Materie, welche durch Mikroorganismen (Bakterien und Pilze) vollständig zu Wasser, CO₂/Methan, Energie und neue Biomasse umgewandelt wird
- **gesellschaftlicher Nutzen**: alternativer Entsorgungsweg
- Biologischer Abbau = Werkstoffeigenschaft
- Kompostierung = Produkteigenschaft
 - Besondere Art der biologischen Abbaubarkeit nach strengem Schema
 - zertifiziert-bioabbaubares Material, welches in bestimmtem Zeitrahmen unter kontrollierten Bedingungen (z.B. Kompostanlagen) zu Kompost umgewandelt wird →
 - grünes Blatt von einem Baum würde die Zertifizierung nicht bestehen, da aufgrund von Chlorophyll zu lange dauert

Vorgang des biologischen Abbaus

1. Besiedlung durch Bakterien (und Pilze)
2. Angriff der Kunststoffoberfläche durch Enzyme
3. Verstoffwechselung Polymerkettenfragmente
4. Zellteilung und dadurch stärkerer Angriff

Bakterien bauen auch in widrigen Bedingungen ab, von schlechtesten nach einfacher:

Meerwasser+ Deponie → Süßwasser → Boden + Heimkompostierung (ab hier sind auch Pilze vorhanden) → Industriekompostierung



„Oxo-abbaubare“ Additive und Masterbatch mit „organischen Materialien“

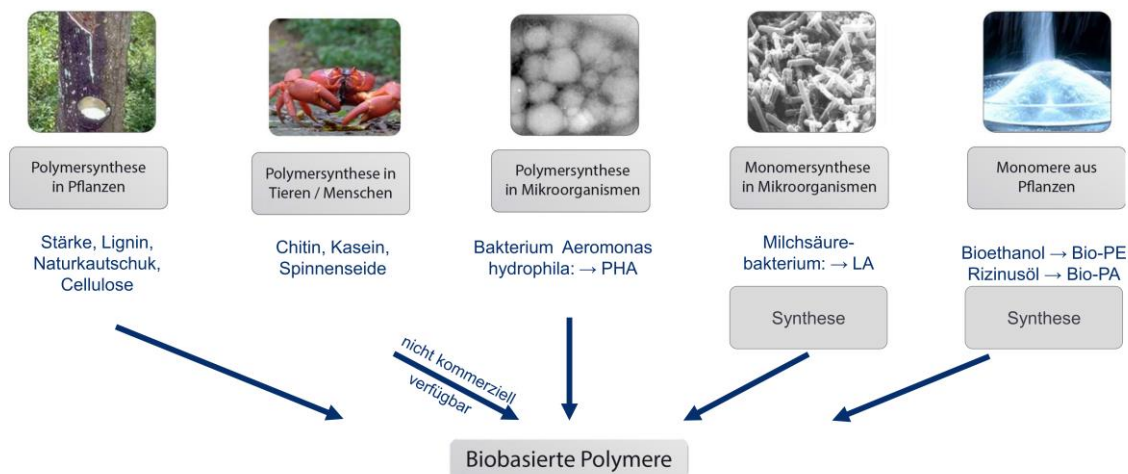
- Additive bestehen aus Übergangsmetallen (Kobalt, Mangan, Eisen, Zink), die Oxidation und Spaltung von Polymerketten in herkömmlichen Kunststoffen unterstützen, wenn diese Licht, Luft und Wärme ausgesetzt sind
- Masterbatch haben bioabbaubaren Anteil → kann organisch sein und innerhalb von Wochen abbauen → 95-98% des herkömmlichen Polymers werden lediglich in kaum sichtbare Kunststoffpartikel fragmentiert und nicht biologisch abgebaut
- Durch Kettenabbau werden winzig kleine, kaum sichtbare Partikel gebildet, die nicht biologisch abgebaut werden (Additivhersteller haben dies bisher nicht belegt), in die Nahrungskette gelangen und sich anreichern

b) Biobasierte Kunststoffe (ausschließlich nachwachsender Kohlenstoff)

- Nachwachsend = auf Rohstoffe bezogen, welche nach spätestens zwei Wachstumsperioden geerntet werden (z.B. Mais, Weizen, Gras, Bakterien)
→ **gesellschaftlicher Nutzen**: Reduktion von fossilem CO₂, Unabhängigkeit von Erdöl
- Muss nicht zwangsläufig bioabbaubar sein!
- **“Biobasiert” ist eine Werkstoff- und zugleich Produkteigenschaft**
- **“Biobasiert” = ausschließlich nachwachsende Kohlenstoffquelle**

Herkunft der Monomere
Herstellung biobasierter Polymere

IKT KUNSTSTOFF
TECHNIK
STUTT GART



Verarbeitungsfähige Biokunststoffe

- reines Biopolymer (unmodifiziert) kaum auf herkömmlichen Maschinen verarbeitbar → muss aufbereitet werden
- Biokunststoff = veredeltes Biopolymer → z.B. Blends herstellen, diese Biokunststoffe sind dann verarbeitbar

Beispiele für Biokunststoffe:

- Wasserfeste Müllbeutel → abbaubar
- Luftpolsterfolie
- Kompostierbare Netze → abbaubar
- Windeln → abbaubar
- Folien in der Landwirtschaft, Weinlese-Clips → abbaubar
- Schuhe und Spielzeuge → biobasiert
- Konsumelektronik → biobasiert
- Automobil → biobasiert
- Catering → bioabbaubar