

Inhalt

1. Einführung und Wiederholung	4
Polyurethane	4
Lernziele der gesamten Vorlesung	4
Wiederholung Kunststoffe	4
Zusammenfassung/Übung 1.	13
2. Einführung Polyurethane	14
Polyurethane: Die Chemie muss stimmen	14
Weichschaum	18
Hartschaum	19
Weicher Integralschaum	20
Harter Integralschaum	21
Gießelastomer	22
Thermoplastisches Polyurethan	22
Zusammenfassung/Übung 2.	22
3. Chemie der Polyurethane.....	24
Die Chemie muss stimmen	24
Von den Rohstoffen zur Rezeptur	33
Rezepturberechnung.....	39
Zusammenfassung/Übung 3.	46
4. PUR Verarbeitung I - Vom Fluid zum Werkstoff.....	48
(7) Rezirkulationsmischkopf	49
(4) Dosierpumpen.....	55
(1) Arbeitsbehälter	58
5. PUR Verarbeitung II.....	60
Kontinuierliche Verfahren	60
Diskontinuierliche Verfahren	65
Sandwich-Elemente.....	65
Kühlschrankherstellung.....	66
Fernwärmeindustrie.....	68
Weichformschaum	69
Herstellung von Schuhen.....	70
Reaktionsspritzguss.....	72
Kombi-Verfahren: Direct Skinning.....	74
Mit Langfasern verstärkte PUR-Formteile: Composite	78
SRIM-Verfahren (Structural-Reaction Injection Molding)	78
Langfaser (LGF)-PUR-Injektionsverfahren	78
LFI (Long Fiber Technology) der Firma Kraus Maffei.....	79

Baypreg-Sandwich Verfahren.....	80
Recycling von Polyurethan	82
Werkstoffliches Recycling.....	83
Chemisches Recycling.....	85
Zusammenfassung/Übung 5.	85
6. Schäumen von Kunststoffen.....	87
Exkurs: Herstellung thermoplastischer Schäume.....	87
Extrusionsschäumen.....	87
Thermoplastschaum-Spritzgießen.....	88
Partikelschäume (EPS, EPP)	89
Charakterisierung und Beschreibung der PUR-Schaumbildung	90
Phänomenologie.....	90
Physik der Schaumbildung (Modelle).....	94
Sonderverfahren: Hochleistungsschaumstoffe	102
Entwicklungsziele	103
Zusammenfassung/Übung 6.	107
7. Gestalten mit Polyurethan	109
Bauteilgestaltung und Auslegung.....	109
Konstruieren mit PUR-Formteilen	109
Konstruktionsrelevante Materialparameter	109
Werkzeuggerechtes Gestalten	113
Gestaltungshinweise für PUR-Strukturbauteile	118
Baypreg-Sandwich	118
Ausgewählte Beispiele der rechnergestützten Formteilgestaltung	122
Materialprüfung – Sonderverfahren für Schäume.....	125
Viskoelelastizität	125
Verbindungselemente	126
Zusammenfassung/Übung 7.	128
8. Vernetzende Formmassen	129
Vernetzende Kunststoffe.....	129
BMC – Bulk Moulding Compound	130
SMC.....	131
Pressen von SMC/BMC.....	132
Sheet Moulding Compound	134
Zusammenfassung/Übung 8.	136
9. Elastomerverarbeitung I.....	137
Kautschuke und Elastomere.....	137
Zusammenfassung/Übung 9.	147
10. Elastomerverarbeitung II.....	148

Elastomerverarbeitung.....	148
Die Verarbeitung von Kautschuk.....	150
Mischen	150
Die Verarbeitung und Vulkanisation von Kautschuk.....	152
Extruder	156
Extrusionswerkzeuge.....	158
Die Verarbeitung und Vulkanisation von Kautschuk.....	160
Qualitätssicherung.....	163
Zusammenfassung/Übung 10.	166
11. Faserverbundkunststoffe I	167
Anwendung und Definition	167
Materialien und Eigenschaften	170
Zusammenfassung/Übung 11.	181
12. Faserverbundkunststoffe II	182
Verarbeitungsverfahren	182
Konfektionierung.....	183
Imprägnierung – Halbzeug-Herstellung	184
Imprägnierung – Direkt-Verarbeitung.....	186
Formgebung	191
Zusammenfassung/Übung 11. und 12.	194

1. Einführung und Wiederholung

Polyurethane

Weich- und Hartschäume für:

- Effiziente Kühlkette mit PU
- Lightweight solutions for automotive
- Materialien für Windkraftanlagen
- BMS materials for solar energy solutions

Lernziele der gesamten Vorlesung

- Grundwissen über die Verarbeitung von Reaktionskunststoffen
- Anwendungen von Reaktionskunststoffen
- Wie sich Verarbeitung auf Materialeigenschaften auswirkt
- Abgrenzung zur Verarbeitung von thermoplastischen Werkstoffen und deren Verarbeitung
- Durch „kleine“ Übungen erste „praktische“ Erfahrungen
- Durch die Exkursion: Reaktionskunststoffe life

Wiederholung Kunststoffe

Was sind Kunststoffe?

„Kunststoffe sind Materialien, deren wesentlichen Bestandteile aus solchen makromolekularen organischen Verbindungen bestehen, die synthetisch oder durch Umwandlung von Naturprodukten entstehen. (...)“ (Normentwurf)

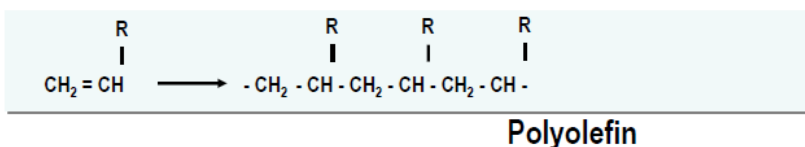
- Auch oft in der Chemie verwendeter Begriff: Polymere (griech. Poly = viele, meros = Teile)
- 1911: Zeitschrift „Kunststoffe“ prägt den deutschsprachigen Begriff
- 1922: Hermann Staudinger erarbeitet die Basis der heutigen Polymerchemie (1953: Nobelpreis für Chemie)

Warum lassen sich Kunststoffe gut formen?

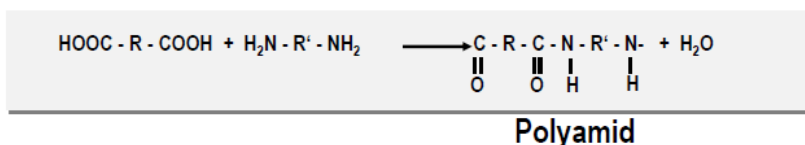
Formgebung erfolgt aus dem flüssigen oder aus dem plastischen Zustand:

- geringe Kräfte (hohe Fertigungsgeschwindigkeiten)
- sehr gute Formabbildung und Reproduzierbarkeit

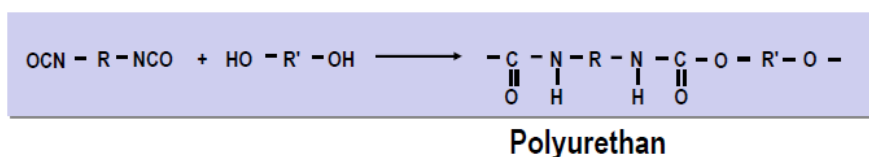
Chemische Grundlagen



Polymerisation

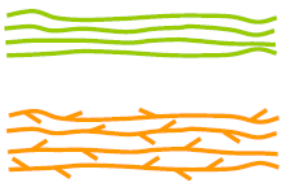


Polykondensation

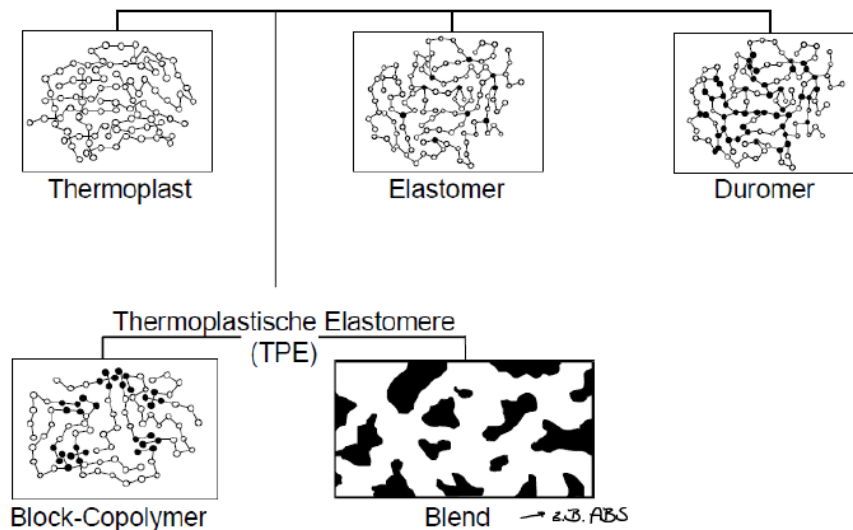


Polyadditionsreaktion

Kunststoffklassen

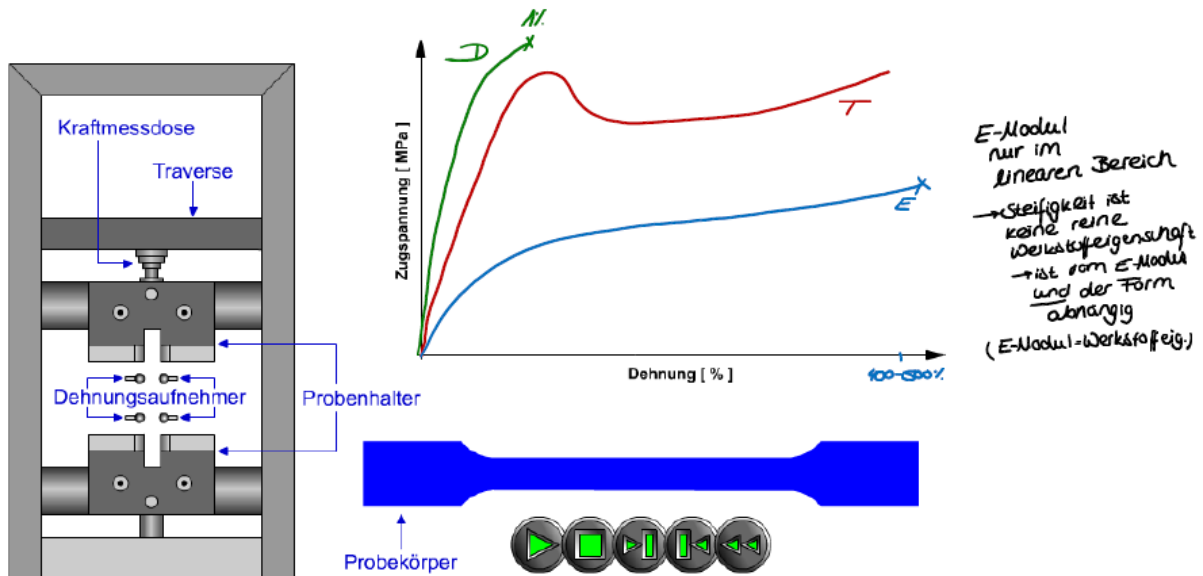
	Lineare Kettenmoleküle	Thermoplaste (amorph, teilkristallin)	schmelzbar löslich bei RT weich- bis hart-zäh oder hart-spröde
	verzweigte Kettenmoleküle		
	schwach vernetzte Kettenmoleküle	Elastomere	nicht schmelzbar quellbar unlöslich bei RT im elastisch weichen Zustand
	stark vernetzte Kettenmoleküle	Duroplaste	nicht schmelzbar nicht quellbar nicht löslich bei RT im allg. hart

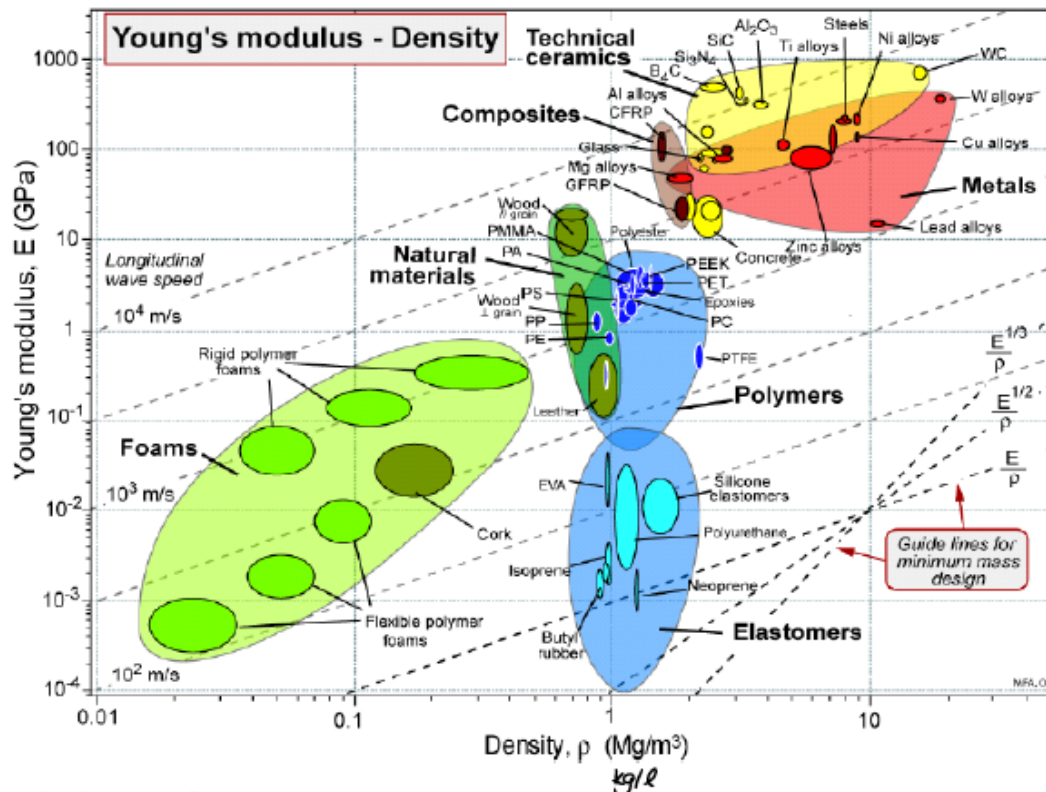
Unterteilung der Kunststoffe



Werkstoffcharakterisierung

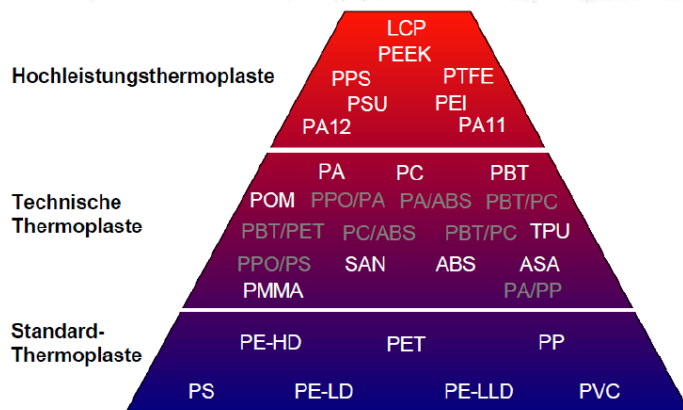
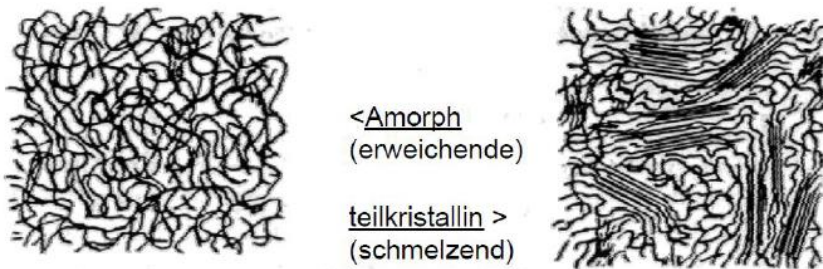
Der Zugversuch:



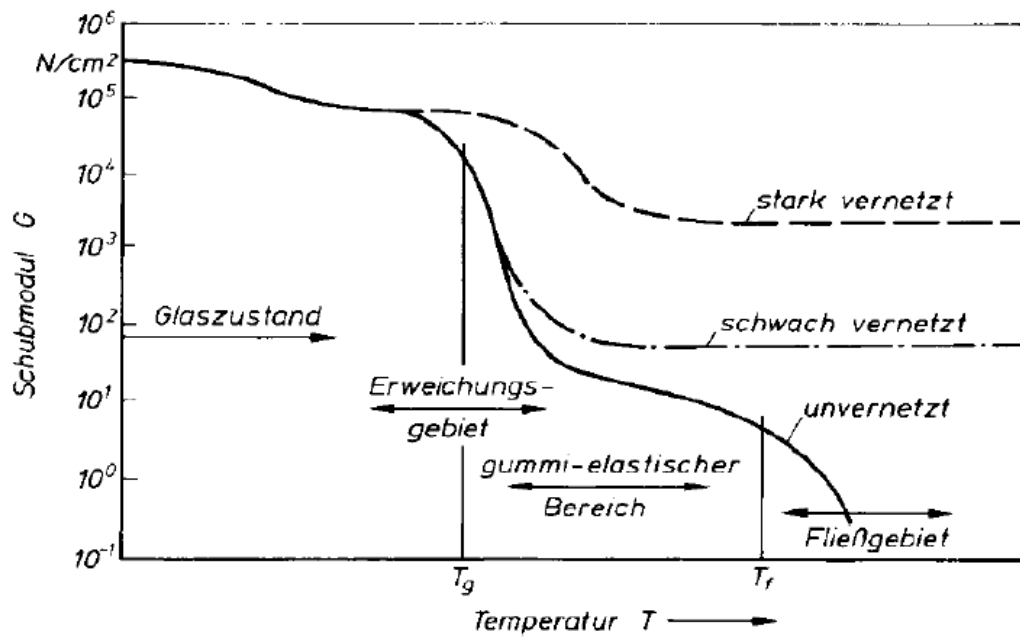


Thermoplaste

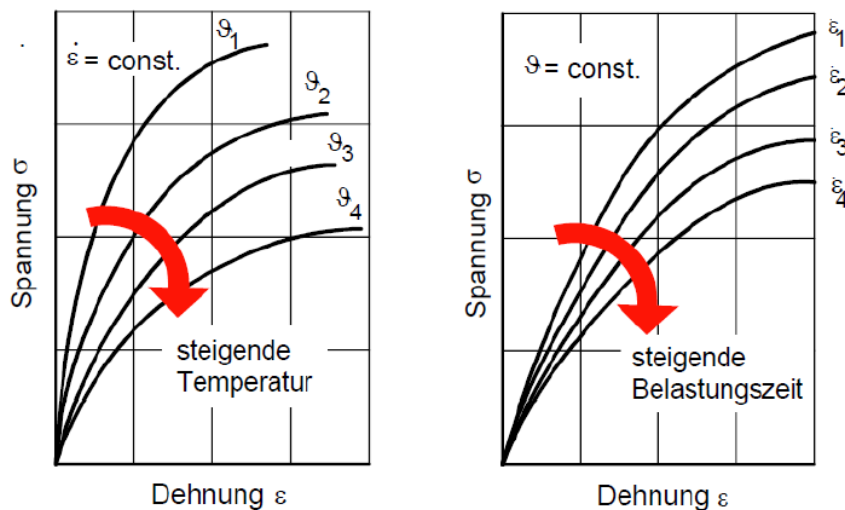
- Lange, lineare Molekülketten mit schwachen physikalischen Bindungen untereinander
-> hohe Bruchdehnung
- Durch Temperaturerhöhung thermoplastisch verformbar, erstarrt bei Abkühlung vollständig
-> reversibel
- Amorph und teilkristallin
- Beispiele: PE, PP, PVC, PA, PS
- Im Bauwesen: Dachbahnen, Fensterprofile, Rohre



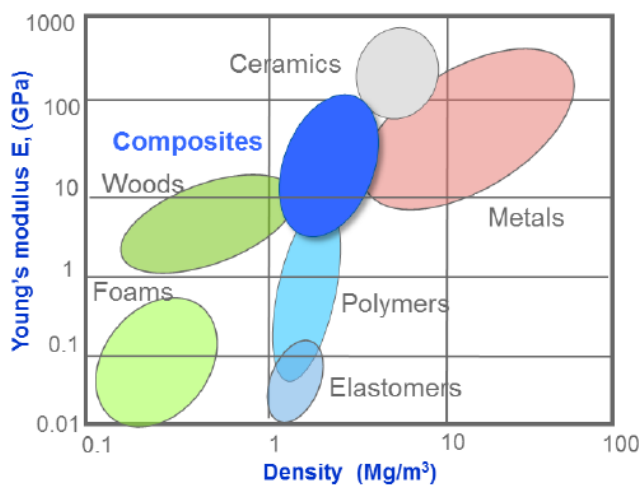
Der Einfluss der Temperatur



Einfluss von Zeit und Temperatur auf das mechanische Verhalten der Kunststoffe



Werkstoffklassen



Weitere Materialeigenschaften



(Wärme-) Leitfähigkeit

Wie alle Isolatoren, so leiten auch Kunststoffe die Wärme nur schlecht. Bei Metallen sorgen die frei beweglichen Elektronen nicht nur für eine hohe elektrische Leitfähigkeit des Materials, sondern auch für eine gute Wärmeleitfähigkeit λ . Bei Kunststoffen, die zu den elektrischen Nichtleitern oder Isolatoren gehören, fehlen jedoch diese frei beweglichen Elektronen im Material.

Ungefülltes Polyethylen (PE):	$\lambda \approx 0,3 - 0,4 \text{ W/mK}$
Ungefülltes Polystyrol (PS):	$\lambda \approx 0,2 \text{ W/mK}$
Geschäumtes Polystyrol (EPS):	$\lambda \approx 0,03 \text{ W/mK}$
Eisen (Fe):	$\lambda \approx 50 \text{ W/mK}$
Aluminium (Al):	$\lambda \approx 230 \text{ W/mK}$

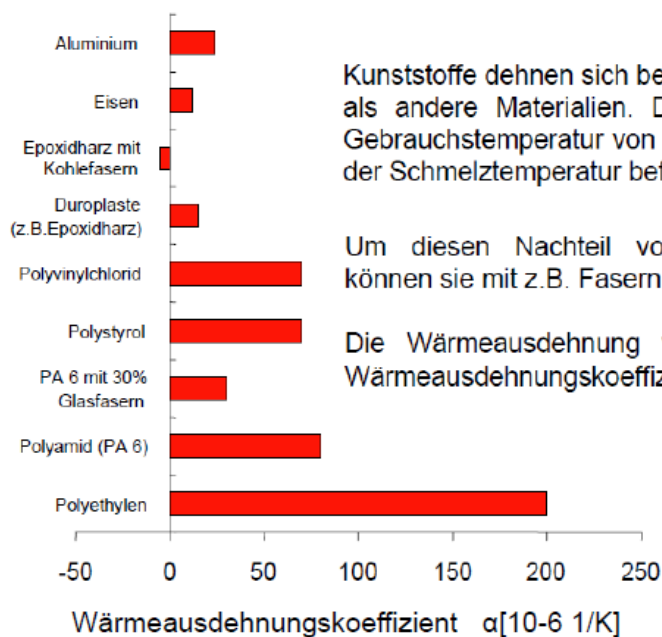
Vorteile

Kunststoffe besitzen gute Isolationseigenschaften (gegen Elektrizität und Wärme)

Nachteile

Die Wärme wird beim Verarbeitungsprozess nur mühsam eingebracht, bzw. bei der thermoplastischen Verarbeitung wieder herausgeholt.

Wärmedehnung von Werkstoffen

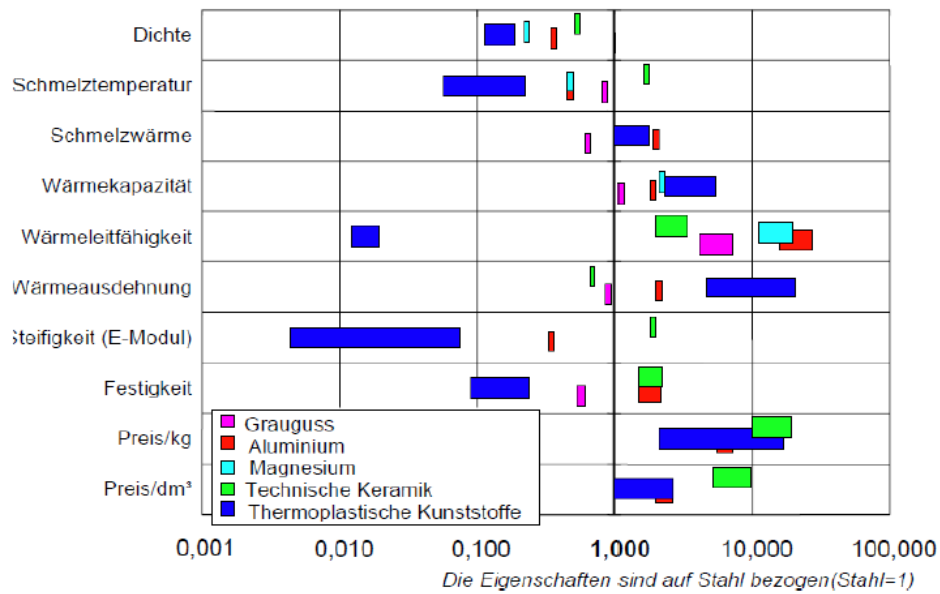


Kunststoffe dehnen sich bei Erwärmung deutlich stärker aus als andere Materialien. Dies liegt daran, dass sich die Gebrauchstemperatur von Kunststoffen nicht weit unterhalb der Schmelztemperatur befindet.

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

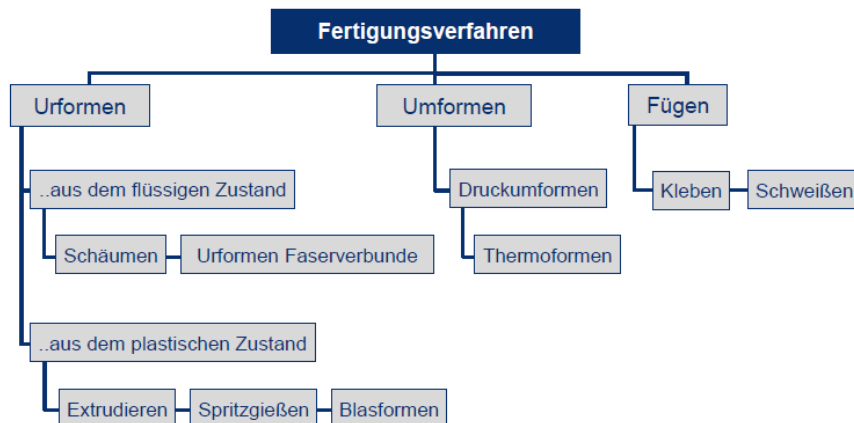
Die Wärmeausdehnung wird charakterisiert durch den Wärmeausdehnungskoeffizienten α .

Einordnung der Eigenschaften der Kunststoffe



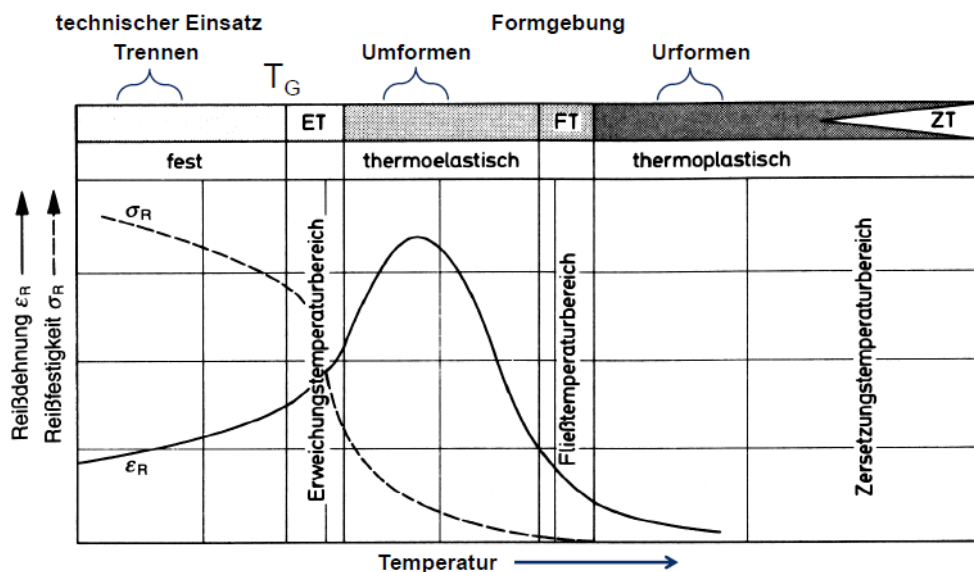
Formgebungsverfahren

Auswahl aus DIN 8580

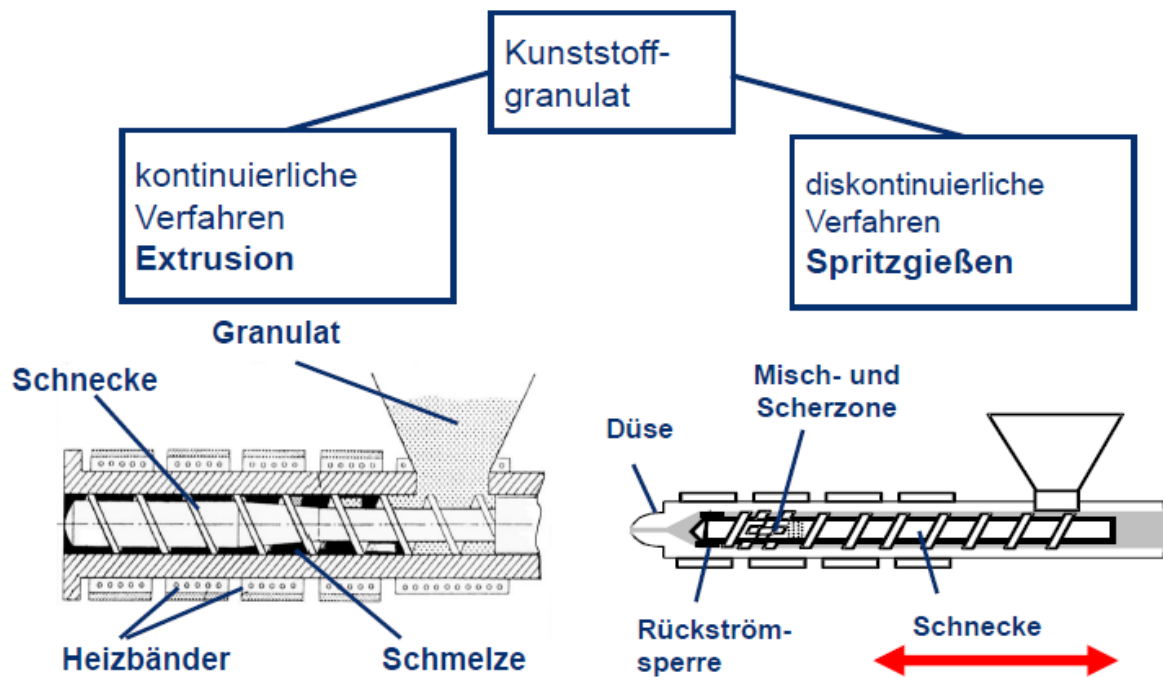


Temperaturabhängigkeit der mech. Eigenschaften

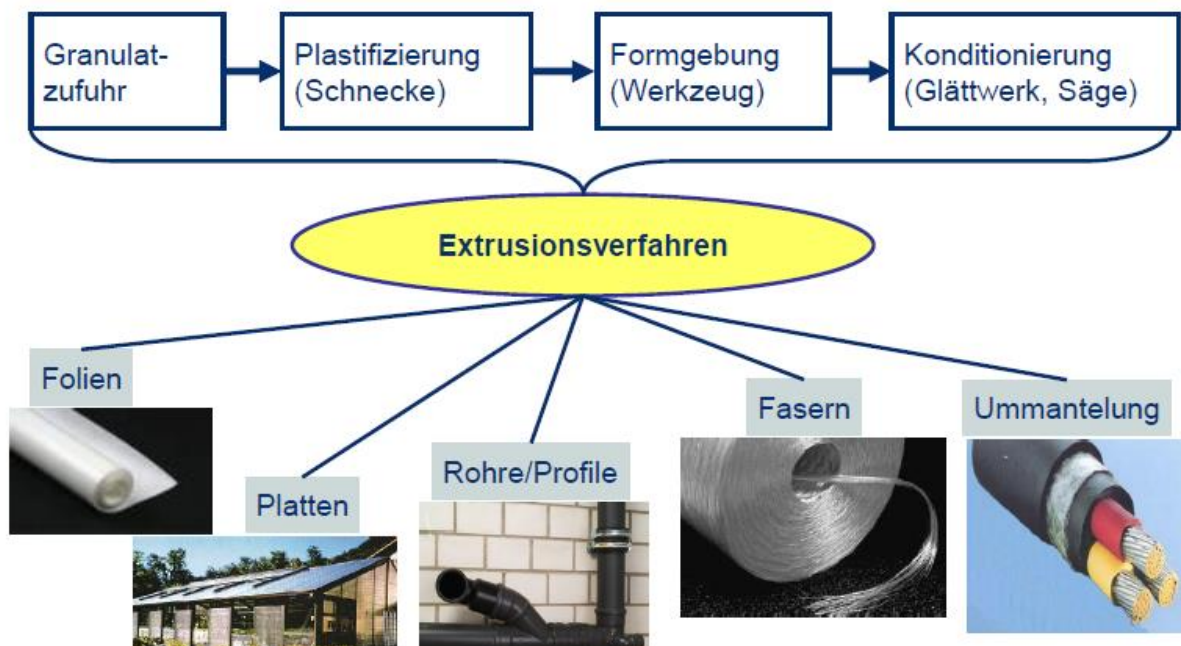
Beispiel: amorpher Thermoplast



Fertigungsverfahren Thermoplaste

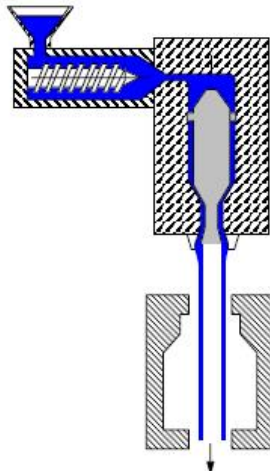


Prozessschritte der Extrusion



Extrusionsblasformen (Coextrusionsblasformen)

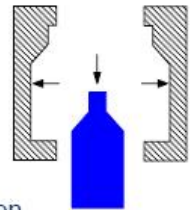
1. Schmelzeaufbereitung im Extruder



2. Ausformvorgang des Schlauches durch Düsenkopf und -werkzeug



6. Entformen

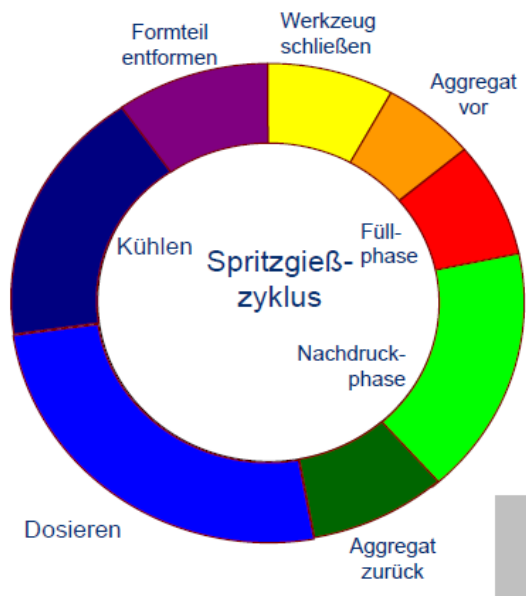


3. Schwellen und Auslängen

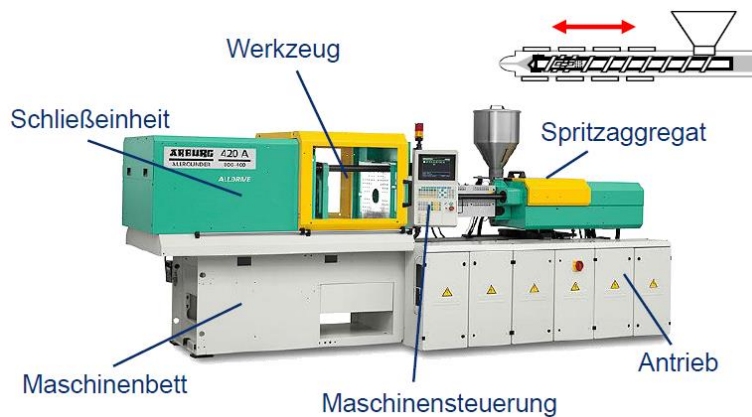
4. Spreizen, Schlauch schließen, Werkzeug schließen und Aufblasen

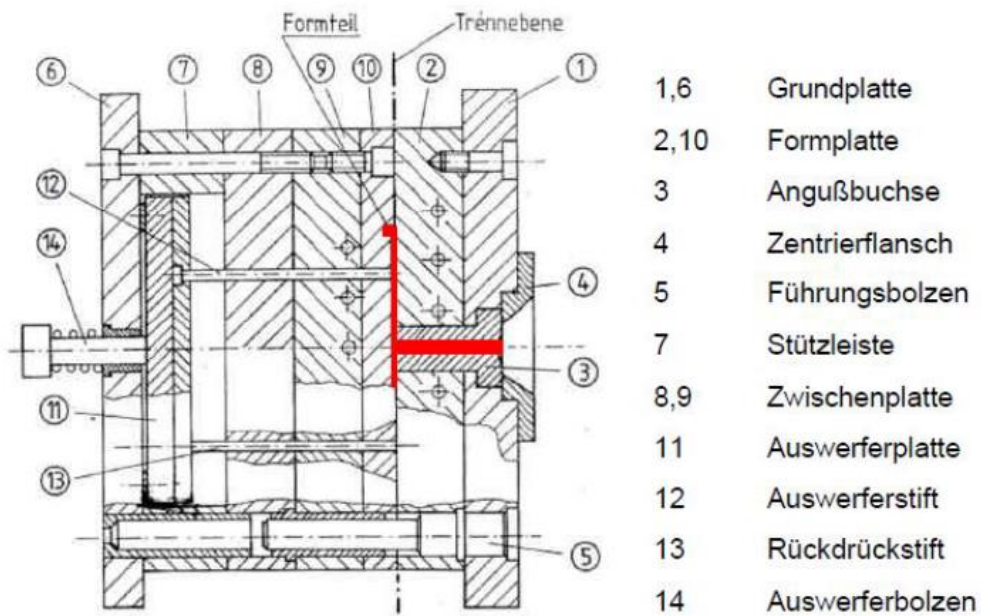
5. Abkühlen und Schrumpfen

Der Spritzgießprozess

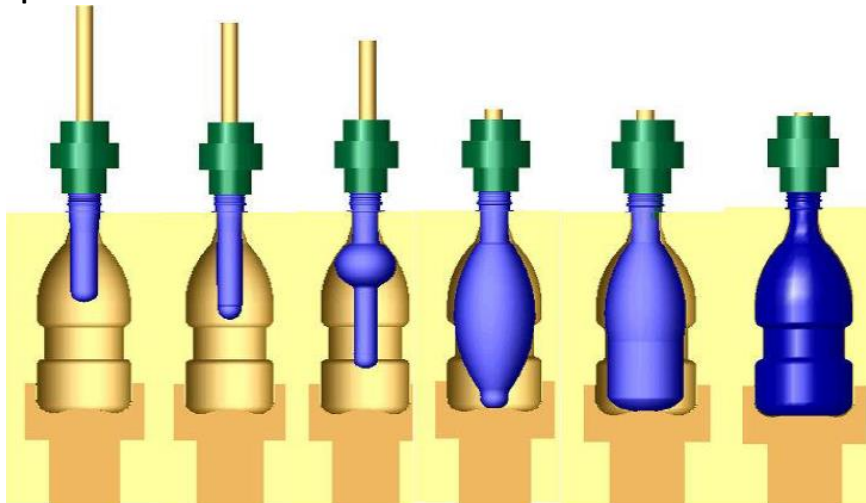


Spritzgießmaschine und Spritzgießwerkzeug



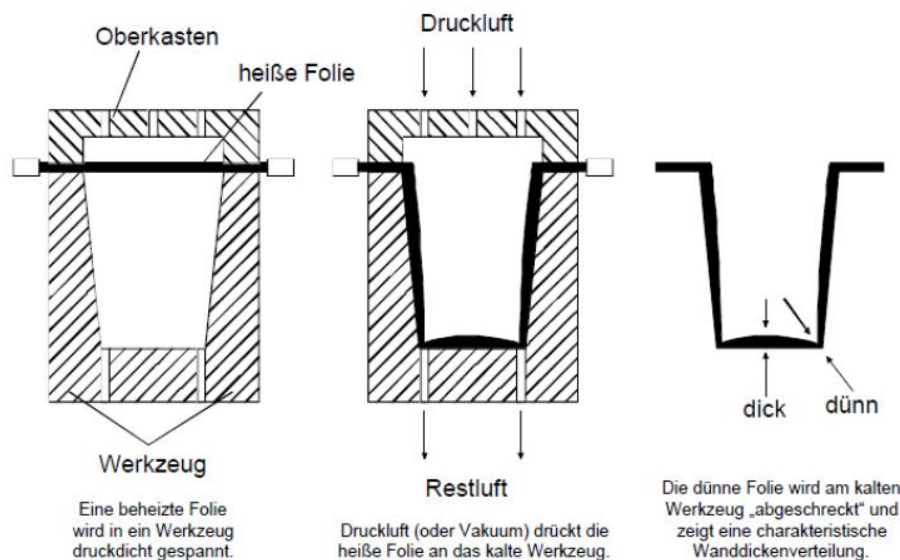


Spritzstreckblasformen



Anmerkung: Beim Extrusionsstreckblasformen wird der Vorformling extrudiert.

Thermoformen



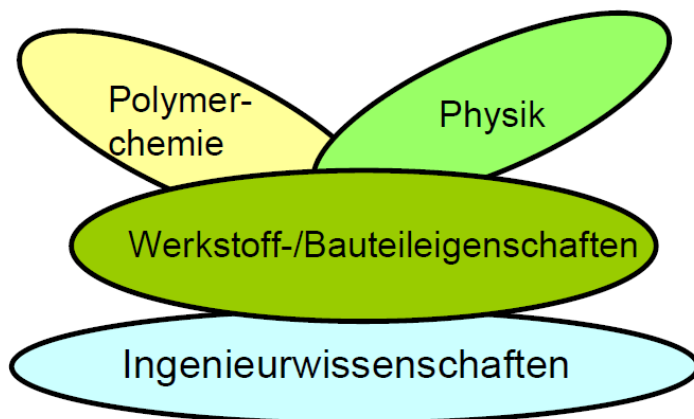
Zusammenfassung/Übung 1.

Entstehungsreaktionen für Kunststoffe sind:	Polymerisation, Polykondensation, Polyaddition
Kunststoff-Werkstoffklassen sind:	Thermoplast, Elastomere und Duromere
Kunststoffeigenschaften hängen ab von:	Polymerstruktur, aber auch von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit
Wesentliche Eigenschaftsunterschiede zu Metallen sind beispielsweise:	Dichte, Wärme-bzw elektrische Leitfähigkeit
Wesentliche Urform-Verfahren für Kunststoffe sind	Spritzgießen und Extrusion
Kunststoffverarbeitung ist gekennzeichnet durch	eine Vielzahl von Sonder- und Kombinationsverfahren

2. Einführung Polyurethane

Polyurethane: Die Chemie muss stimmen

Reaktionskunststoffe

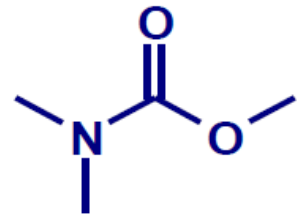


Polyurethane – woher kommt der Name?

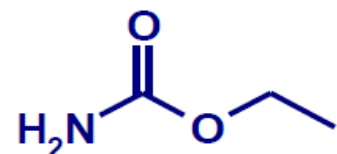
Namensgebung: Urethangruppe

Urethan leitet sich von **U**rea (Harnstoff) und **E**thanol ab.

- Trivialname für Ethylurethan:



...kommt natürlich z. B. in Whisky und Joghurt vor



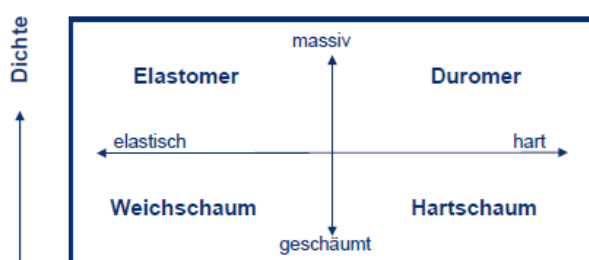
Polyurethane: Polyisocyanate und Polyole

Polyurethane – was ist das eigentlich?

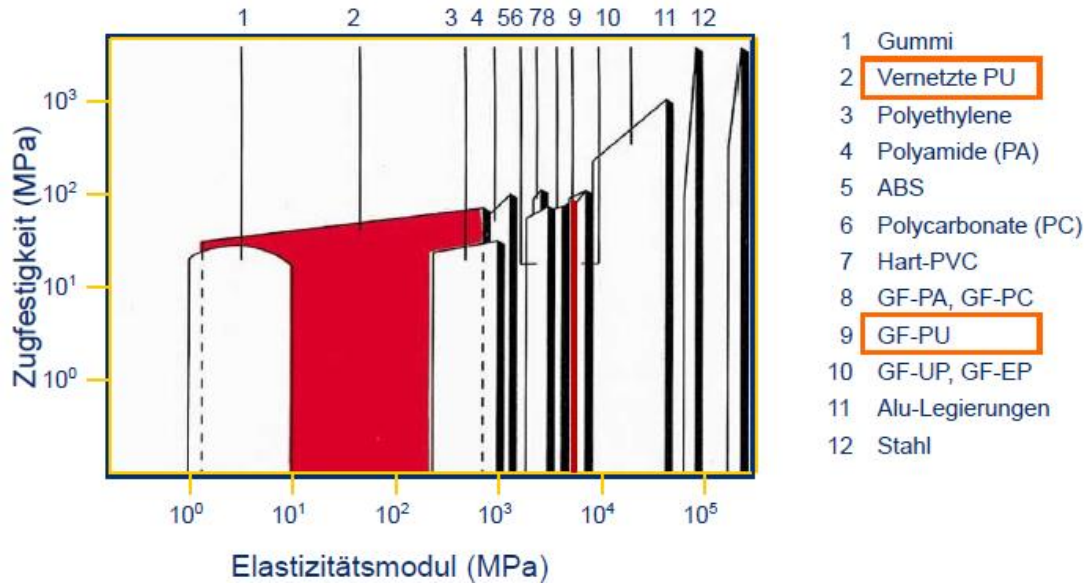
Polymere Werkstoffe, hergestellt nach dem Polyisocyanat-Polyadditionsverfahren (im Gegensatz zu Polymerisation, Polykondensation) aus verschiedenartigen Bausteinen (Isocyanat und Polyol), also im Gegensatz zu PVC oder PE kein "reiner" Kunststoff, sondern ein chemisch-strukturell gemischtes Polymer.

- Eigenschaftsprofil wird von der Netzwerkdicke (Kettenlänge, Funktionalität) bestimmt.
- Große Variationsvielfalt, *taylor made plastics*

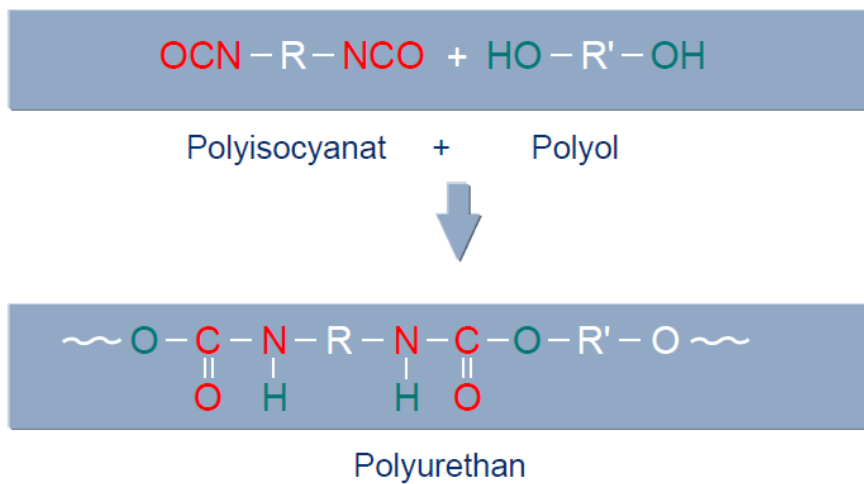
—————> **Vernetzung**



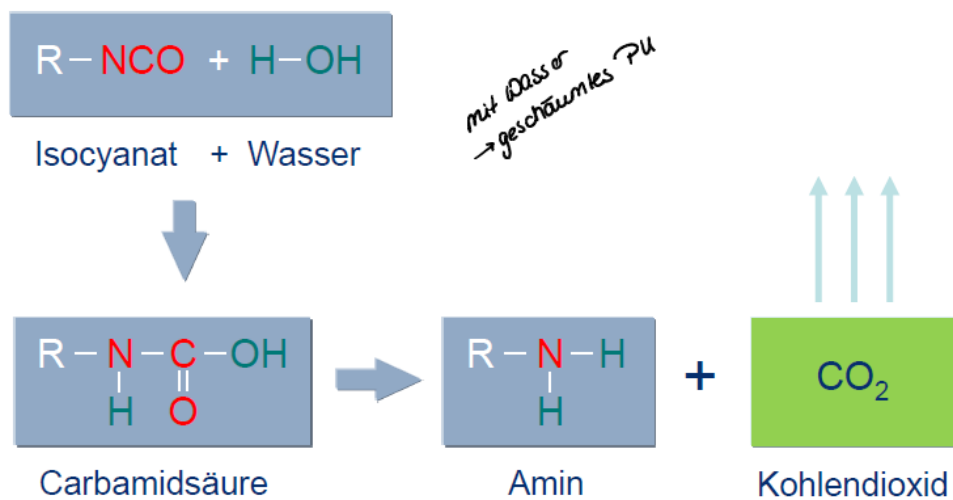
Elastizitätsmoduli verschiedener Werkstoffe



Das Polyadditionsverfahren



Die chemische Treibreaktion

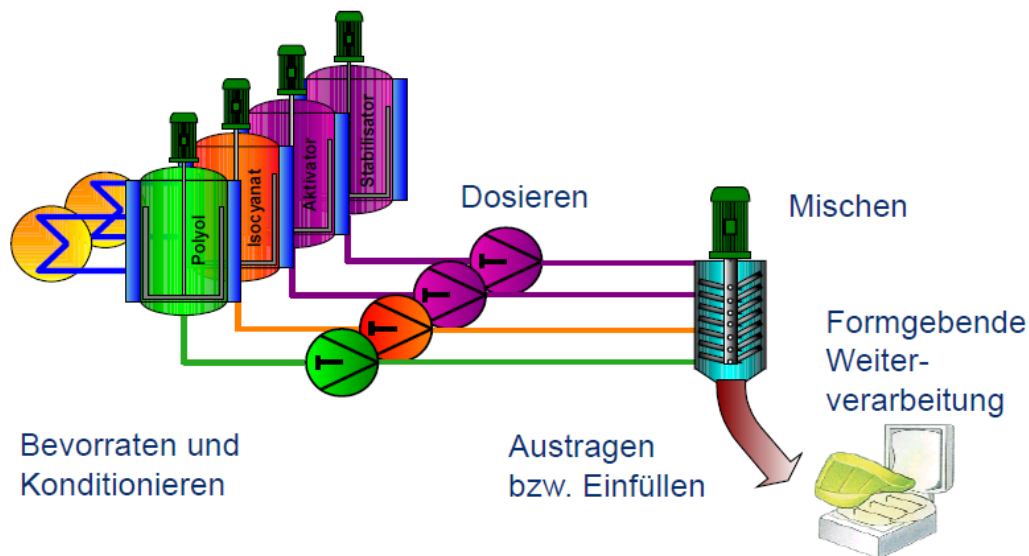


Hauptkomponenten

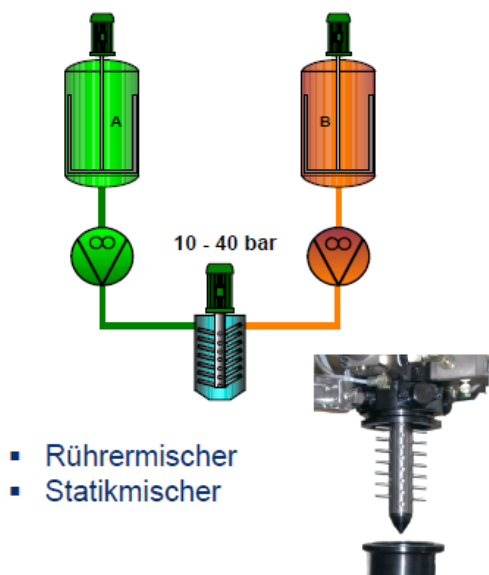
- Polyisocyanate (B-Komponente)*
>> aliphatisch, aromatisch
Achtung:
*) in den USA entgegengesetzt: Isocyanat: A-Komponente; Polyol: B-Komponente
- Polyole (A-Komponente)*
>> Polyether-, Polyester-, Polymerpolyole
- Hilfsstoffe
>> Fasern, Flammenschutz, Treibmittel

Maschinelle Herstellung von PUR-Schaumkunststoff

Grundoperationen



Niederdruckvermischung



Vorteile:

- Anschaffungskosten geringer
- weniger Energiekosten
- auch für Hochviskose geeignet
- geringere Drücke
- einfachere Anlagentechnik

Nachteile:

- eher diskontinuierlich
- Spülaufwand
- Nicht für Faserfüllstoffe

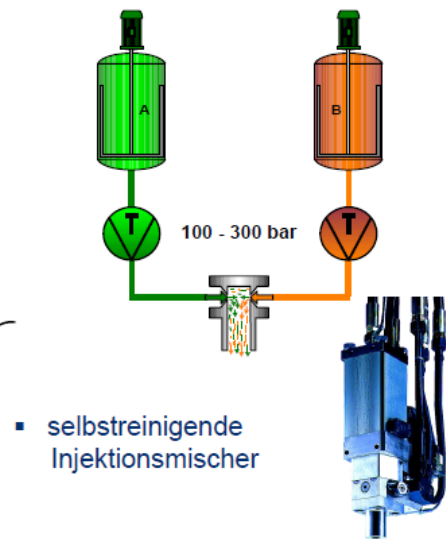
Hochdruckvermischung

Vorteile:

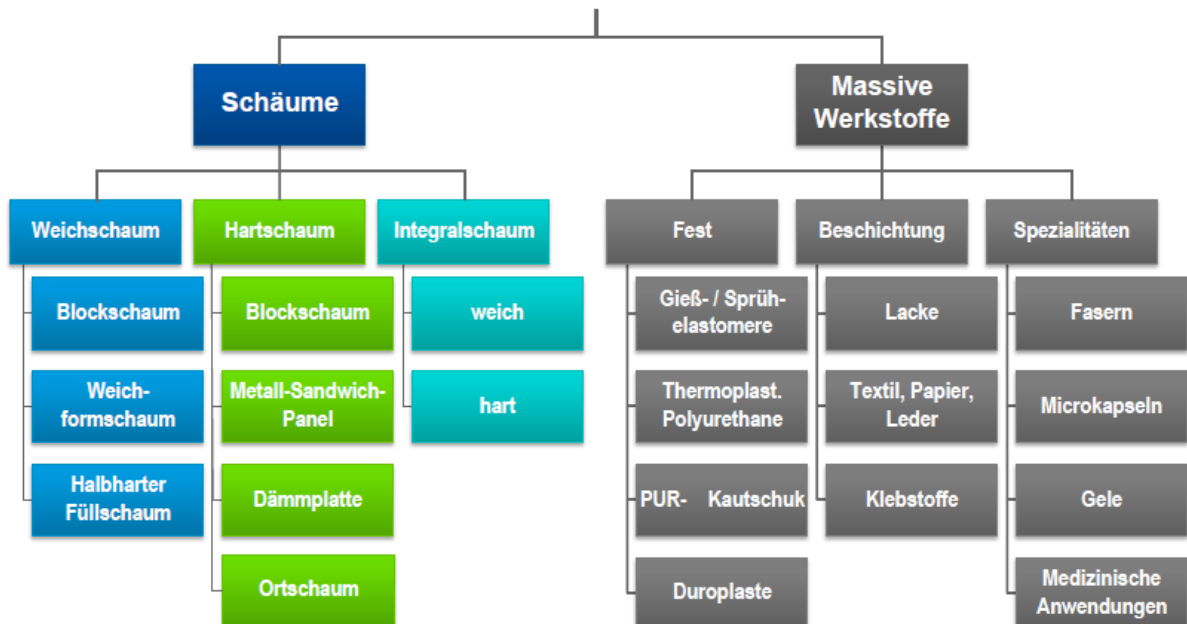
- Diskonti-Fertigung
- kein Spülen

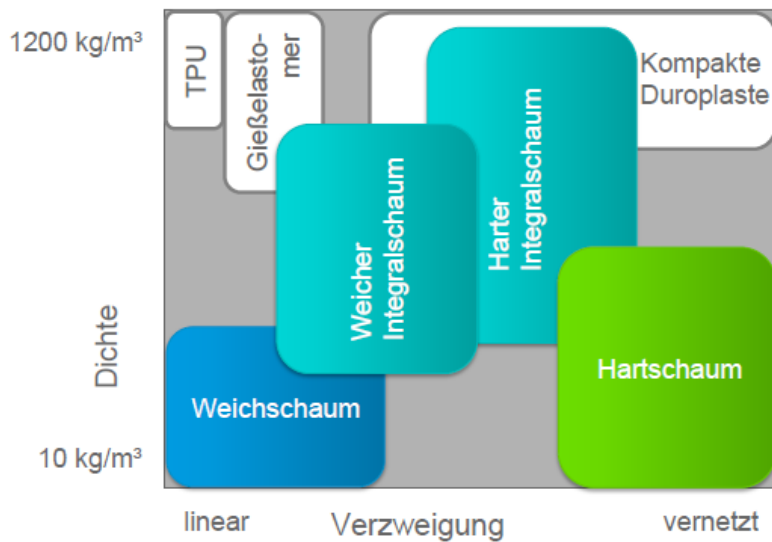
Nachteile:

- begrenzt durch Viskositäten
- verfahrenstechnisch aufwändiger



Klassifizierung der Polyurethane





Polyurethan: Zellstruktur und Eigenschaften

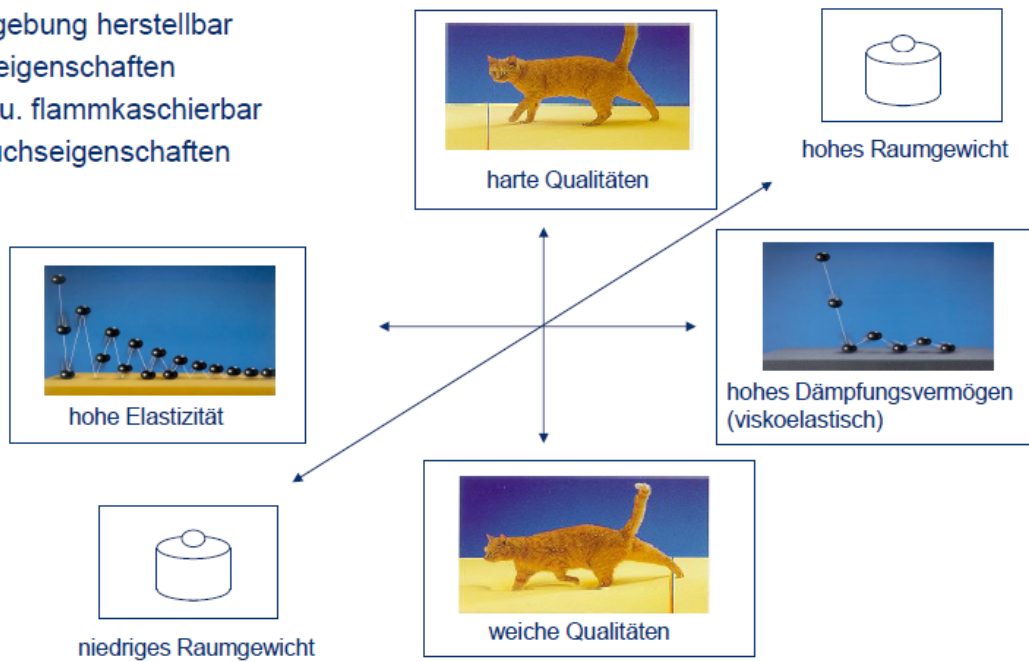
offenzellig	geschlossen zellig
stauchbar	druckfest
atmungsaktiv	wärmeisolierend
saugfähig	wasserabweisend
schallabsorbierend	<i>Hartschaum</i>
<i>Weichschaum</i>	

Weichschaum

Eigenschaften

- hoch- bis viskoelastisch
- nahezu in jeder Formgebung herstellbar
- sehr gute Dämpfungseigenschaften
- thermisch verformbar u. flammkaschierbar
- günstige Dauergebrauchseigenschaften

on
 gebung herstellbar
 eigenschaften
 u. flammkaschierbar
 chseigenschaften



Physikalische Eigenschaften

- Dichte
- Stauchhärte (bei 40%)
- Zugfestigkeit
- Bruchdehnung
- Druckverformungsrest (bei 50%)

20 - 40 kg/m ³ (16 - 130 kg/m ³)
2,5 - 6,5 kPa
50 - 220 kPa
80 - 450 %
2 - 8 %

~30 kg/m³

*ungefähr
wissen*

Hartschaum

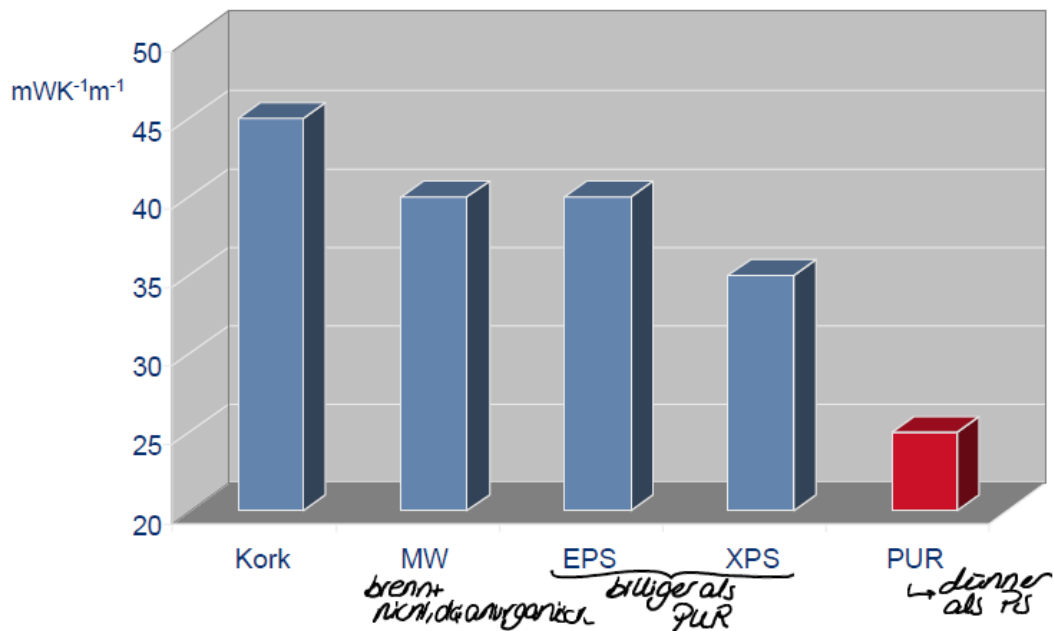
Eigenschaften

- ausgezeichnete Dämmeigenschaften
- breiter Temperatur-Anwendungsbereich (-50 bis +135°C)
- wirtschaftliche und problemlose Verarbeitung
- gute mechanische Eigenschaften
- optimale Alterungsbeständigkeit
- chemische und biologische Resistenz

Physikalische Eigenschaften

▪ Dichte	30 - 80 kg/m ³ (12 - 360 kg/m ³)	<i>~ 40-50 kg/m³</i>
▪ Druckfestigkeit	0,1 - 0,6 MPa	
▪ Zugfestigkeit	0,2 - 0,9 MPa	
▪ Bruchdehnung	4 - 10 %	<i>— geringer</i>
▪ Wärmeleitfähigkeit	20 - 30 mWK ⁻¹ m ⁻¹	

Wärmeleitfähigkeiten im Vergleich



Weicher Integralschaum

Baydur

Oberfläche: kompakte Haut

Kernmaterial: Schaum (hart oder weich)

Physikalische Eigenschaften

▪ Dichte	500 - 700 kg/m ³
▪ Shore-Härte	55 - 75 (A)
▪ Zugfestigkeit	5 - 10 MPa
▪ Bruchdehnung	250 - 550 %
▪ Weiterreißfestigkeit	8 - 12 kN/m ¹

Eigenschaften

- Rohdichten von 200 – 1900 kg/m³
- elastische, flexible Systeme
- vielseitige Anpassung der Eigenschaften dadurch individuelle Anwendung
- kosteneffiziente Produktion von großen Formen
- akkurate Reproduktion von Oberflächendetails
- Kombinationsmöglichkeit mit anderen Materialien

Anwendung: Möbelindustrie, Automobilindustrie, Sportartikel u.v.m.

Harter Integralschaum

Baydur

Physikalische Eigenschaften

▪ Dichte	500 - 700 kg/m ³	1200 - 1300 kg/m ³
▪ Shore-Härte	55 - 75 (A)	65 - 75 (D)
▪ Zugfestigkeit	5 - 10 MPa	25 - 40 MPa
▪ Bruchdehnung	250 - 550 %	25 - 150 %
▪ Biegemodul		500 - 2000 MPa
▪ Weiterreißfestigkeit	8 - 12 kN/m ¹	↑ harter Integralschaum

Eigenschaften

- Rohdichten von 200 – 1900 kg/m³
- vielseitige Anpassung der Eigenschaften dadurch individuelle Anwendung
- kosteneffiziente Produktion von großen Formen
- akkurate Reproduktion von Oberflächendetails

- Kombinationsmöglichkeit mit anderen Materialien

Anwendung: Möbelindustrie, Bauindustrie, Sportartikel, Medizintechnik u.v.m.

Gießelastomer

Vulkollan

- sehr gute mechanische Abriebsfestigkeit
- sehr gute Tragfähigkeit
- sehr gute dynamische Belastbarkeit
- Vulkollan-Elastomere beruhen auf NDI-Isocyanaten

Umspritzen elektronischer Bauteile

- ein Verarbeitungsschritt
- Polyurethan isoliert und schützt
- gute Fließfähigkeit (geringe Werkzeuginnendrucke)
- kurze Zykluszeit
- (hohe Reaktivität)
- geringe Exothermie

Einsatzmöglichkeiten:

- Anschlussstecker für Ladegeräte
- Kondensatoren, Widerstände
- elektronische Verschlüsse

Thermoplastisches Polyurethan

- zäh-elastisch
- flexibel
- wärme- und kälteresistent

Zusammenfassung/Übung 2.

Mit Polyurethane-Werkstoffen lässt sich ein großes Eigenschaftsspektrum darstellen, von	kompakten bis geschäumten Bauteilen mit niedriger Dichte, elastischen bis hart/spröden Strukturen
Hart-(Isolationsschäume) haben typischerweise:	Dichten von 30 – 80 kg/m ³ und Wärmeleitfähigkeiten von 20 – 30 mW/mK
Weichschaumstoffe für Comfort-Anwendungen haben:	Dichten von 20 bis 40 kg/m ³ mit Bruchdehnungen bis 450 % und geringen Druckverformungsresten (~ 5 %)
Integralschaumstoffe besitzen	eine integrale Dichteverteilung mit einer geschlossenen und kompakten Haut
Harte Integralschaumstoffe (-dur) können:	je nach Vernetzung und Aufschäumgrad ein großes Eigenschaftsspektrum darstellen. Sie eignen sich für Konstruktionsanwendungen, insbesondere mit Faserverstärkung
Kompakte Elastomer konkurrieren	mit klassischen Gummi-Materialien und können thermoplastische Eigenschaften haben. Sie werden dann extrudiert oder mittels Spritzgießen verarbeitet.

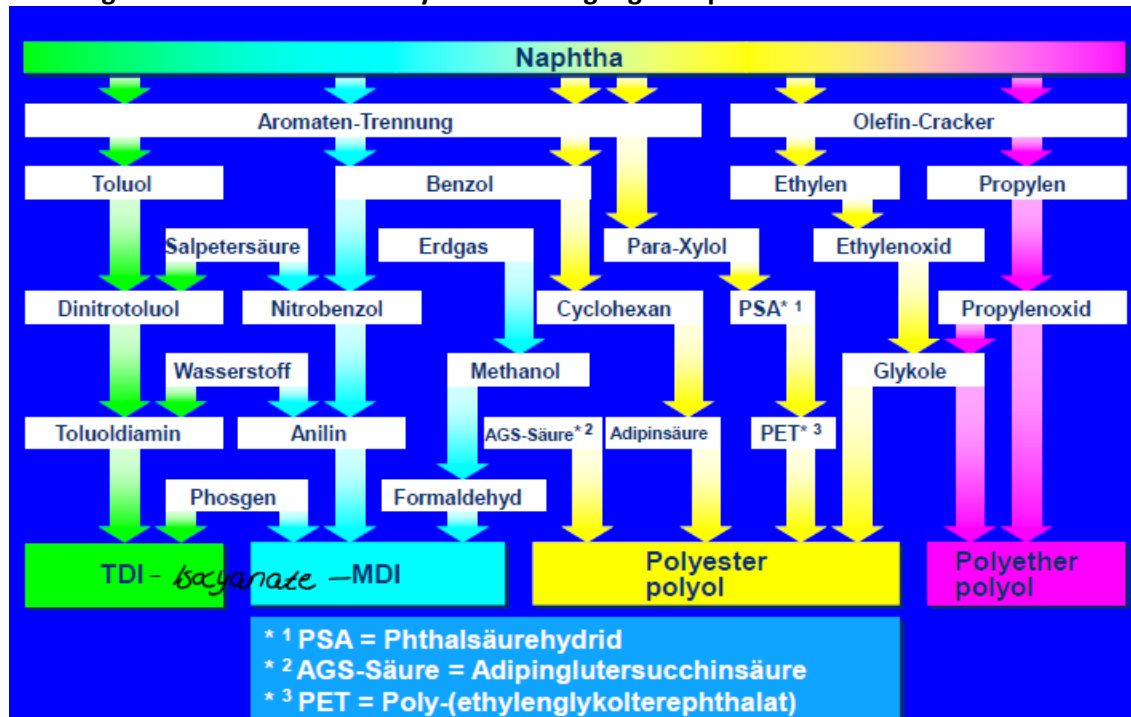
- Polyurethane sind eine sehr vielseitige Werkstoffgruppe
- Die Variabilität der Ausgangskomponenten ermöglicht Werkstoffe nach Maß

- Das Spektrum reicht von weich-elastisch bis hart, von kompakt bis geschäumt und von Schäumen mit niedriger Dichte (10 kg/m^3) bis zu hochgefüllten Systemen (akustische Dämmmatten)
- Die Polymersynthese erfolgt parallel zur Verarbeitung (beim Kunden)
- Mit ca. 18 Mio. t Jahresmenge (5% des Weltkunststoffverbrauchs) sind Polyurethane die größte Spezial-Polymergruppe

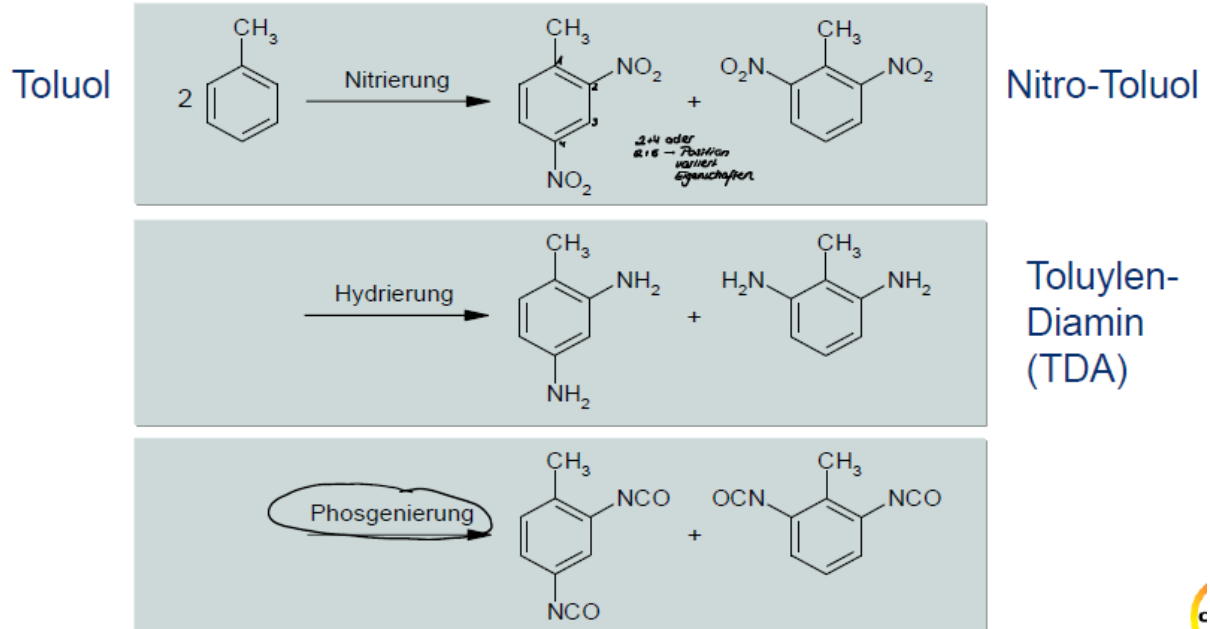
3. Chemie der Polyurethane

Die Chemie muss stimmen

Der Weg vom Rohstoff zu den Polyurethan-Ausgangskomponenten

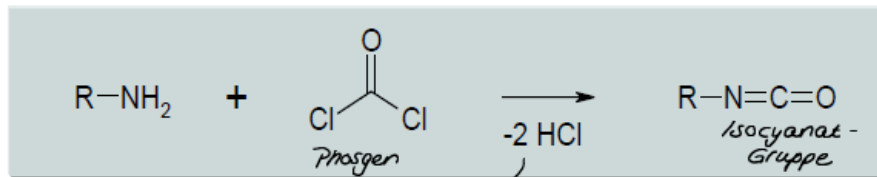


Herstellung von Toluylen-Diisocyanat (TDI)

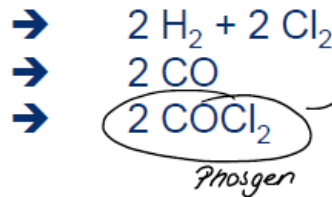
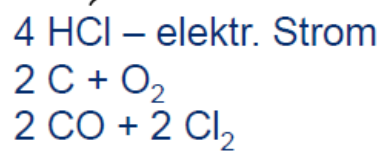


Isocyanat-Herstellung

Phosgenierung



Chlorkreislauf



geschlossener Kreislauf
→ extrem hoher Stromverbrauch

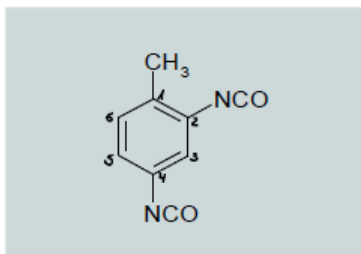


PUR Isocyanate

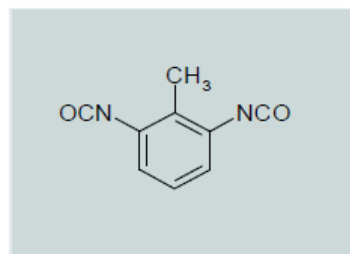
Technische Überwachungs/ Schutzmaßnahmen bzgl. Phosgen:

- Dampf/Ammoniak-Wand im Falle von Phosgen-Emission
- Doppelwand-Technik für Behälter
- elektronische Phosgen-Detektoren in der Anlage
- ständig mitzuführen: Phosgen-Plaketten/ Atemschutz

Tolylendiisocyanat (TDI)



2,4-TDI



2,6-TDI

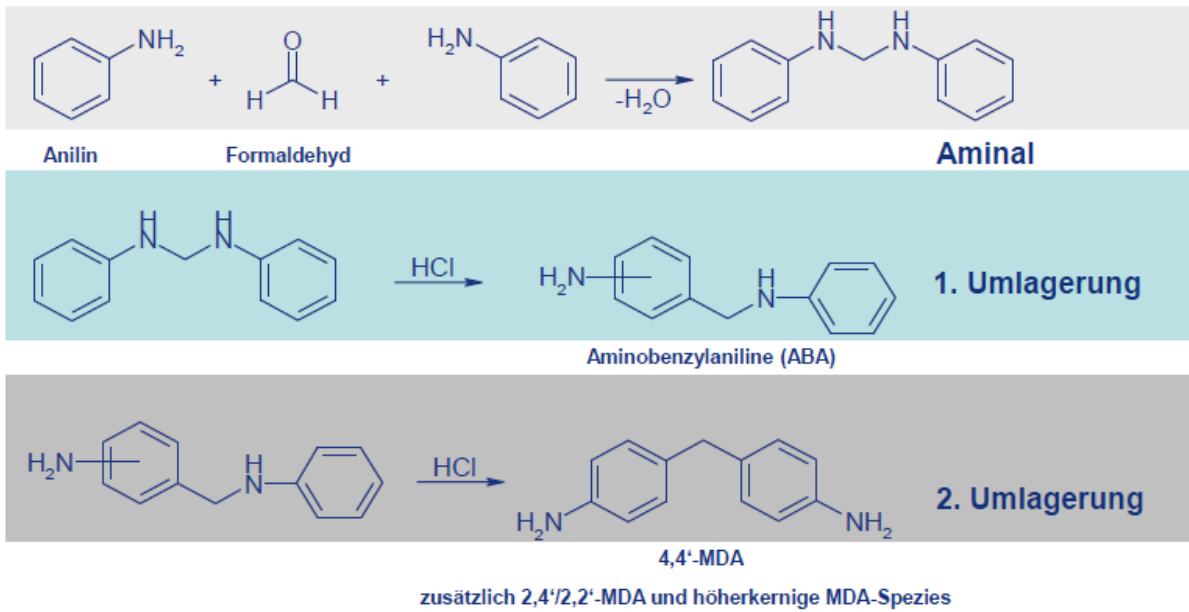
(Desmodur)T 100	100%	2,4-TDI			} unterscheiden sich in Reaktivität
T 80	80%	2,4-TDI	20%	2,6-TDI	
T 65	65%	2,4-TDI	35%	2,6-TDI	

NCO-Gehalt: 48,3 Gew.%

Mengenanteil
der NCO-Gruppen
Molekulargewichte im Verhältnis
zum Rest



Herstellung von **Methylendianilin (MDA)**



MDA-Nomenklatur

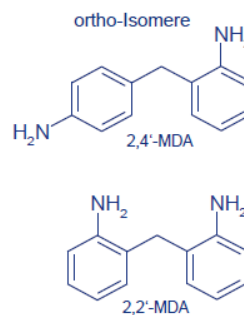
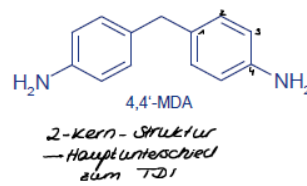
TDI - MDI

Konfigurationen

unterschiedl.

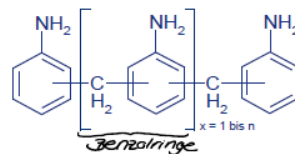
*stellen Isomere
→ unterschiedl.
Eigenschaften*

2-Kern-MDA



*Unterschiede in
Reaktivität*

Höherkernige MDA-Olimomere/Isomere

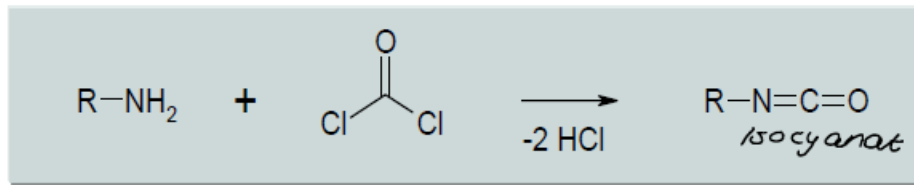


3 bis n-Kern
ortho/para-Isomere



Isocyanat-Herstellung

Phosgenierung

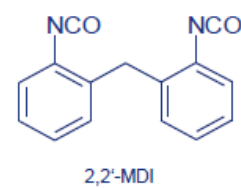
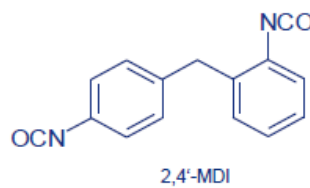
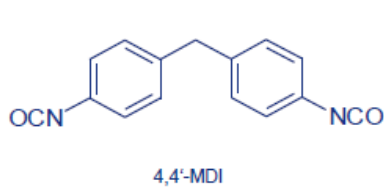


Chlorkreislauf

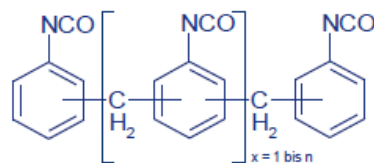


Methyldiphenyldiisocyanat (MDI)

2-Kern-MDI (**MMDI** – Monomer MDI)



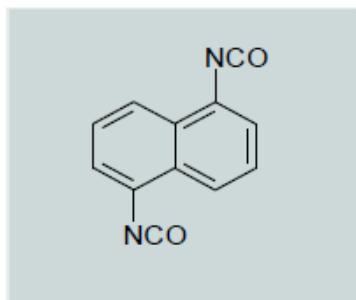
Drei- und höherkerniges MDI



3- bis n-Kern
ortho/para-Isomere

Das Gemisch aus 2- und höherkernigem MDI heißt **PMDI (Polymer-MDI)**.

Naphthalin-1,5-diisocyanat (NDI)



Naphthalin-1,5-diisocyanat

Desmodur 15

Schmelzpunkt: 127 °C

NCO-Gehalt: 40 Gew.%

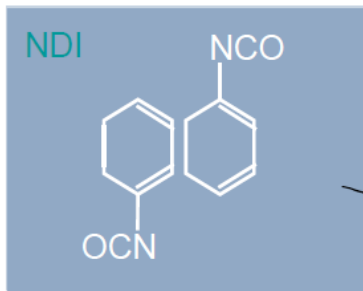
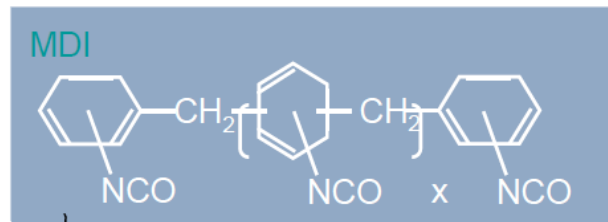
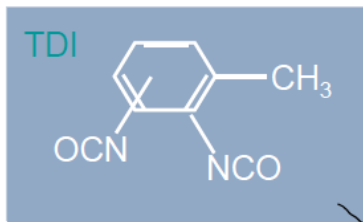
- höchstwertige Gießelastomere (Vulkollan)

Aromatische Polyisocyanate

Aromatische Polyisocyanate

ungesättigte Strukturen
→ reaktionsfreudiger

→ immer noch Doppelbindungen
→ empfindlicher



Desmodur T65, T80

Desmodur 44M, 44V20L

Desmodur 15

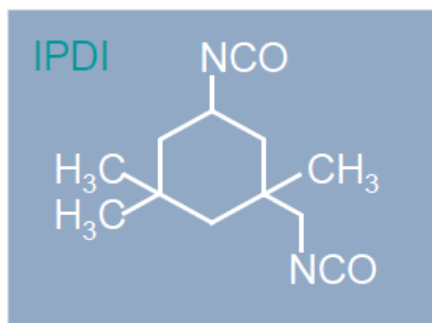
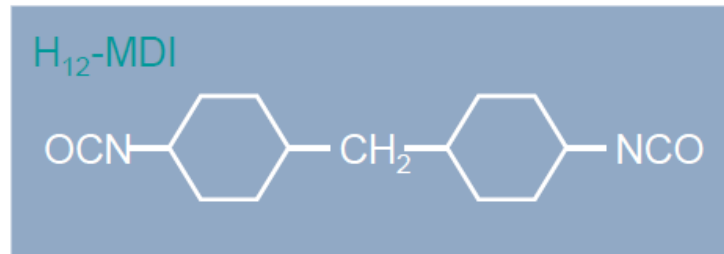
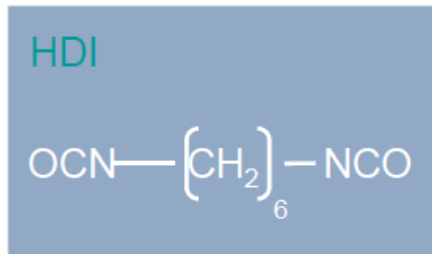
Produktnamen
nicht ausreichend



Aliphatische Polyisocyanate

Aliphatische Polyisocyanate

→ keine Doppelbindungen
→ chem. träger → wirkungsunempfindlicher
→ Außenanwendung (z.B. Lacke)



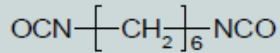
Desmodur H

Desmodur W

Isophorondiisocyanat

Aliphatische Isocyanate

Hexamethylen-1,6-diisocyanat



Desmodur H

Siedepunkt: 127°C (10 mm Hg)

NCO-Gehalt: 50 Gew.%

*relativ viele
reaktive Gruppen*

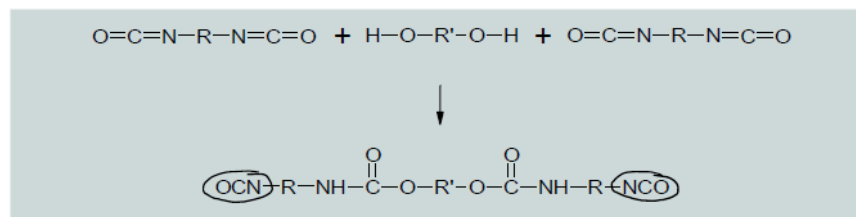
- HDI kommt ausschließlich als modifiziertes Isocyanat zur Anwendung
- Lack- und Beschichtungsrohstoff
- Herstellung von lichtechten Polyurethanen

Isocyanat-Prepolymere

Isocyanat-Prepolymere
Industrielle Produktion

*Verarbeiter bestimmt Rezeptur
Vorschrift*

IKT KUNSTSTOFF
TECHNIK
STUTT GART



*exotherm
→ viel Wärme*

Hoher Isocyanat-Überschuß führt zu statistischer Verteilung:

*NCO + OH
→ Urethan*

Hoher Isocyanat-Überschuß führt zu statistischer Verteilung:

- Oligomerenverteilung
- Rest-Monomergehalt (> 0,1 Gew.%)

Maßnahmen:

- Dünnschichten
- Verwendung von Isocyanaten verschiedener Reaktivität (z.B. TDI)

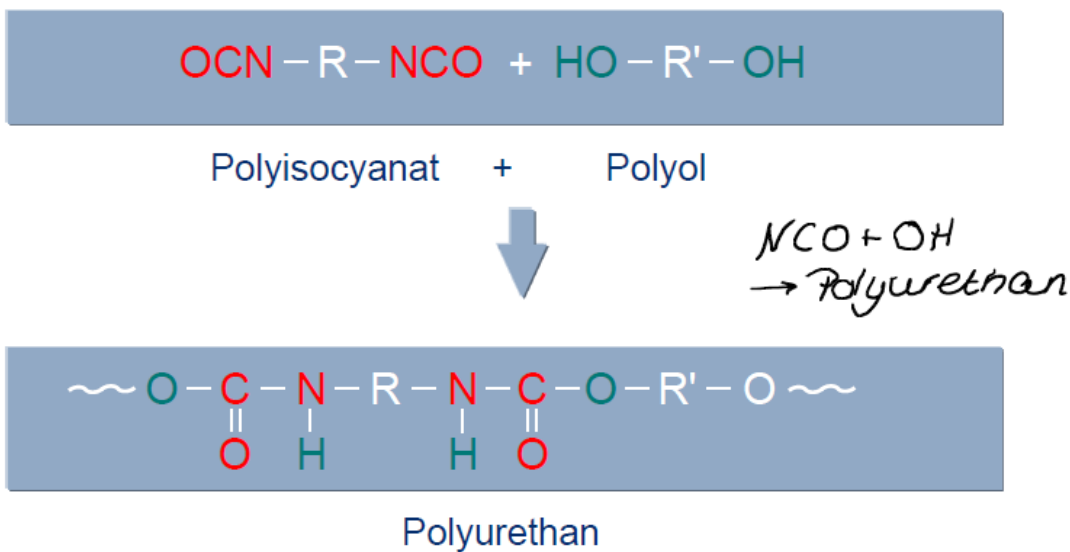
Vorteile

- geringere Exothermie (weniger Spannungen im Blockschaum) (-> mehr Schritte; Schaum isoliert, kann durch Wärme aus exothermer Reaktion abbrennen.
- vollständiger Umsatz reaktionsträger Polyole ohne Katalyse möglich
- gezielter Aufbau von Segmentstrukturen durch 2-stufige Reaktion
 - 1. Prepolymer-Aufbau
 - 2. PUR-Vernetzung)
- katalysatorfreie Aushärtung mit Diaminen
- Vermeidung des Kontaktes mit Isocyanat-Monomeren bei Verarbeitern

Eigenschaften:

- hohe Viskosität (Molekulargewichtsaufbau)
- Lagerstabilität nur, wenn katalysatorfreie Polyole eingesetzt werden

Das Polyadditionsverfahren



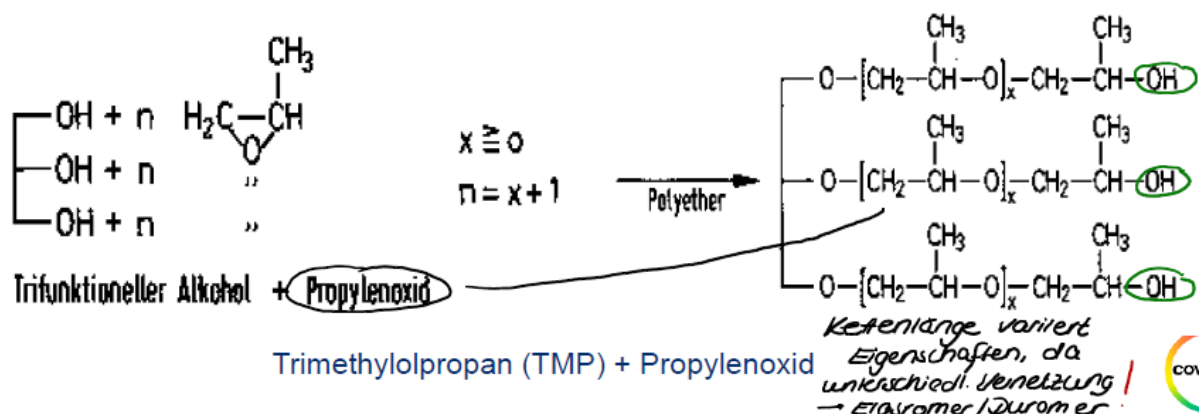
Polyetherpolyole

Polymerisation von Epoxiden auf "Starter" (z.B. mit KOH)

Starter: Glykole, Glycerin, TMP, Zucker (Funktionalität)

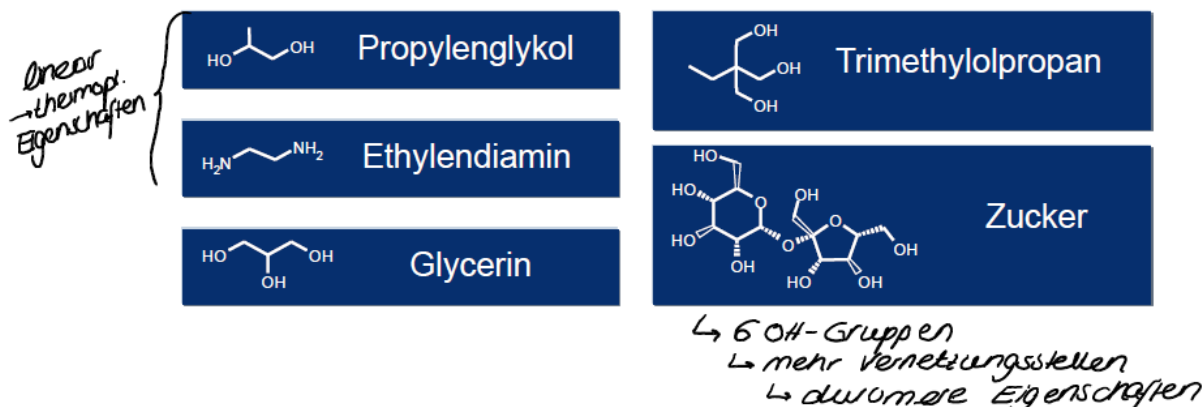
Epoxide: Ethylenoxid, Propylenoxid (unterschiedliche Aktivität)

Eigenschaften: hydrolysestabil, aber Photooxidation möglich (Stabilisierung nötig)



Starter für Polyether-Polyole

Addition von Ethylenoxid / Propylenoxid an Starter

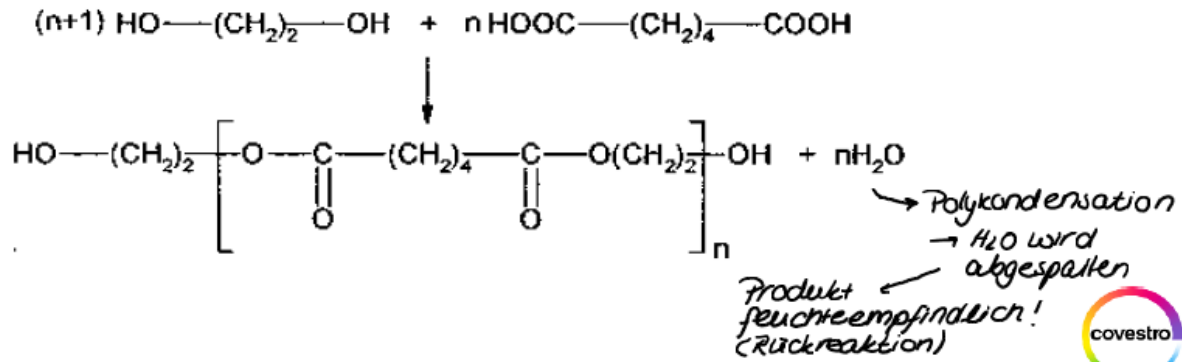


Polyesterpolyole

Herstellung aus Diolen und Dicarbonsäuren

- Diol: Glykol, 1,4-Butandiol
- Säuren: Adipinsäure, Terephthalsäure

Eigenschaften: hydrolyseempfindlich, hohe Festigkeit



Sonstige Polyole

Polymerpolyole (lange Polyole)

- mit thermoplastischen Polyolen modifizierte Polyether
- Haupteinsatzgebiet: Weichschaum
- hohe Eindruckhärte, Elastizität bei niedriger Dichte

nachwachsende Rohstoffe

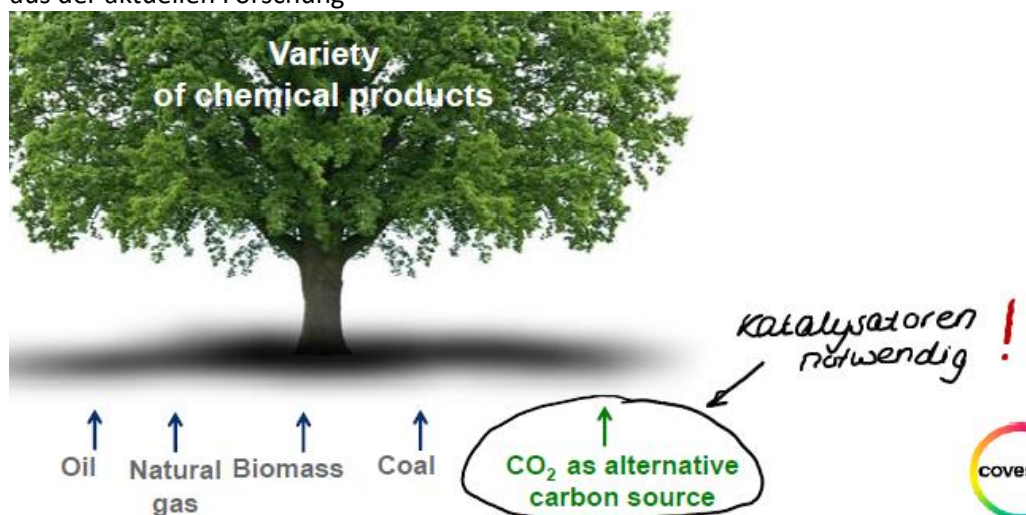
- z.B. Rizinusöl, Zucker

Vernetzer, Kettenverlängerer ("kurze Diol")

- niedermolekulare Di- oder Triole und Diamine
- Steuerung der Netzwerkdichte → Eigenschaften

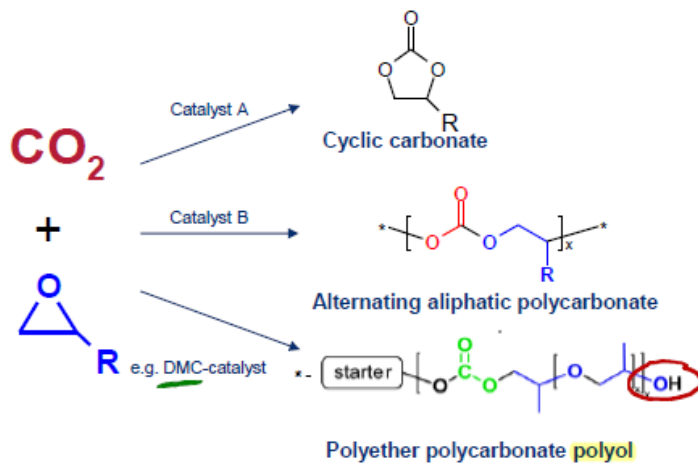
Natürliche Kohlenstoffquellen für die chemische Industrie

aus der aktuellen Forschung



Industrielle Anwendung von Epoxid/CO₂

Chemie für Carbonat-Synthesen



- "grünes" Lösungsmittel
- Synthese von Dimethylcarbonate

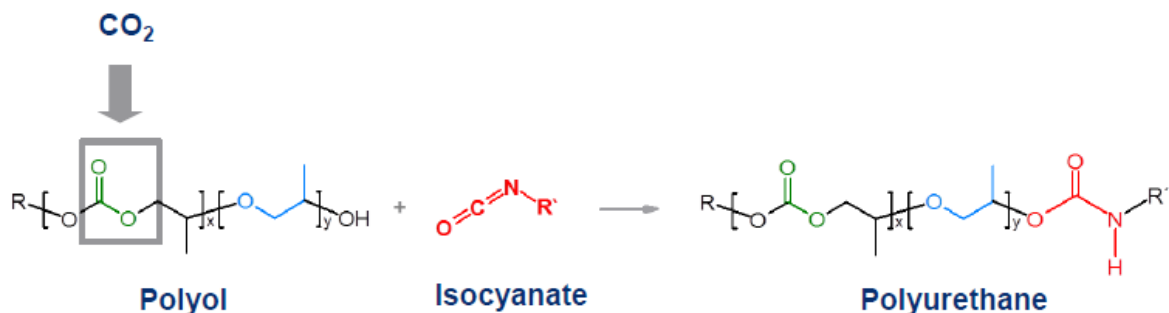
- hochmolekular
- Bindemittel für Keramiken
- Biodegradable/compostable Polymere

- Kleines Molekulargewicht
- Endständige OH-Funktionalitäten
- Polyole für Polyurethane

- Selektivität wird beeinflusst durch Katalyse und Nebenreaktionen
- Bis 43 wt% Einbindung von CO₂ (R = CH₃) möglich
↳ Endprodukt enthält 43% CO₂
- Homogene und heterogene Katalyse möglich

preislich ähnlich wie herkömmliche Polyole

Zielanwendung - Polyurethane



Dream Production

Vom Kraftwerk zum Polyurethan



Gaswäsche und
Lieferung of CO₂
VORWEG GEHEN



Verfahrensentwicklung
Umsetzung von CO₂
Bayer Technology Services



Fertigung und Prüfung von
Polyurethanen mit CO₂



Fundamental research

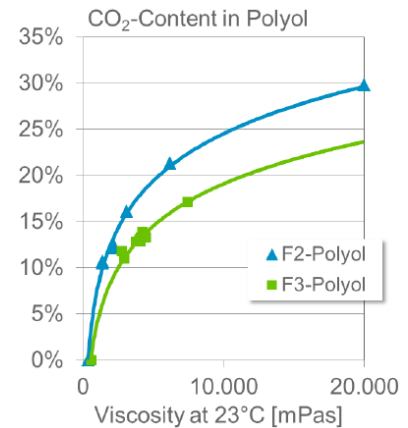


Life Cycle Assessment

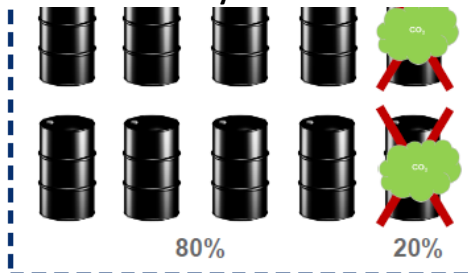
Einfluss von CO₂ in Polyolen

Carbonat-Gruppen erhöhen die Viskosität

- Viskosität hängt ab von der Funktionalität und dem CO₂ – Gehalt
- Polyole können entsprechend den Anforderungen angepasst werden
- CO₂-Polyole haben Viskositäten zwischen denen von Polyether und Polyester-Polyolen



ECO-Effizienzanalyse



Einsparung von fossilen Rohstoffen
hat den größten Effekt auf den carbon footprint

Von den Rohstoffen zur Rezeptur

Verarbeitung reagierender Polyurethansysteme

Reaktionsspritzguss/Schaumstoffherstellung:

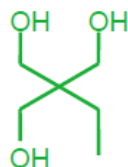
-> Die Reaktion zum Kunststoff erfolgt beim Kunden.

Anlieferung:

-> mindestens 2 flüssige Komponenten; A: Polyolformulierung, B: Polyisocyanat

Modell-Rohstoffe

Polyole



Trimethylolpropan
(TMP)

Funktionalität

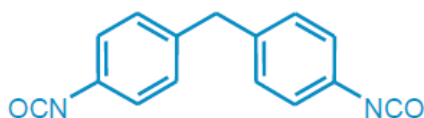
M = 134 g/mol

f = 3

3x OH

→ vernetzter
Kunststoff

Isocyanate



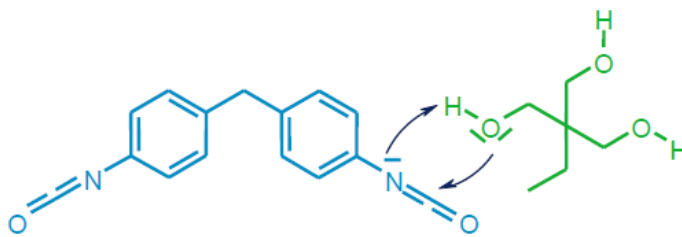
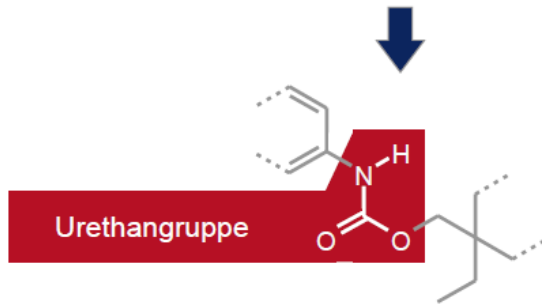
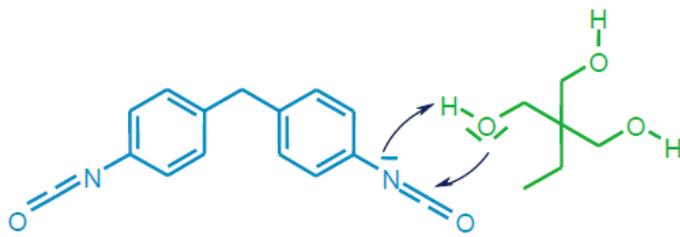
4,4'-Diphenylmethane-
diisocyanat (MDI)

M = 250 g/mol

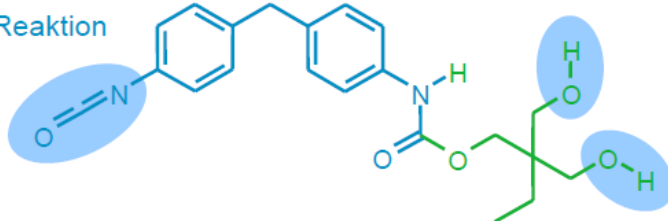
f = 2

2x NCO

PUR-Reaktion

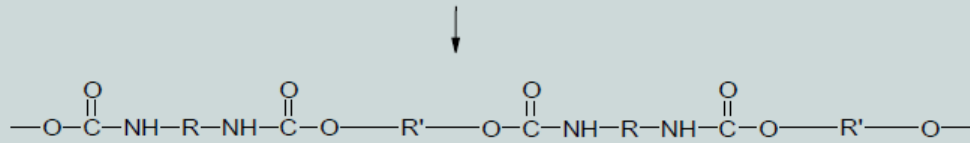
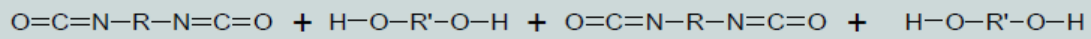
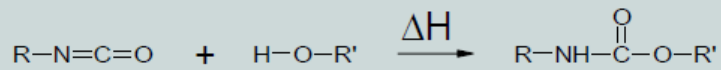


weitere Reaktion



weitere
Reaktion

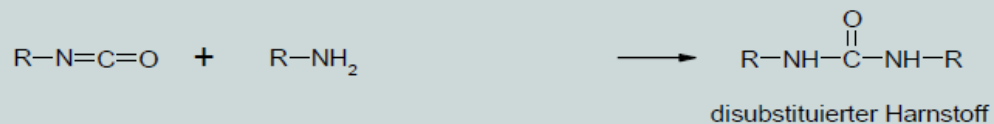
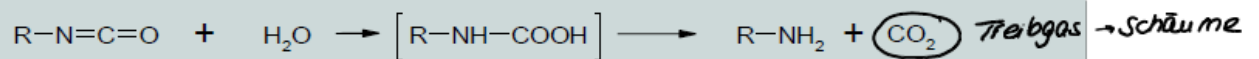
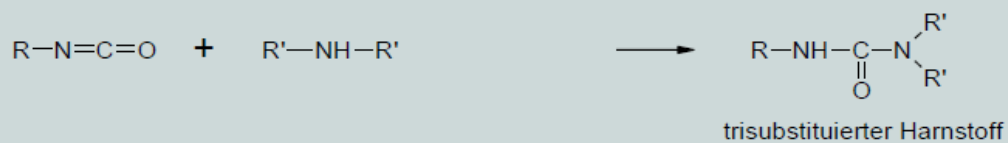
Isocyanat + Alkohol -> Urethan



Kat.: tert. Amine, Zinnverbindungen

$\Delta H \sim 100 \text{ kJ/mol}$ *exotherm*

Isocyanat + Amin -> Harnstoff



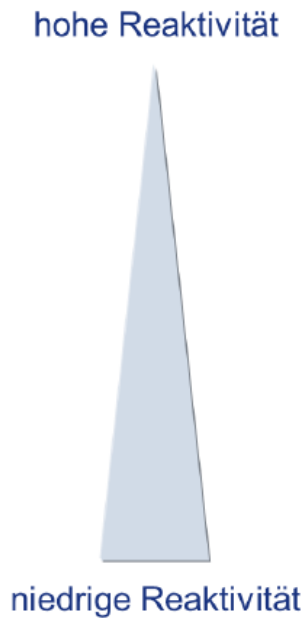
Kat.: tert. Amine

$\Delta H \sim 200 \text{ kJ/mol}$



Relative Reaktivitäten H-azide Verbindungen

*Isocyanat
reagiert mit
allem mit H
→ Amine
→ Alkohole
→ Wasser*



aliph. Amine



arom. Amine

aliph. Harnstoffe

prim. Alkohole

200

sec. Alkohole

60

Wasser

40

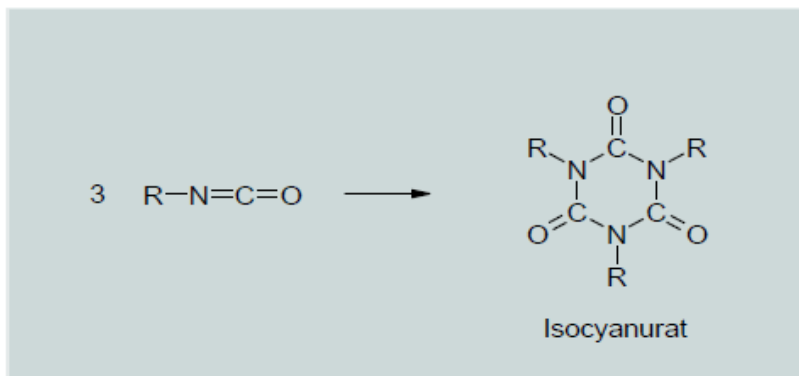
arom. Harnstoffe

35

tert. Alkohole

1

Isocyanat – Trimerisierung -> Isocyanurat

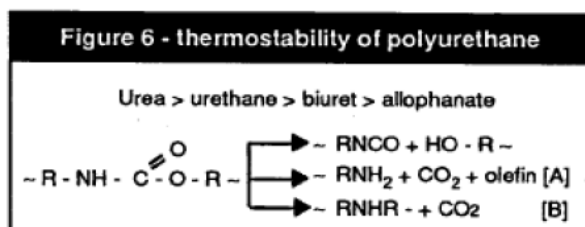


*sehr steif,
sehr brandstabil!
brandhemmend*

Kat.: Alkalisalze

Thermodegradation von Polyurethan

(Material baut sich ab)



Chem. Gruppe	T - Bereich [°C]
Allophanat	100 – 120
Biuret	115 – 125
Urethan	140 – 160
Harnstoff	160 – 200

Isocyanurat

180 -

Aufbau Polyolformulierung

Polyolformulierungen sind:

- auf die Verarbeitung mit bestimmten Polyisocyanaten abgestimmt
- enthalten alle notwendigen Hilfsstoffe für die chemische Reaktion
- zusammen mit einem Isocyanat bilden sie die Komponenten eines PUR-Systems

Polyole

Katalysatoren

Schaumstabilisatoren

Treibmittel

Zusatzstoffe

Füllstoffe

Polyester- / Polyetherpolyole

$M > 2000 \text{ [g/mol]}$ = Langketter

$M > 500 \text{ [g/mol]}$ = Mittelketter

Polyole

Katalysatoren

Schaumstabilisatoren

Treibmittel

Zusatzstoffe

Füllstoffe

- Zinnverbindungen

→ Vernetzung

- Amine

→ Vernetzung und/oder Treibreaktion

- Carboxylate

→ Trimerisierung von Isocyanaten

Polyole

Katalysatoren

Schaumstabilisatoren

Treibmittel

Zusatzstoffe

Füllstoffe

Silikonverbindungen dienen der Emulgierung der Reaktionspartner, der Keimbildung und der Stabilisierung während des Aufschäumens

Polyole

Katalysatoren

Schaumstabilisatoren

Treibmittel

Zusatzstoffe

Füllstoffe

chemisches Treibmittel

Wasser → *CO₂, isoliert
schlecht*

physikalische Treibmittel

Alkane, Hydrofluoralkane → *exotherm
→ bessere Isolierung*

Polyole

Katalysatoren

Schaumstabilisatoren

Treibmittel

Zusatzstoffe

Füllstoffe

- Antistatika
- Lichtschutz
- Antioxidantien
- Hydrolyseschutz
- Mikrobiozide
- Flammschutzmittel
- Trennmittel

Polyole

Katalysatoren

Schaumstabilisatoren

Treibmittel

Zusatzstoffe

Füllstoffe

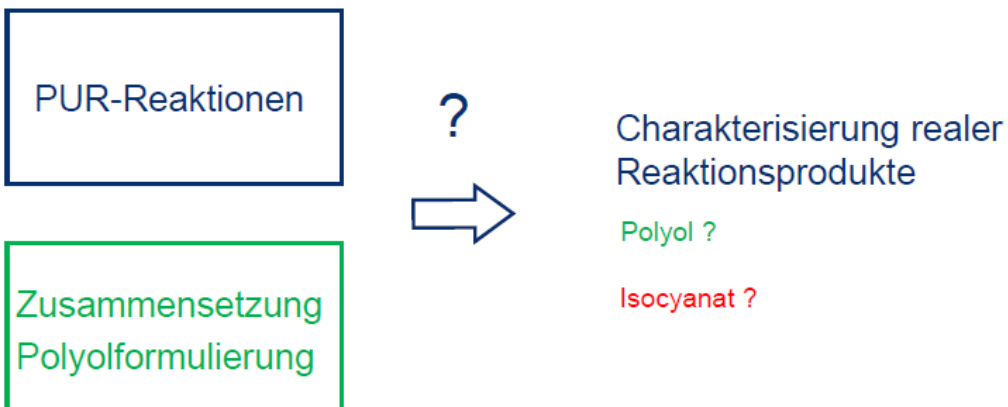
- Kreide
- Glasfasern
- Kork
- Holz
- ...

Variantenvielzahl einer PUR-Rezeptur

Polyol	Polyether-Polyol	50
	Polyester-Polyol	20
Kettenverlängerer	Diamin, Glykol	5
Chem. Treibmittel	Wasser	1
Phys. Treibmittel	n-Pentan	1
Schaumstabilisatoren	Polysiloxan-Polyether	5
Katalysatoren	tert. Amine, Zinnoctoat	20
Sonstige Additive	z.B. Flammschutzmittel	10
Isocyanat	MDI, TDI, (NDI)	20

Variationen

Rezepturberechnung



Polyol - Spezifikation, Kenndaten

Spezifikationen (chemisch)

OH-Zahl	[mg KOH/g]	nassanalytisch, Titration
Wasser	[%]	nassanalytisch, Titration nach Karl Fischer
<i>↳ sorgt für Schaum</i>		

Kenndaten (physikalisch)

Viskosität	[mPas]	bei T°C Kugelfall- / Rotationsviskosimeter
Dichte	[g/cm³]	bei T°C
Farbe		gegen Standard Hazen oder Jod
Geruch		Nase

Polyisocyanat - Spezifikation, Kenndaten

Spezifikationen (chemisch)

NCO%	[%]	naßanalytische Methode Titration
Acidität	[ppm HCl]	<i>↳ direkt katalytisch</i>

Kenndaten (physikalisch)

Dichte	[g/cm³]	bei T°C
Viskosität	[mPas]	bei T°C Kugelfall- oder Rotationsviskosimeter
Phenylisocyanat	[ppm]	
Sediment	[ppm]	

Analysemethode Dichte von Flüssigkeiten

Aräometer:

die Eintauchtiefe eines skalierten Stabschwimmkörpers ist ein Maß für die Dichte einer Flüssigkeit

Hydrostatische Waage:

eine Masse bekannter Dichte wird durch Auftrieb um die Masse verdrängter Flüssigkeit gemindert

Pyknometer:

volumengeeichte Glasgefäße werden mit der zu prüfenden Flüssigkeit gefüllt und gewogen

Achtung: Die Dichte ist temperaturabhängig!

Analysemethode Viskosität

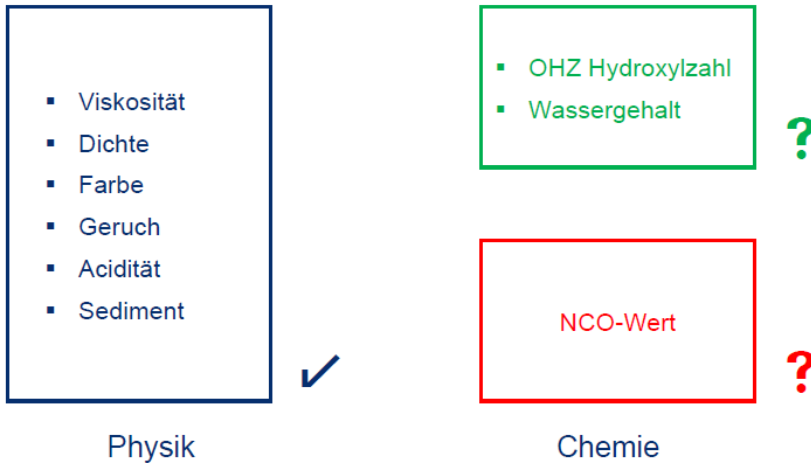
DIN 53015

Kugelfall-Viskosimeter nach Höppler:

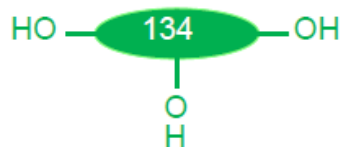
Bewegung einer Kugel in einem geneigten, temperierbaren, zylindrischen Rohr, gefüllt mit der zu prüfenden Flüssigkeit.

Es wird die Zeit gemessen, in der die Kugel eine Messstrecke von 100 mm absinkt. Das Ergebnis ist in Abhängigkeit der Dichten von Kugel und Prüfflüssigkeit proportional zur Viskosität bei gegebener Temperatur.

Definiert !?



Reaktionspartner einer schematischen Modellreaktion



Trimethylolpropan
(TMP)

M = 134 g/mol
f = 3

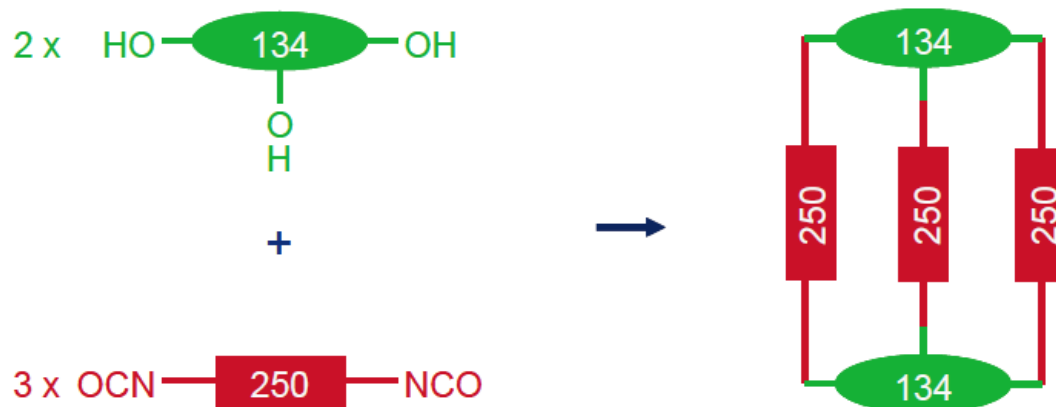


4,4'-Diphenylmethan-
diisocyanat (MDI)

M = 250 g/mol
f = 2

Schematische Modellreaktion

vollständige Umsetzung (stöchiometrisch) äquivalenter Mengen:



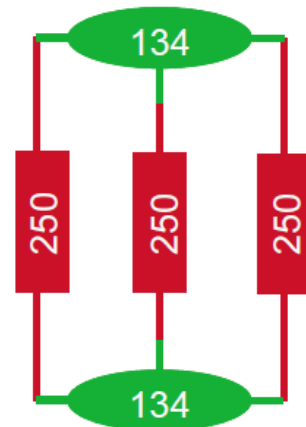
Massenverhältnis

Welche Massen Isocyanat und Polyol müssen miteinander reagieren, damit rechnerisch 100% aller Funktionen abreagieren?

$$MV = \frac{250 \cdot 3}{134 \cdot 2} = 2,8 = \frac{2,8}{1} = \frac{280}{100}$$

Man muss 2,8 Teile Isocyanat mit 1 Teil Polyol umsetzen.

Das Massenverhältnis MV lautet: 100 : 280



Definition Kennzahl

Dem Massenverhältnis für theoretisch 100%igen Umsatz wird die Kennzahl 100 zugeordnet.

$$KZ = 100 : \frac{250 \cdot 3}{134 \cdot 2} = 2,8 = \frac{280}{100}$$

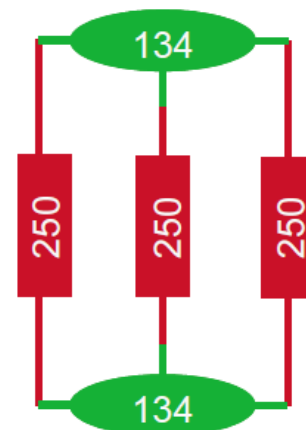
Die KZ ist größer 100, wenn das Isocyanat im Überschuss eingesetzt wird.

Das MV bei KZ = 107 wäre z.B.:

$$KZ = 107 : \frac{280 \cdot 1,07}{100} = \frac{300}{100}$$

*Kennzahl < 100
→ Untervernetzung
→ eher Elastomer*

*idR Kennzahlen
größer 100
→ mehr Vernetzung
→ härter*



Das Verhältnis von NCO zu OH

Die Kennzahl ist wichtig!

Kennzahl ↗

Aushärtezeit* ↗

Härte ↗

Zugfestigkeit ↗

Haftung (z.B. an PVC) ↗

Kennzahl ↗

Bruchdehnung ↘

Emissionen ↘
z.B. Gerüche

Was fehlt?

Verarbeitungsparameter

Kennwerte
der Rohstoffe

MV	Massenverhältnis
KZ	Kennzahl



OHZ Hydroxylzahl



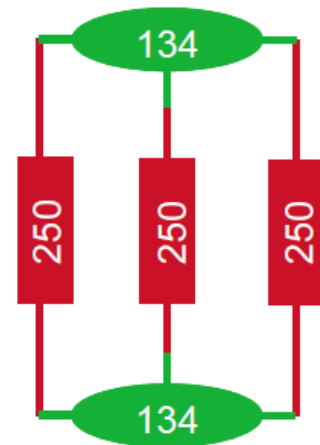
NCO%
NCO-Gehalt in Gew%

Äquivalentgewicht

„Das Äquivalentgewicht eines Stoffes ist die mit seiner Funktionalität gewichtete Masse von 1 mol seiner Moleküle.“

$$\ddot{A}G_i = \frac{M_i}{f_i}$$

$$\begin{aligned} \frac{250 \cdot 3}{134 \cdot 2} &= \frac{250}{2} \cdot \frac{3}{134} \\ &= \ddot{A}G_{\text{Iso}} \cdot \frac{1}{\ddot{A}G_{\text{Polyol}}} \\ MV_{100} &= \frac{\ddot{A}G_{\text{Iso}}}{\ddot{A}G_{\text{Polyol}}} \end{aligned}$$

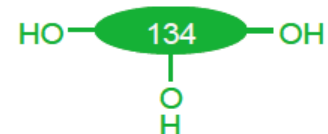


Hydroxylzahl, OHZ

Die OHZ ist definiert als das Verhältnis $OHZ = \frac{\ddot{A}G_{KOH}}{\ddot{A}G_{Polyol}}$ von KOH-Äquivalentgewicht zu Polyol-Äquivalentgewicht.

Gemäß der DIN 53240 wird das KOH-Äquivalentgewicht — *Kaliumhydroxid* in mg angegeben und das Polyol-Äquivalentgewicht in g.

$$OHZ = \frac{\left(\frac{56000}{1}\right)}{\left(\frac{134}{3}\right)} \cdot \frac{\text{mgKOH}}{\text{g}} = 1254 \frac{\text{mgKOH}}{\text{g}} = \text{OH-Zahl}$$



Anders ausgedrückt ist die OH-Zahl gleich der Menge an KOH in mg, die für eine *theoretische* Neutralisation von 1 g Polyol benötigt wird.

NCO%-Wert

Der NCO%-Wert gibt den Gewichtsanteil an Isocyanatgruppen in einem Isocyanat an.

$$NCO\% = \frac{M_{NCO} \cdot f_{Iso}}{M_{Iso}} \cdot 100 = \frac{M_{NCO}}{\ddot{A}G_{Iso}} \cdot 100$$

Welchen NCO%-Wert hat MDI ?

$$NCO\% = \frac{42 \text{ g/mol} \cdot 2}{250 \text{ g/mol}} = 33,6\%$$



OHZ von Wasser ...

ist gemäß der OHZ wie folgt festgelegt:

$$OHZ = \frac{\ddot{A}G_{KOH}}{\ddot{A}G_{Wasser}}$$

$$OHZ = \frac{\left(\frac{56000}{1}\right)}{\left(\frac{18}{2}\right)} \cdot \frac{\text{mgKOH}}{\text{g}} = 6222 \frac{\text{mgKOH}}{\text{g}}$$

Wo stehen wir?

$$\text{MV bei KZ} = 100$$

$$\text{MV}_{100} = \frac{\ddot{A}G_{\text{Iso}}}{\ddot{A}G_{\text{Polyol}}}$$



Hydroxylzahl

$$\text{OHZ} = \frac{\ddot{A}G_{\text{KOH}}}{\ddot{A}G_{\text{Polyol}}}$$

NCO%-Wert

$$\text{NCO}\% = \frac{M_{\text{NCO}}}{\ddot{A}G_{\text{Iso}}} \cdot 100$$

Verknüpfen der Gleichungen

$$\text{MV} = \frac{\ddot{A}G_{\text{Iso}}}{\ddot{A}G_{\text{Polyol}}} = \frac{\left(\frac{M_{\text{NCO}}}{\text{NCO}\%} \cdot 100 \right)}{\left(\frac{M_{\text{KOH}}}{\text{OHZ}_{\text{Polyol}}} \right)} \quad \text{Einsetzen}$$

$$= \frac{M_{\text{NCO}} \cdot 100}{M_{\text{KOH}}} \cdot \frac{\text{OHZ}_{\text{Polyol}}}{\text{NCO}\%} \quad \text{Umformen}$$

$$= \frac{42 \cdot 100}{56000} \cdot \frac{\text{g}}{\text{mgKOH}} \cdot \frac{\text{OHZ}_{\text{Polyol}}}{\text{NCO}\%} \quad \text{Konstanten einfügen}$$

!

$$\text{MV} = 0,075 \frac{\text{g}}{\text{mgKOH}} \cdot \frac{\text{OHZ}_{\text{Polyol}}}{\text{NCO}\%} \quad \text{MV, OHZ und NCO\% verknüpft!}$$

Faktor bleibt immer gleich *bekannte Größen*

WICHTIG !



$$\text{MV}_{100} = 0,075 \frac{\text{g}}{\text{mgKOH}} \cdot \frac{\text{OHZ}_{\text{Polyol}}}{\text{NCO}\%}$$

Zusammenfassung/Übung 3.

Zusammenfassung:

- Isocyanate werden großtechnisch durch Phosgenierung von Aminen gebildet. Die wichtigsten Isocyanate sind TDI und MDI.
- Polyurethane werden aus Isocyananten und einer Polyolformulierung (Wasser, Alkohol,...) gebildet.
- Über die Polyolformulierung wird die Polymerstruktur gestaltet. Zur Polyolformulierung gehören Polyole, Treibmittel, Stabilisatoren, Katalysatoren und Additive wie z.B. Verstärkungstoffe.
- Wichtige Begriffe für die Berechnung von Polyurethan-Rezepturen sind: Funktionalität, Hydroxylzahl, NCO-Wert, Massenverhältnis, Kennzahl und Äquivalentgewicht.

Übung:

Kennzahl - Mischungsverhältnis

Standard-Weichschaumformulierung:

Komponente	OH-Zahl / NCO-%	Teile in der Rezeptur
Polyether (Wassergehalt 0,1 %)	45	100
TDI 80	48,3	?
Wasser (Treibmittel)	6222	2,7
Schaumstabilisator	- <i>früher berücksichtigt bei OHZ</i>	0,6
Treibkatalysator (Amin)	- <i>früher berücksichtigt bei OHZ</i>	0,15
Vernetzungskatalysator (Zinndioctoat)	560	0,15

In der Laborentwicklung haben sich bei einer Kennzahl von 105 die besten mechanischen Kennwerte ergeben.

Ermitteln Sie das Massenverhältnis für die Verarbeitung auf einer Blockschäumenanlage.

Lösung: über mittlere OH-Zahl

Rezepturbestandteil	OH-Zahl	In der Rezeptur (bezogen auf Teile)
Polyether	45	100 x 45
Wasser	6222	2,8* x 6222
Vernetzungskatalysator	560	0,15 x 560
Mittlere OHZ	212,4	22005,6 / 103,6 **

▪ $MV_{105} = 1,05 \cdot 0,075 \cdot 212,4 / 48,3 = 34,6$

▪ Mengenverhältnis (KZ 105):
= 34,6 g / 100 g (je 100 Teile Polyolformulierung)

- * Wasseranteil im Polyol berücksichtigen
- ** Gesamt-Polyolformulierung

Lösung: über Äquivalentgewichte

Rezepturbestandteil	Äquivalentgewicht (g je g Iso Äquivalent)	In der Rezeptur
TDI 80	87 g (42*100/48,3)	
Polyether	1244 g (56.000/45)	7 g (100 g * 87 g / 1244 g)
Wasser	9 g	27 g (2,8 g ! * 87 g / 9 g)
Vernetzungskatalysator	100 g (56.000/560)	0,13 g (0,15 g * 87 g / 100 g)

- Benötigte Isocyanatmenge in der Rezeptur bei KZ 100:

$$7\text{ g} + 27\text{ g} + 0,13\text{ g} = 34,13\text{ g}$$

- Bei KZ 105:

$$1,05 * 34,13\text{ g} = 35,8\text{ g}$$

- Mengenverhältnis (KZ 105):

$$35,8\text{ g} / 103,6\text{ g}$$

$$= 34,6\text{ g} / 100\text{ g} \text{ (je 100 Teile Polyolformulierung)}$$

4. PUR Verarbeitung I - Vom Fluid zum Werkstoff

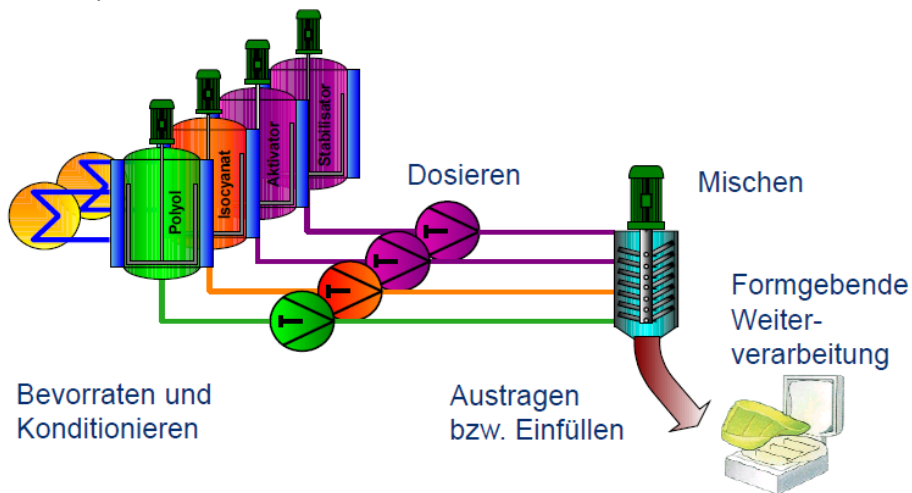
Lernziele

Komponenten der PUR-Verfahrenstechnik

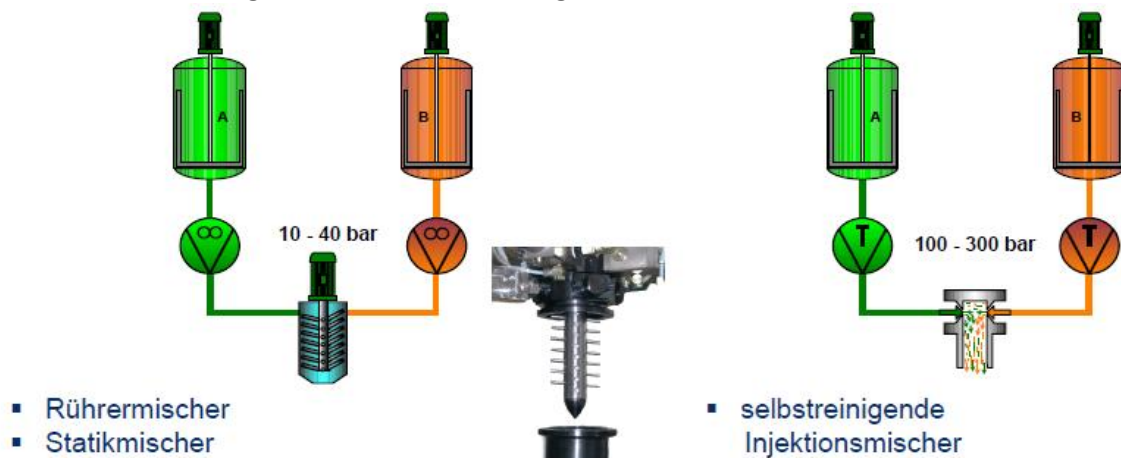
- Mischtechnik
- Dosiertechnik
- Bevorraten und Konditionieren

Maschinelle Herstellung von PUR-Schaumkunststoff

Grundoperationen



Niederdruckvermischung - Hochdruckvermischung



Diskontinuierliche Verfahren

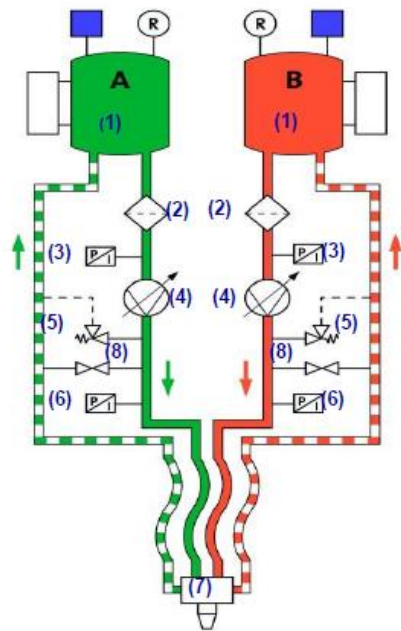
- Bevorzugter Einsatz der Hochdrucktechnik

Kontinuierliche Verfahren

- Niederdruck- und Hochdrucktechnik

[Hennecke]

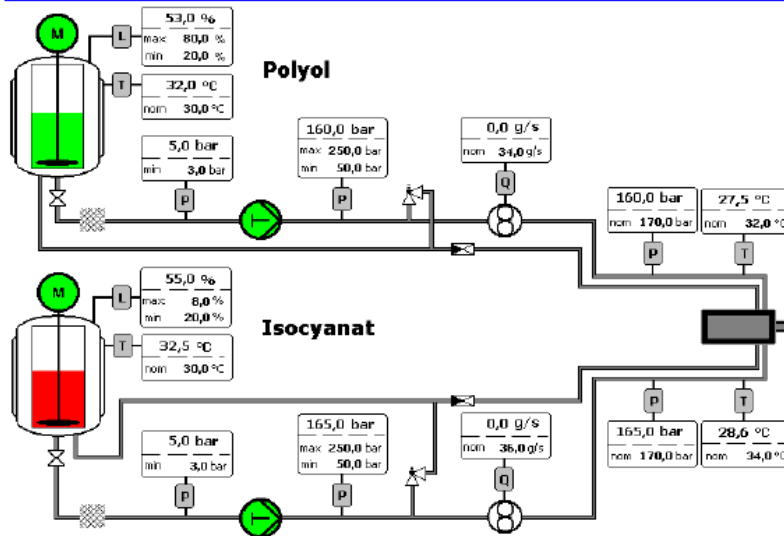
Verfahrensschema



- (1) Arbeitsbehälter
- (2) Filter
- (3) Druckmessung (Saugseite)
- (4) Dosierpumpen mit Stelleinrichtung
- (5) Sicherheitsventile
- (6) Druckmessung (Druckseite)
- (7) Rezirkulationsmischkopf
- (8) Niederdruckkreislauf

Bedienbildschirm

2004-09-22 Login Name: Paket: 11
13:11:55 Schichtführer Status: Kreislauf



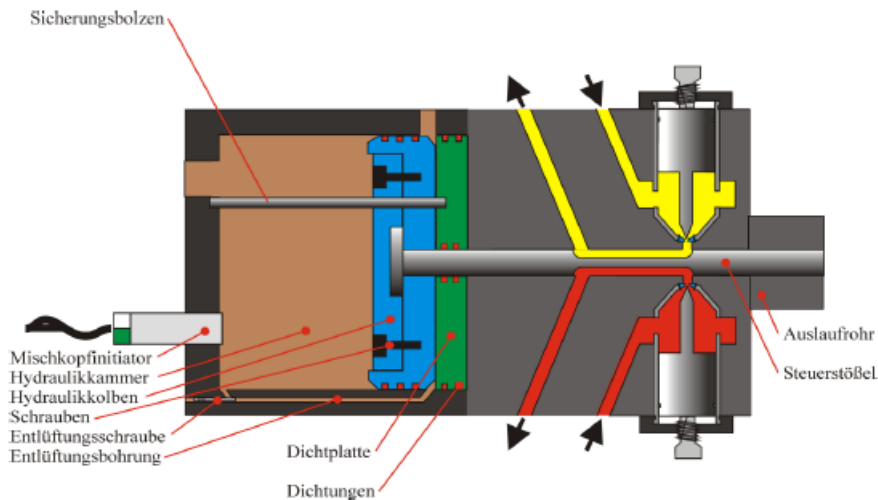
Visualisierung von

- Istwert
- Sollwerten
- Min./Max.-Werten
- Betriebsarten
- Füllständen
- Schnittstelle mit Eingabemenü
- Status

(7) Rezirkulationsmischkopf

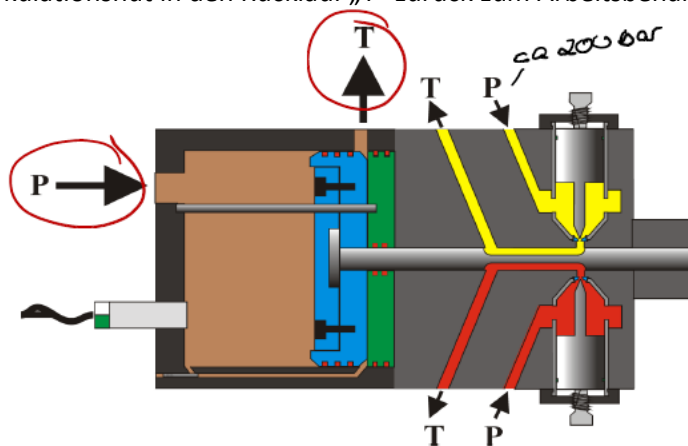
Linearmischkopf

- Der Linearmischkopf besteht aus zwei Teilen, dem Hydraulikteil und dem Komponententeil. Je nach Ausführung kann er für zwei oder mehr Komponenten verwandt werden, abhängig von der Anzahl der Zirkulationsnuten und Düsenpatronen.
- Einzige Verbindung zwischen Hydraulikteil und Komponententeil ist der Steuerstößel, der mit der Dichtungsplatte abgedichtet ist um ein Vermischen von Komponenten und Hydraulik zu vermeiden.
- Der Steuerstößel ist in den Hydraulikkolben eingesetzt und mit einem Sicherungsbolzen gesichert um ein Verdrehen des Steuerstößels zu vermeiden.
- Der Hydraulikkolben ist teilbar und mit Schrauben verbunden um den Steuerstößel ausbauen zu können.



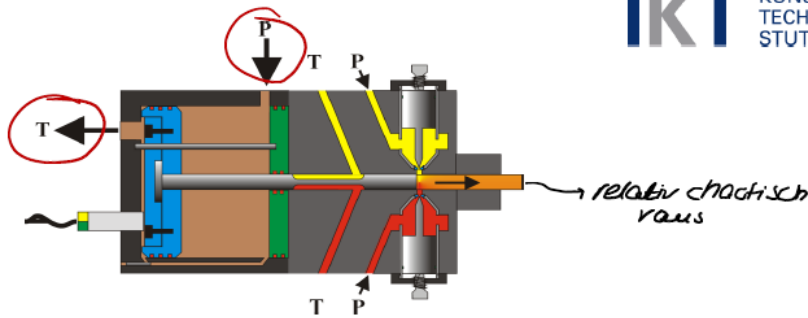
Kreislaufstellung

- Die Hydraulik drückt permanent gesteuert durch das Dosierventil auf den Hydraulikkolben und somit den Steuerstößel nach vorne.
- Die Komponente fließt angetrieben von einem Druckerzeuger (Plunger oder Pumpe) durch Anschluss „P“ in die Düsenpatrone, dort durch den Ringspalt zwischen Düsennadel und Düsensplättchen in die Injektionsbohrung. Von der Injektionsbohrung durch die Zirkulationsnut in den Rücklauf „T“ zurück zum Arbeitsbehälter.



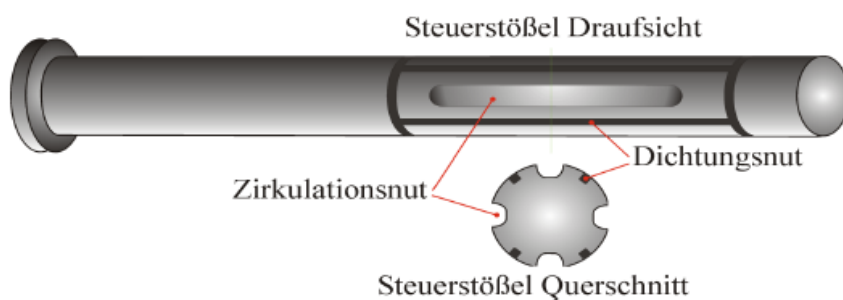
Dosierstellung

- Die Hydraulik drückt gesteuert durch das Dosierventil den Hydraulikkolben und somit den Steuerstößel nach hinten. Der Mischkopffinitiator meldet der Steuerung „Steuerstößel Hinten“.
- Die Steuerkante des Steuerstößels gibt die Injektionsbohrung frei, so dass die unter Druck stehende Komponente in die Mischkammer gegeneinander spritzen kann.
- Durch den hohen Druck und die hohe Fließgeschwindigkeit vermischen sich die Komponenten, dabei ist darauf zu achten, dass die Drücke beider Komponenten möglichst gleich sind, um eine gute Vermischung zu erreichen. Im ungünstigsten Fall kann es sogar zu einer Vermischung innerhalb einer Injektionsbohrung kommen und somit den Mischkopf verstopfen sollten die Drücke stark voneinander abweichen.
- Die vermischte Komponente tritt durch das Auslaufrohr aus.
- Bei Schussende fährt der Steuerkolben nach vorne, drückt die vermischten Komponenten aus dem Auslaufrohr, um Ablagerungen zu vermeiden und gibt die Kreislaufnuten wieder frei.



Steuerstößel

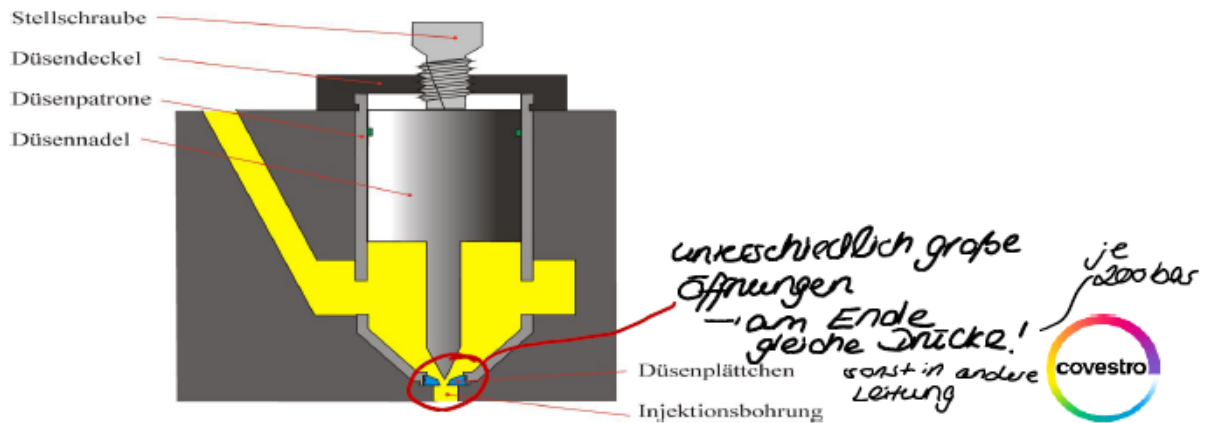
- Der Steuerstößel ist aus gehärtetem Stahl gefertigt und hat dadurch eine hohe Standzeit.
- Der Durchmesser des Steuerstößels gibt die Größe des Mischkopfes an z.B. bei einem 20er Mischkopf hat der Steuerstößel einen Durchmesser von 20 mm.
- Bedingt durch den Durchmesser des Steuerstößels ist die Größe der Zirkulationsnuten, das heißt je größer der Steuerstößel desto größer ist auch die Zirkulationsnut.
- Die Größe der Zirkulationsnut ist ausschlaggebend für die maximale Austragsleistung des Mischkopfes, jedoch sollte der Mischkopf auch nicht zu groß gewählt werden, damit bei kleinen Austragsleistungen eine saubere Vermischung in der Mischkammer stattfinden kann.
- Zwischen den einzelnen Zirkulationsnuten befinden sich Dichtungs-nuten um im Hochdruckkreislauf die einzelnen Zirkulationsnuten sicher gegeneinander abzudichten.



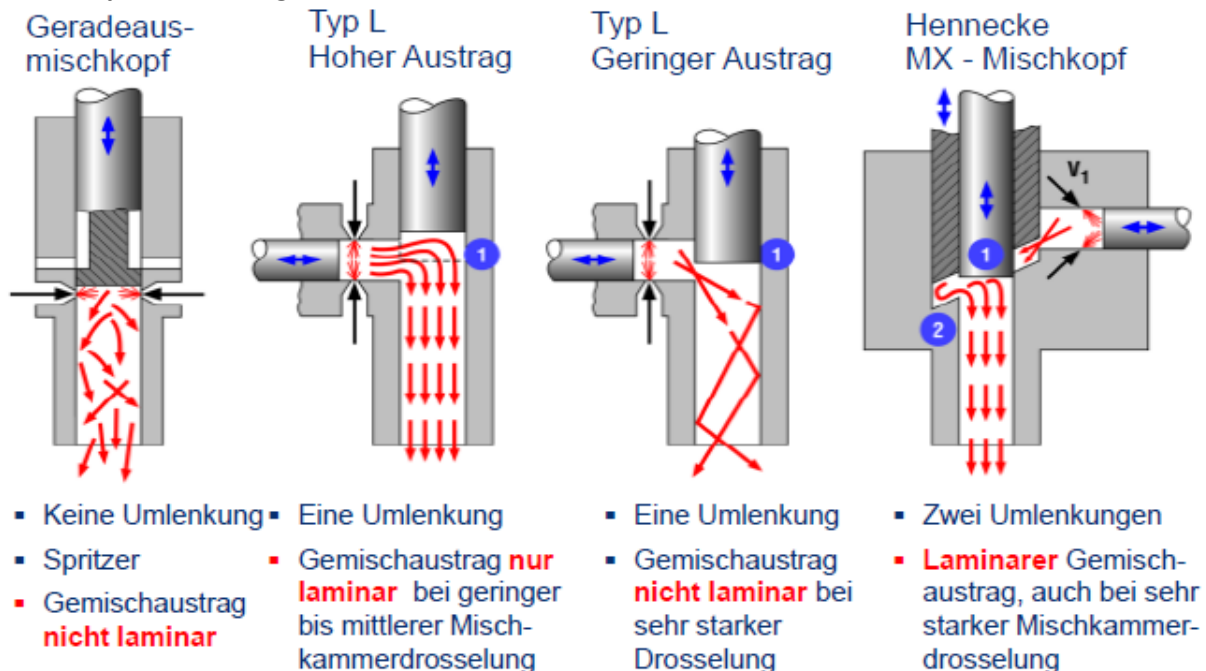
Düsenpatrone

Einstellen des Vermischungsdruckes

- Die Düsenpatrone besteht aus Stellschraube, Düsendeckel, Patrone, Düsennadel und Düsenplättchen.
- Das Düsenplättchen wird von unten in die Düsenpatrone eingesetzt. Der mit Schrauben gesicherte Düsendeckel drückt die Düsenpatrone und somit das Düsenplättchen in den Mischkopf. Somit ist das Düsenplättchen gegen verrutschen gesichert.
- Die Düsennadel ist lose in die Düsenpatrone eingesetzt und kann über die Stellschraube tiefer in die Patrone gedrückt werden. Das Zurückdrücken der Düsennadel nach Lösen der Stellschraube geschieht mithilfe des Komponentendruckes.
- Zwischen Düsennadel und dem Loch im Düsenplättchen entsteht ein Ringspalt der durch Verstellen der Düsennadel vergrößert bzw. verkleinert werden kann.
- Bei Düsenplättchen bis 1.4mm werden spitze Düsennadeln verwendet, bei Düsenplättchen über 1,4mm werden stumpfe Düsennadeln eingesetzt.



Mischkopf-Entwicklung



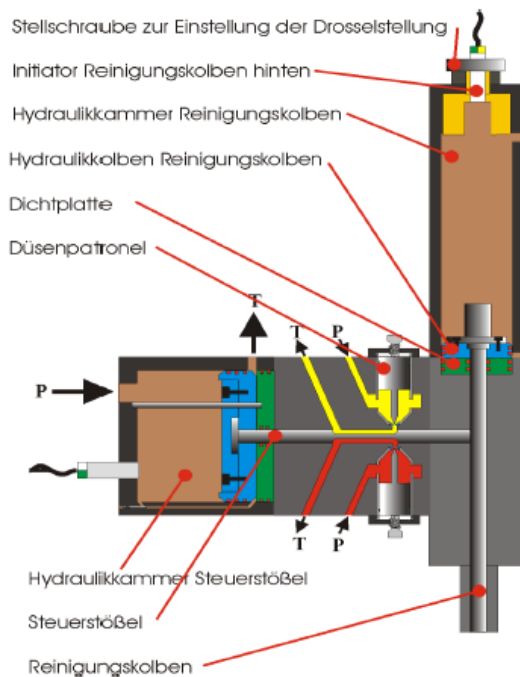
laminar gewünscht!

Mischkopf mit Umlenkung / ML-Mischkopf

Der Begriff „Umlenkung“ beschreibt den Fließweg des Produkts nach Eintritt in die Mischkammer bis zum Austritt am Mischkopfauslaufrohr. Durch Umlenkungen bei gleichzeitiger Erweiterung der Strömungsquerschnitte reduziert sich die Auslaufgeschwindigkeit des Reaktionsgemisches dabei vom chaotischen bis in den laminaren Bereich.

Der Umlenkmischkopf

- Der Umlenkmischkopf wird für die Verarbeitung schwer mischbarer Systeme und für den Gemischeintrag in offene Formen verwendet. Qualitätsbestimmend wirkt die Anordnung des Auslaufrohres: Es ist der Mischkammer in einem Winkel von 90° nachgeschaltet und beruhigt das ausströmende Mischgut.
- Mit dem Reinigungsstößel des Auslaufrohres lässt sich der Mischkammer-Auslaufquerschnitt verändern – selbst bei unterschiedlicher Austragsleistung wird konstant eine homogene Vermischung erzielt.



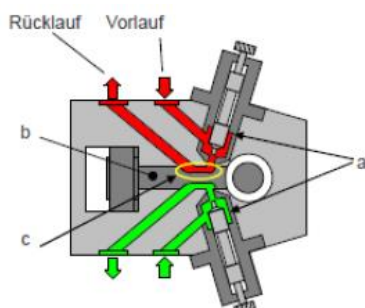
Drosselstellung

- Der notwendige Arbeitsdruck lässt sich mit den Düsenadeln vor dem Dosiervorgang im Hochdruckkreislauf exakt einstellen.
- Einen großen Beitrag zur Produktqualität leistet die automatisch anfahrbare und stufenlos vorwählbare Drosselstellung, die den Staudruck auch bei unterschiedlichen Ausbringungsvolumen konstant hält.
- Die Hydraulik drückt permanent gesteuert durch das Dosierventil den Hydraulikkolben und somit den Steuerstößel nach vorne.
- Die Komponente fließt angetrieben von einem Druckerzeuger (Plunger oder Pumpe) durch Anschluss „P“ in die Düsenpatrone, dort durch den Ringspalt zwischen Düsenadel und Düsenplättchen in die Injektionsbohrung. Von der Injektionsbohrung durch die Zirkulationsnut in den Rücklauf „T“ zurück zum Arbeitsbehälter.
- Mit Hilfe der Stellschraube zur Einstellung der Drosselstellung wird der Reinigungskolben vor die Eintragsöffnung des Steuerstößels in das Auslaufrohr in seiner Lage verstellt. Hier komplett geöffnet, also nicht angedrosselt.

MX-Mischkopf

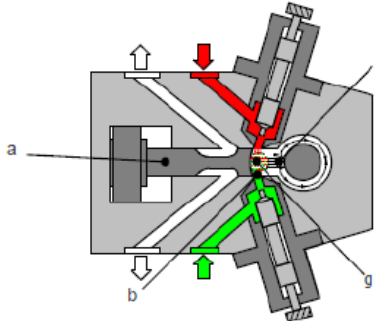
Kreislaufposition:

In der Hochdruckkreislaufphase zirkulieren beide Komponenten über die Düsen (a) durch die in den Steuerkolben (b) eingebrachten Nuten (c) zurück in den Arbeitsbehälter. In diesem Mischkopfzustand können die Injektionsdrücke der jeweiligen Komponenten an den Düsen eingestellt werden. Die üblichen Injektionsdrücke liegen je nach Verarbeitungsverfahren in Bereichen zwischen 100 bis 200 bar.



Schussposition:

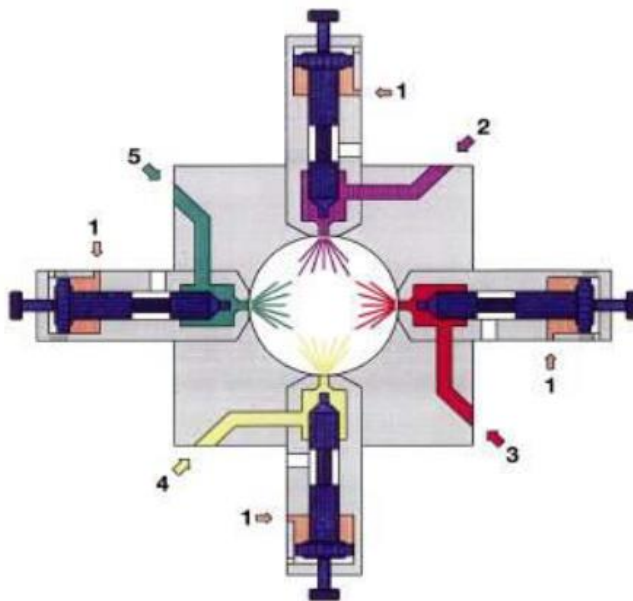
Durch Zurückfahren des Steuerkolbens (a) erfolgt ein zeitsynchrones Öffnen der Düsen (b) mit Eintritt der Reaktionskomponenten in die freigegebene Mischkammer (g). Nach einer kurzen Mischkammerververweilzeit reduziert sich die Fließgeschwindigkeit des Reaktionsgemisches bei Eintritt in das Auslaufrohr (h) durch Strömungsschikanen (i und j) bei gleichzeitiger Erweiterung der Strömungsquerschnitte.



Kein aktives Rührelement.

MQ – Mischkopf (Querschieber)

MQ-Mischkopf, Hersteller Fa. Hennecke MQ steht für Mischkopf-Querstößel, wobei der sogenannte Querstößel eine Drosselfunktion übernimmt. Die Vermischung der Reaktionskomponenten erfolgt über Hochdruck-Gegenstrominjektion.



4-Komponenten-Version

- Düseneinzelschaltung
- Extrem schneller Düsenwechsel
- Rezepturänderung von Schuss zu Schuss

→ bei extremen Verhältnis, z.B. 1:7

Dosiertechnik

Aufgrund der Vielfalt der in Reaktionsgießmaschinen verwendeten Pumpentypen können nachfolgend nur einige exemplarisch angesprochen werden.

Generell unterscheiden sich die verwendeten Pumpen durch ihre Förderaufgaben:

- Umwälzen
- Druckerhöhung
- Dosieren

Umwälzpumpen

Umwälzpumpen finden z. B. Anwendung in Temperierkreisläufen und Schmiermittelvorlagen. Ihre Aufgabe ist die Erzeugung einer Produktströmung ohne besonderen Anspruch an Dosiergenauigkeit, Pulsationsfreiheit und Druckstabilität.

(4) Dosierpumpen

Standard Pumpentechnik

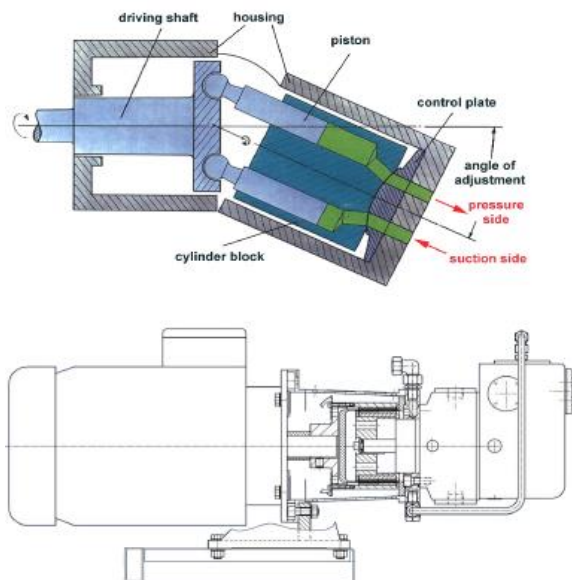
Axialkolbenpumpe mit Magnetkupplung

Vorteile

- Unbegrenzte Dosierzeit

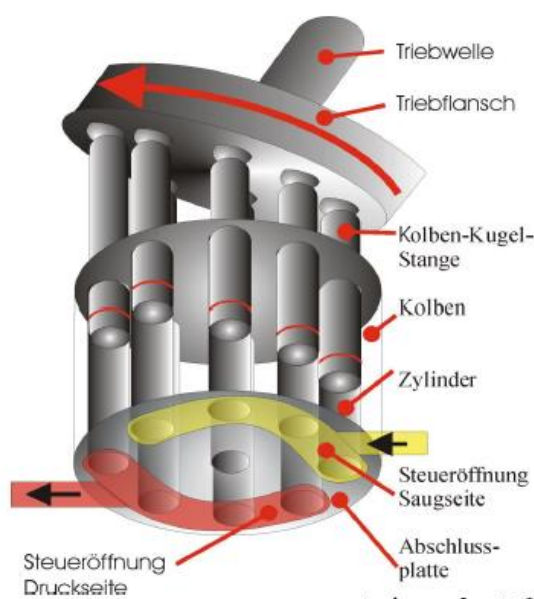
Nachteile

- Nicht für abrasiv gefüllte Komponenten (Glasfasern)
- Druck und Austragsleistung verhalten sich antiproportional, d. h. steigt der Druck am Mischkopf sinkt die Austragsleistung und umgekehrt.



Die Funktion der Dosierpumpe

- Beim Drehen der Triebwelle wird der Zylinder über die kreisförmig am Triebflansch gelenkig angebrachte Kolben-Kugelstangen in Drehung versetzt. Die Steuerplatte besitzt 2 nierenförmige Steueröffnungen. In der Null-Lage des Schwenkgehäuses führen die Kolben keinen Hub aus.
- Bei Ausschwenkung des Schwenkgehäuses bewegt sich jeder der Kolben in den Zylinderbohrungen vom oberen Totpunkt zum unteren Totpunkt und umgekehrt. Jeder der Kolben führt dabei einen vom Schwenkwinkel abhängigen Hub aus.
- Die Kolbenbewegung vom unteren zum oberen Totpunkt ergibt den Saughub (gelb). Dabei wird durch eine der beiden Steueröffnungen (Saugseite) das der Kolbenfläche und dem Kolbenhub entsprechende Komponentenvolumen über die Abschlussplatte angesaugt. Beim Weiterdrehen der Triebwelle auf dem Weg eines Kolbens vom oberen zum unteren Totpunkt wird die Komponente zur anderen Steueröffnung (rot) hinausgedrückt.



- Beim Drehen d...
kreisförmig am...
Kugelstangen in...
nierenförmige...
Schwenkgehäus...
- Bei Ausschwenk...
der Kolben in d...
zum unteren To...
dabei einen vom...
- Die Kolbenbewe...
den Saughub...
Steueröffnungen...
Kolbenhub ent...
Abschlussplatte...
auf dem Weg ei...
wird die Komp...
hinausgedrück...

*kontinuierlicher Ausstrag
→ nicht mit Füllstoffen möglich*

Der Plunger

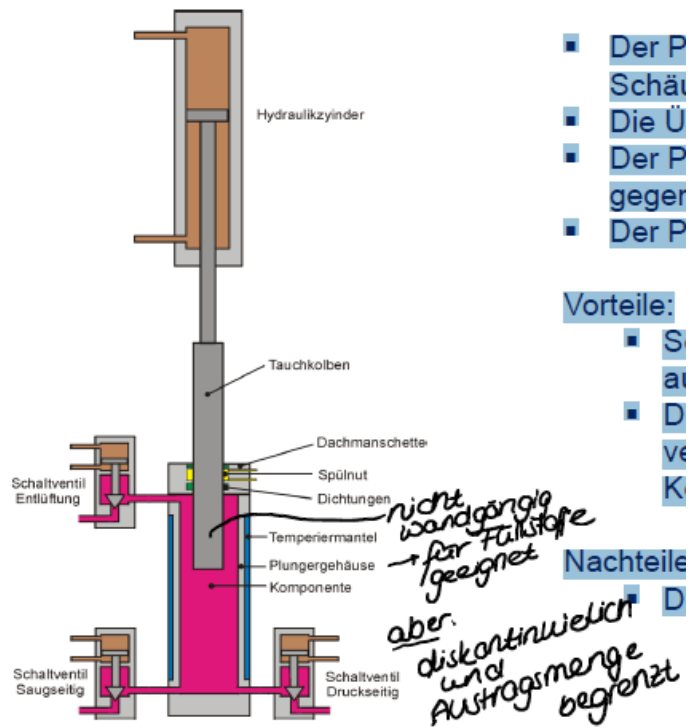
- Der Plunger ist eine Art der Druckerzeugung in Schäumenanlagen.
- Die Übersetzung Hydraulik / Komponente ist 1:1
- Der Plungerkolben ist mit einem Spezial-Dichtmanschettensatz gegen die Komponente bzw. die Atmosphäre abgedichtet.
- Der Plunger hat gegenüber Pumpen folgende

Vorteile

- Sehr hohe Dosiergenauigkeit, da bei Druckschwankungen auf der Komponentenseite die Austragsleistung stabil bleibt.
- Durch die Tauchkolbenbauweise ist der Plunger sehr verschleißarm und kann auch für abrasiv gefüllte (Glas) Komponenten verwandt werden.

Nachteile

- Die Austragsmenge ist durch den Zylinderhub begrenzt.



- Der P
- Schäl
- Die Ü
- Der P
- geger
- Der P

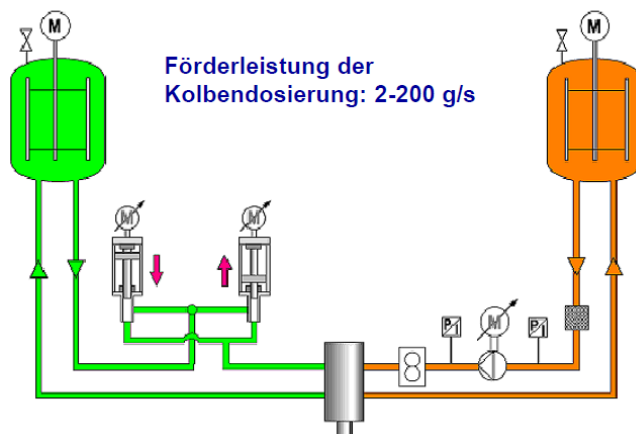
Vorteile:

- S
- ai
- D
- ve
- K

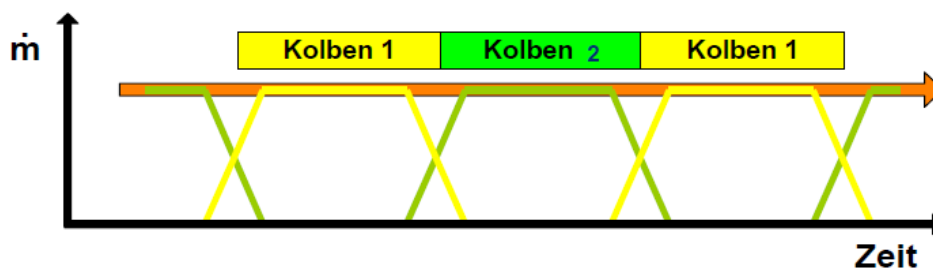
Nachteile:

- D

Kolbendosiermaschine (Hennecke HT)



Funktionsprinzip eines kontinuierlichen Kolbendosierers



$$\dot{m} = \dot{m}_{\text{Kolben1}} + \dot{m}_{\text{Kolben2}} \approx \text{konstant}$$

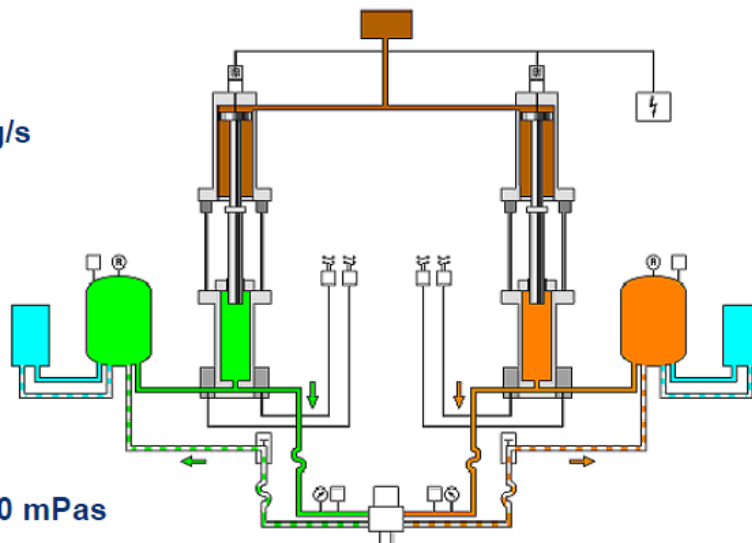
Volumenstrom fast konstant
+ Füllstoffe möglich

Verfahrensschema eines RIMdomaten

RIM – Reaction Injection Molding

Austrag:
50-10.000 g/s

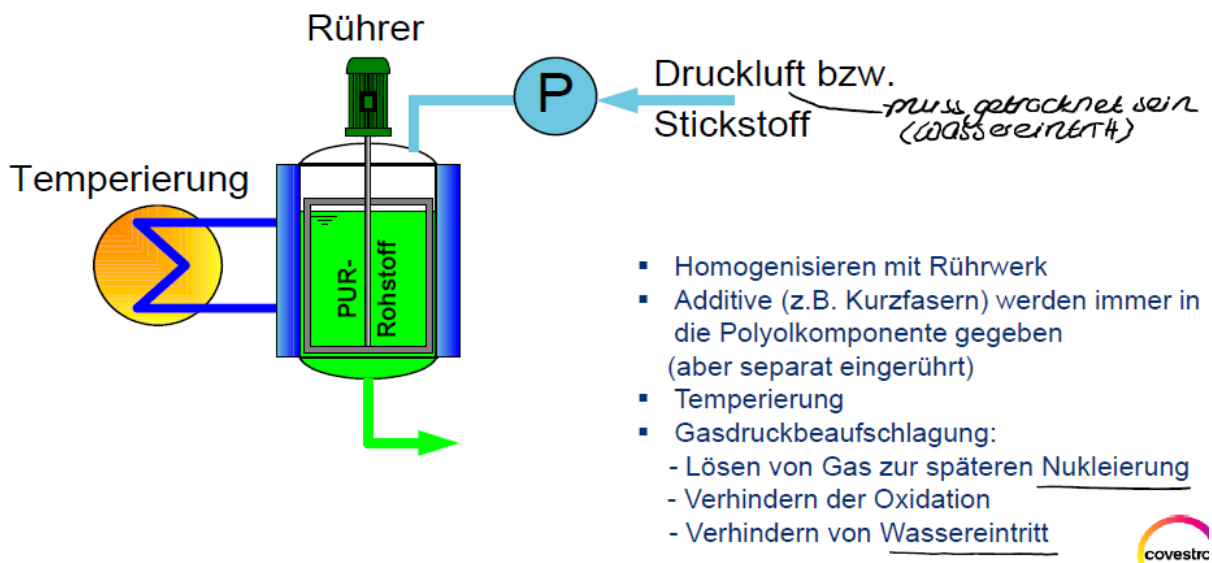
Viskosität:
3 bis 50.000 mPas



(1) Arbeitsbehälter

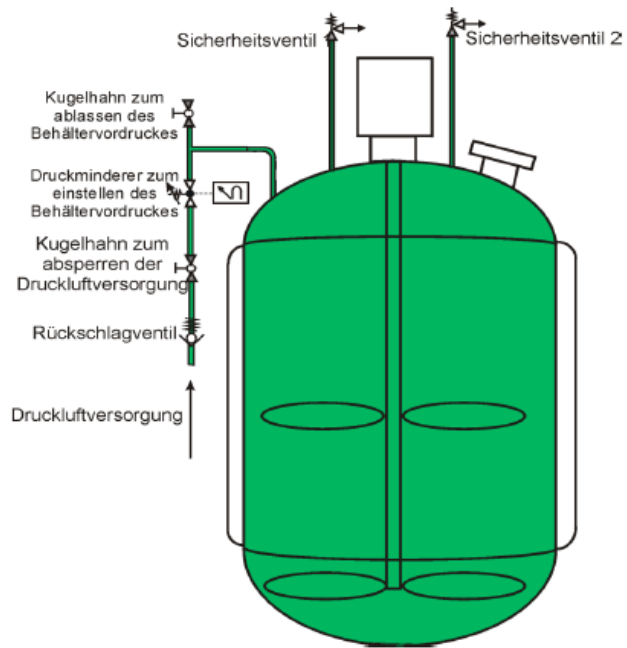
Bevorraten und Konditionieren

Der Arbeitsbehälter

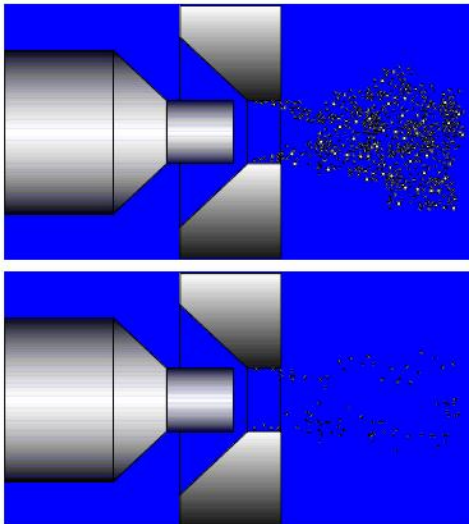


Versorgung des Behälters mit Druck

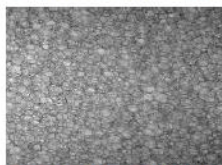
- Die Druckversorgung des Arbeitsbehälters kann wahlweise mit Stickstoff oder atmosphärischer Druckluft erfolgen.
- Das Sicherheitsventil 1 lässt bei Überdruck im Behälter den überschüssigen Druck ab. Der Ansprechdruck des Sicherheitsventils ist nicht einstellbar, je nach Behälter kann er zwischen 1 bis 12 bar liegen.
- Das Sicherheitsventil 2 ist als zusätzliche Sicherheit gedacht. Das Ansprechverhalten liegt normalerweise 2 bar über dem Ansprechverhalten von Sicherheitsventil 1.
- Der Vordruck des Behälters hat die Aufgabe den Weitertransport der Komponente zu unterstützen, da die meisten Pumpen keine ausreichende Saugleistung haben.
- Bei gasbeladenen Komponenten hat der Vordruck zusätzlich die Funktion das Beladungsgas in der Komponente in Lösung zu halten. Beispiel: ausströmende Kohlensäure bei öffnen einer Cola-Flasche.



Einfluss des Behälterdrucks auf die Nuklierung von Schaumstoffen



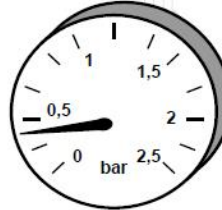
- Hoher Behältervordruck: 2-3 bar



Feinzelliger Schaum

*Bsp. Sprudel-
Flasche
schäumen
→ hoher Druck
→ schäumt bei
Druckentlastung*

- Geringer Behältervordruck: 0-1 bar



Grobzelliger Schaum



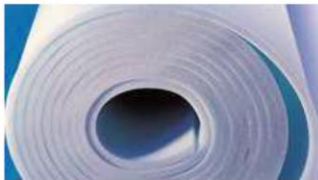
5. PUR Verarbeitung II

Lernziele

- PUR-Verarbeitungstechnik an Beispielen
 - > kontinuierliche **Verfahren** (Dämmelemente, Weichblockschaum)
 - > diskontinuierliche Verfahren (RIM, (Faser-) Sprühverfahren, Hybridtechnologien)
- Recycling von Polyurethan

Kontinuierliche Verfahren

Anwendungen Weichblockschaum

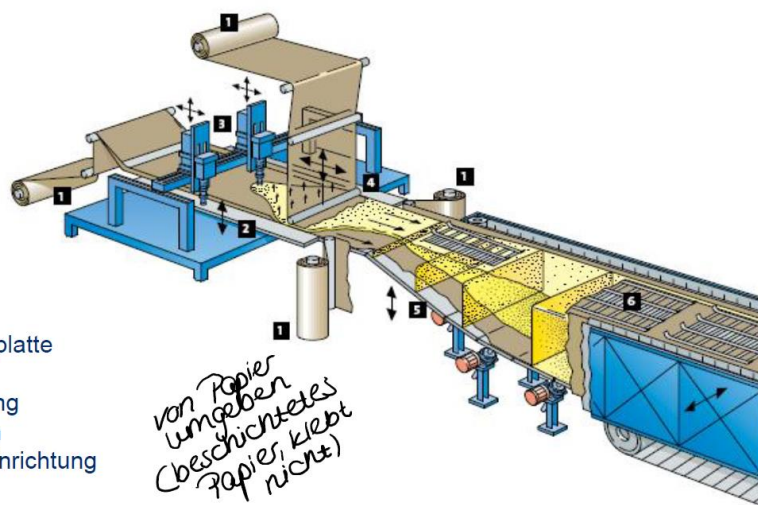


Fotos: Recticel, Eurofoam

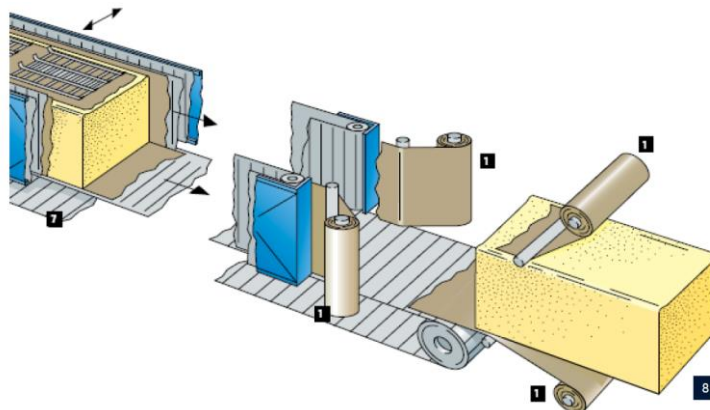


Anlage zur Herstellung von Blockschaum

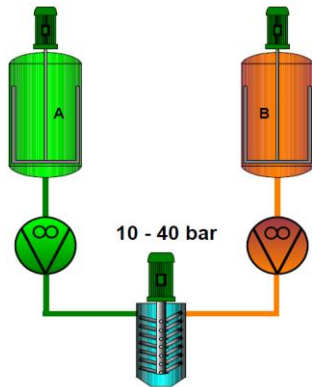
1. Trennpapiere
2. Gemischauftragsplatte
3. Rührermischer
4. Kalibriervorrichtung
5. Fall-Plate-System
6. Rechteckblock-Einrichtung



1. Trennpapiere
7. Aushärtestrecke
8. Blockablängmaschine



Niederdruckvermischung



▪ Rührermischer

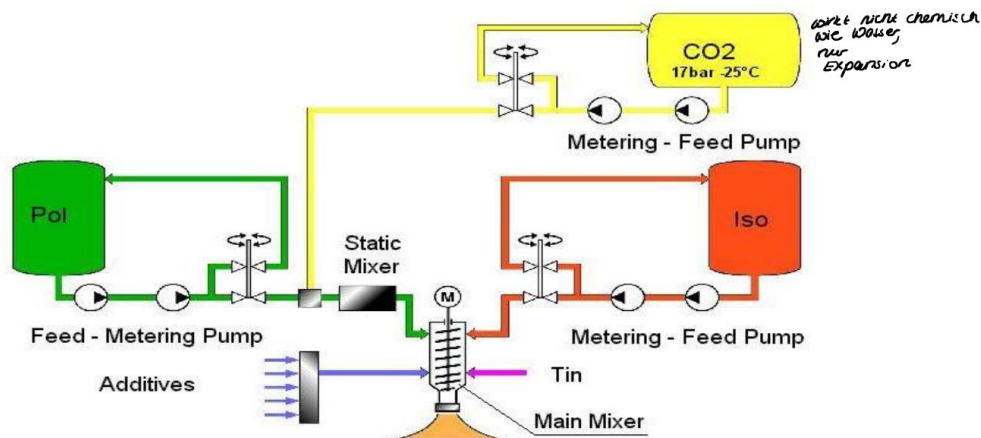
Lager ist limitierende Größe

Kontinuierliche Verfahren

Reinigung der Mischkammer nach Dosierende durch Lösungsmittel oder Polyol

NovaFlex

Kontinuierliche Verschäumung mit CO_2 -Unterstützung

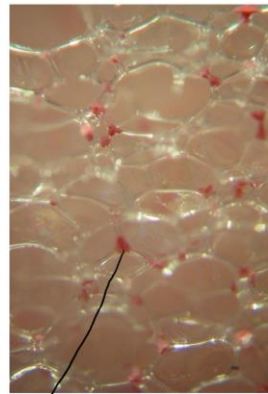
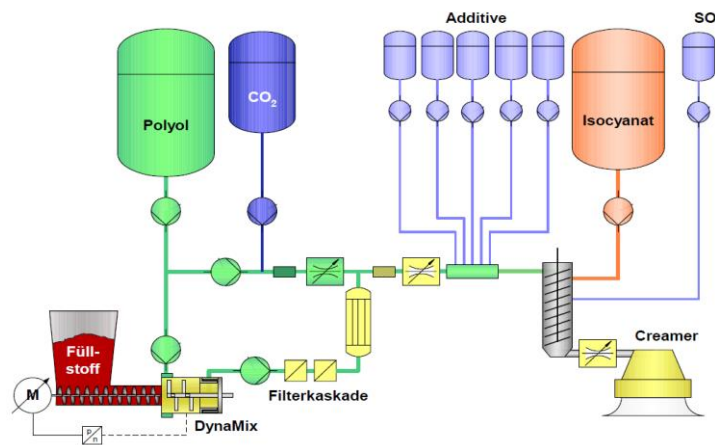


MultiStream-Technologie

Novaflex Creamer

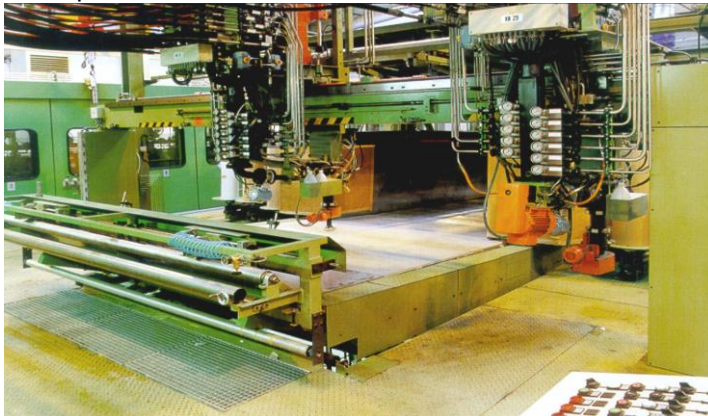


Blockschaumherstellung mit Füllstoffzudosierung (z.B. Kreide, Melamin)

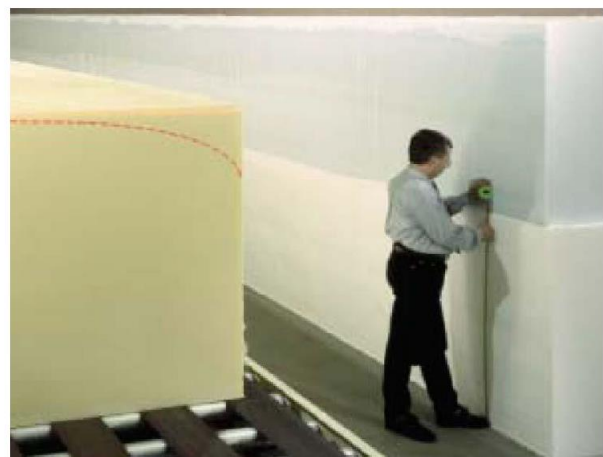


→ Melamin
Flammschutz-
mittel

Kontinuierliche Weichschaum-Blockschaumanlage Mischportal



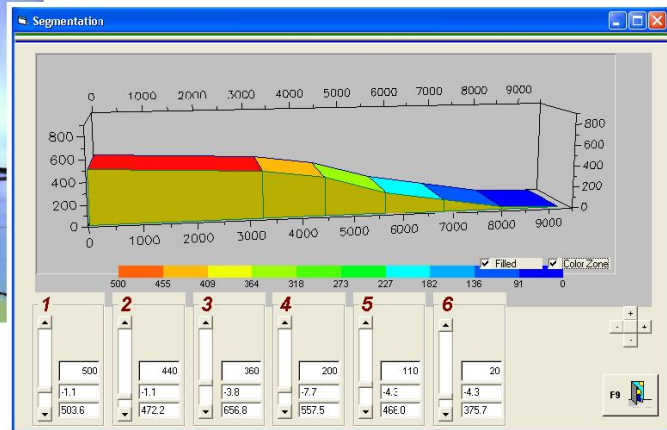
Anlage zur Herstellung von Blockschaum Schäumtunnel und Schaumblock



Faltbretter



Faltbretter werden abhängig von der Schaumtype vor Schäumbeginn eingestellt



Weichblockschaum

Abdeckung und Gleitkufen

*kein
runder
schaumpilz*



Reifelager



Sandwich Elemente (Hartschaum)

Anwendungen

Discontinuous



Continuous



Special applications



Insulation Boards
(flexible facings)



Sandwich Panels
(Steel facings)



Doppeltransport-Anlage für Metall-Panel

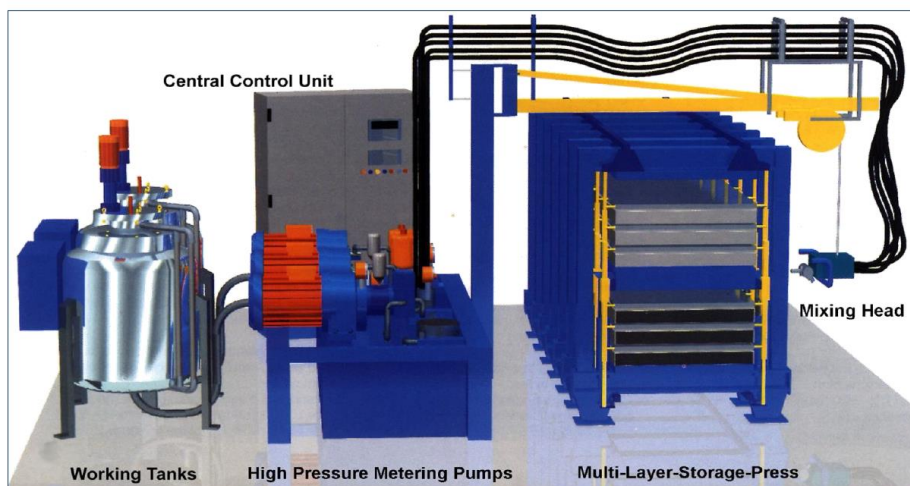


Diskontinuierliche Verfahren

Sandwich-Elemente

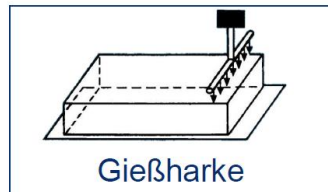
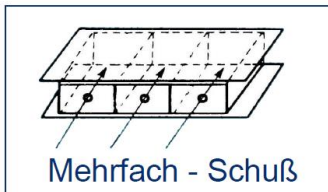
Anlagentechnik

Herstellung von Kühlcontainern



Gemischeintrag

mehrere Düsen / Injektionen
→ gleichmäßige Verteilung / Aufschäumung



Montagenpressen (6 Etagen)



Kühlschrankherstellung

Aufbau

Schaum hat Funktion des
Verklebens & Isolierens

Innenbehälter
(Kunststoff)

PUR-Schaum



Außenseite
(Stahlblech)

30% gehen
in Herstellung von
Kühlschränken

Fertigungsschritte

I.) Vormontage

Verbindung Innen- mit Außenbehälter
Vorbereitung Kabeldurchführungen, etc.

II.) Verschäumung

Diskontinuierliche Formverschäumung
(eingebrachter PUR-Hartschaumstoff stellt Verbindung zwischen
Außenblech und Kunststoffinnengehäuse her)

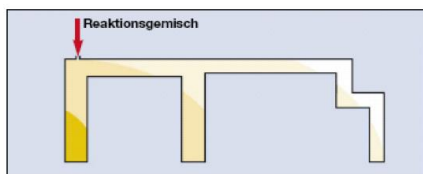
III.) Endmontage

Montage Kompressor, Einbauten, etc.

Fülltechniken

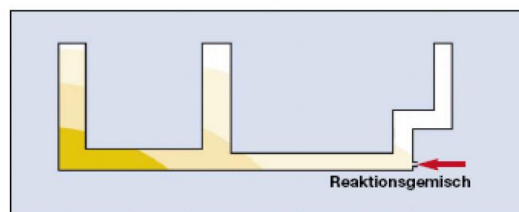
*heute:
mehrere Injektionen &
Einspritzstellen
→ Füllvorgang wird verkürzt*

Glockenguß

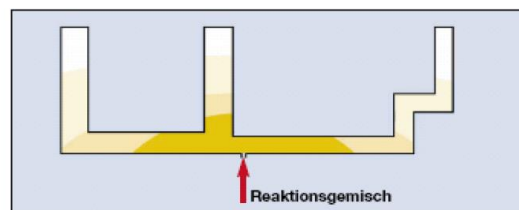


*ungünstig aber
verarbeitungstechnisch einfacher
keine gleichmäßige Verteilung*

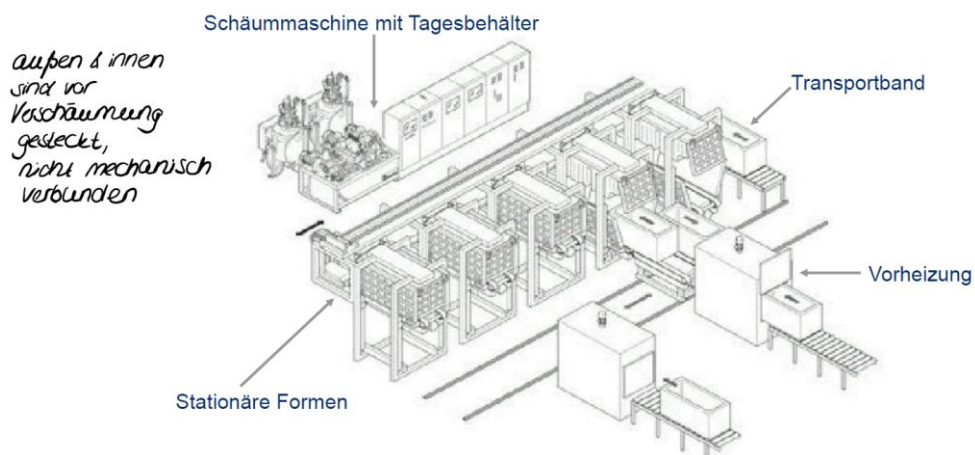
Wannenguß



Top Flow



Schema-Zeichnung einer stationären Kühltischanlage



Fertigungsschritt Gehäuse

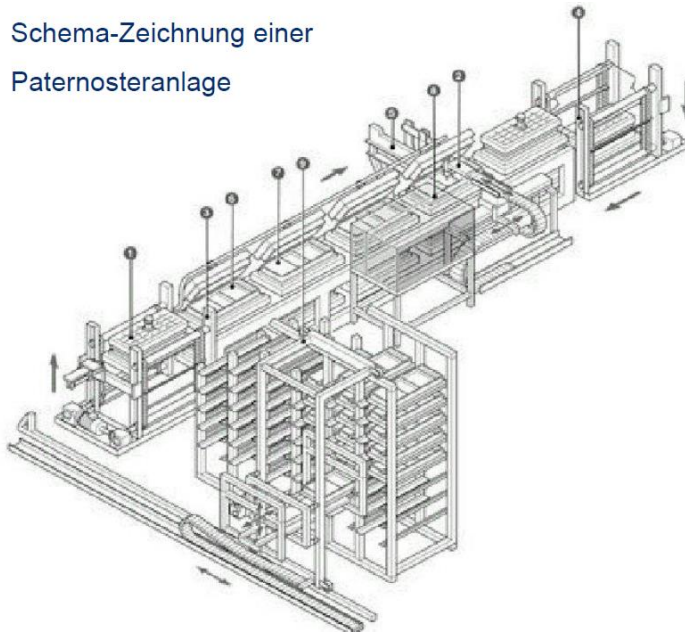
Wechselkernanlage
Canon/Italien

*für unterschiedliche
Designs
(mit/ohne Gefriefach)*

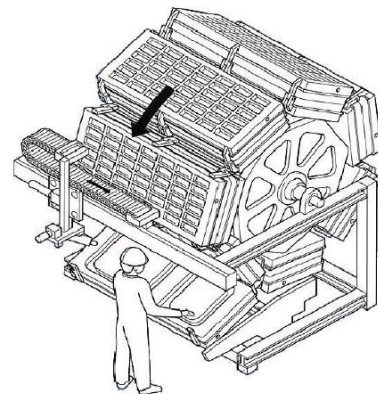


Herstellung von Kühlschränken

Schema-Zeichnung einer
Paternosteranlage



Schema-Zeichnung
einer Türanlage



Fernwärmeindustrie

weiterer großer Markt → Rohre für Fernwärme, innen Metall außen PUR
Rohrdurchmesser von 5 mm bis 2500 mm, bis zu 16m-Rohrlänge



Produktionstechnologien für Fernwärmerohre

Gieß-Steigtechnik (diskontinuierlich)

- Das Reaktionsprodukt wird durch optimale Rohrneigung vorverteilt und expandiert zu beiden Rohrenden.
- Der lange Fließweg wird durch höhere Einfüllmenge kompensiert.
- Abstandshalter fixieren das Mediumrohr mittig.
- Klassische Fülltechnik mit breitem Herstellungsfenster.

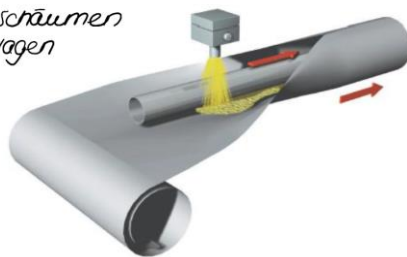


1. Verfahren: Gieß-Steigtechnik
 → Lanze fährt langsam zurück
 Limitation: Lanze kann nicht ewig lang
 eingeführt werden

Axial-Gießtechnik (kontinuierlich)

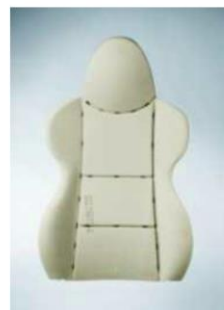
- Das Reaktionsprodukt wird auf eine axial bewegte Folie / Rohr vorverteilt.
- Der Fließweg ist der Rohrumfang.
- Hohe Reaktivität = feines Zellbild = gutes Lambda (=kleines Lambda und damit geringe Wärmeleitfähigkeit) und Produkteinsparung zeichnen diese Technik zur Herstellung von flexiblen und starren Rohren aus.

2. Verfahren:
 Folie wird nach Schäumen
 drum rum geschlagen
 & verschweißt



Weichformschaum

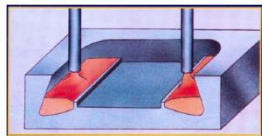
Anwendungen



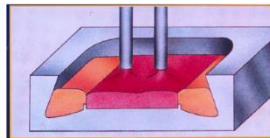
Dual-Hardness: Mehrzonenschaum für Komfort und Sicherheit

Optimale Herstellung mit zwei unabhängigen Mischköpfen

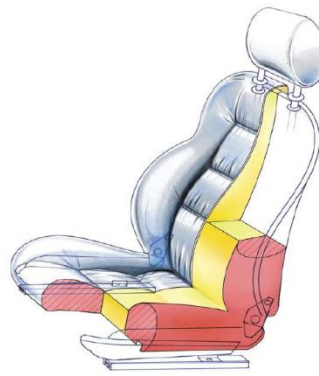
- Mehr-Härten-Technologie zur Erhöhung der Fahrsicherheit und des Komforts
- Ergonomie-gerechte Sitzgestaltung
- günstige Dauergebrauchseigenschaften



1. Füllen der harten Seitenwangen

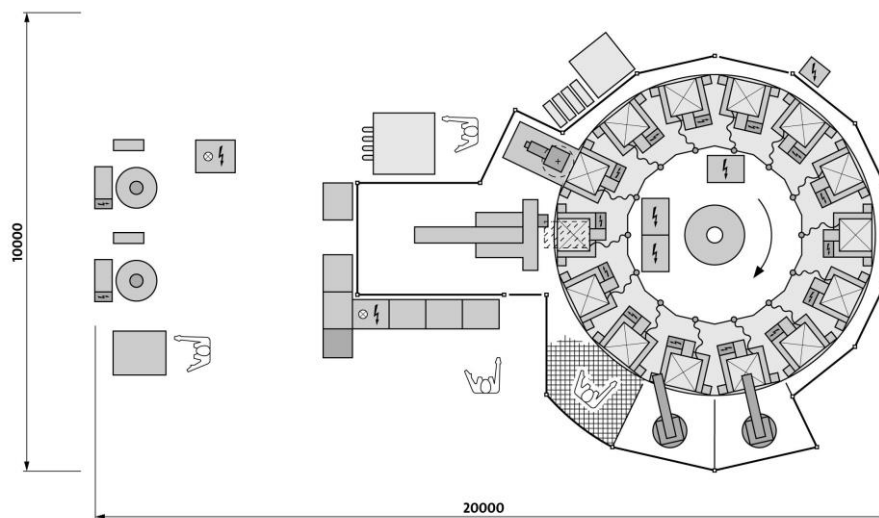


2. Füllen des weichen Sitzspiegels



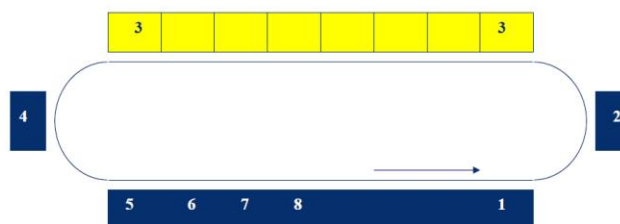
Rundtisch Anlage

Hersteller: Hennecke GmbH



Formschaumproduktion

Herstellung von Fahrzeugpolstern – Prinzip Ovalanlage



1. Einfüllen
2. Deckel schließen
3. Aushärten
4. Deckel öffnen

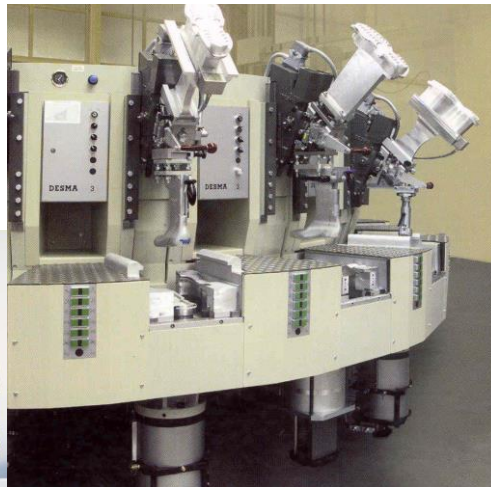
5. Entformen
6. Form reinigen
7. Trennmittel
8. Einlegeeile

Herstellung von Schuhen

Direktansohlung

- Direktansohlen mit PUR ist das einzige Besohlungsverfahren, welches ganz ohne Haftvermittler oder Nähen etc. auskommt.
- Trotzdem gilt die Haftung zum Schaft als sehr gut
- 25 % Anteil an Sohlen PUR

- Rationelle Besohlungsart
- meist Anspritzen mit Niederdrucktechnologie (Schnecke); selten Hochdrucktechnologie (Gießen)
- neben Ein-System-Sohlen oft als Zwischensohle mit einer PUR-, TPU- oder Gummilaufsohle



Technologie Niederdruck

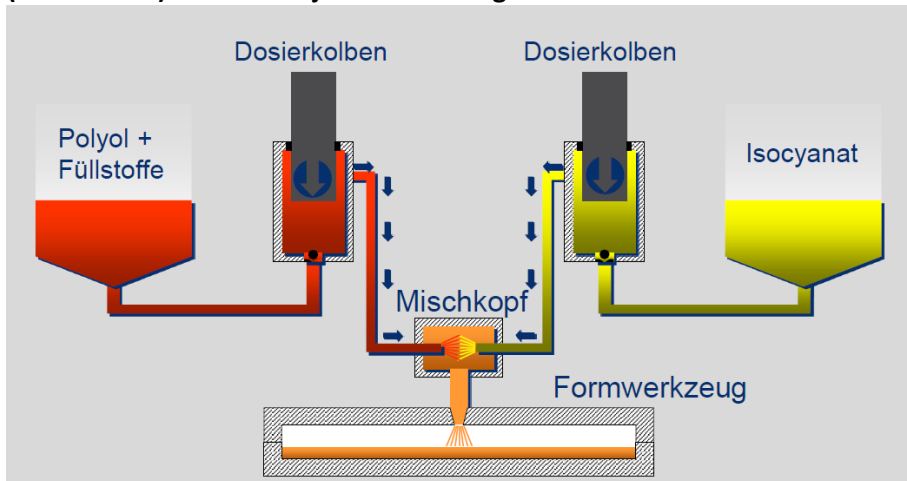
Selbstreinigende Schnecke

- Selbstreinigung nach jedem Schuss
- keine Lösungsmittel
- Farbwechsel von Schuss zu Schuss
- Komponentenwechsel von Schuss zu Schuss
- Spritzen in geschlossene Formen oder Giessen in offene Kavität
- durch die hohe Drehzahl von 16.000 U min⁻¹ wird das Reaktionsgemisch um ca. 10°C wärmer als beim Rührwerk



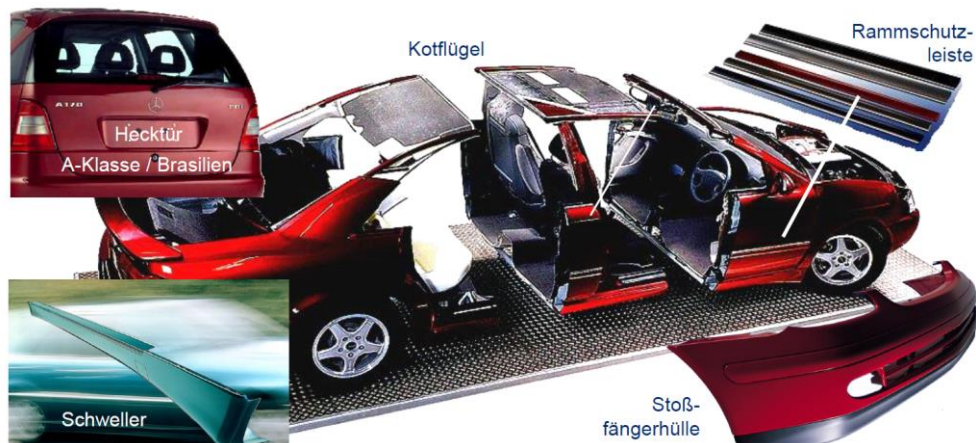
Reaktionsspritzguss

(Reinforced-) Reaction-Injection-Molding



RRIM-Verarbeitung

(Kurzfaser) verstärkte PUR-Systeme



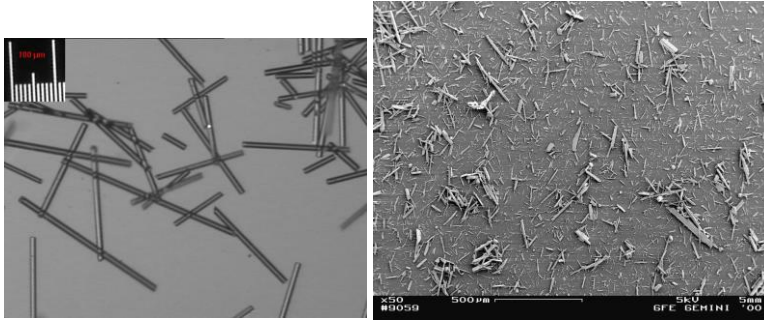
Vergleich Reaktionsspritzguss – Spritzguss Thermoplast

Typische Prozessparameter:

Reaktionsspritzguss	Spritzguss Thermoplast
Mischkammerdruck: 150 – 230 bar	Schneckenorraum 500 – 2000 bar
Injektionsdruck im Anguss: < 50 bar (2-10 bar)	500 bar
mittlerer Werkzeuginnendruck < 15 bar	250 bar
Werkzeugtemperatur RT – 60 °C	20-120°C
Rohstofftemperaturen RT – 80°C	200 – 300 °C (Schmelztemperatur)
Verstärkungsstoffe (~ 15 – 24 Gew.-% im Elastomeren)	Bis 30%, werden über die Schnecke zudosiert oder sind im Granulat dispergiert

Verstärkungsstoffe

Glasfaser MF 7980 – Tremmin 939-955



Aufgaben von Verstärkungsstoffen:

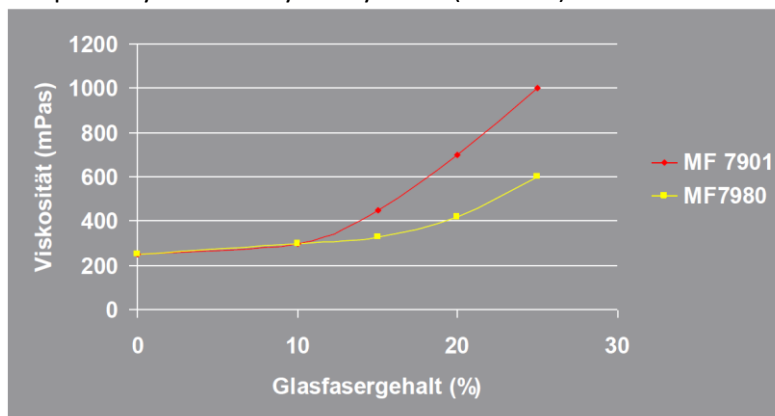
- Höhere Steifigkeit des Bauteils
- Geringerer Ausdehnungskoeffizient (Alpha-Wert)

Technische Daten:

- MF7980 (gemahlene Glasfaser): $l = 180 \mu\text{m}$, $d = 14 \mu\text{m}$, $l/d = 15$
- Tremmin (geschlagener Wollastonite-Stein): $l = 60-70 \mu\text{m}$, $d = 3 - 4 \mu\text{m}$, $l/d = 18$

Abhängigkeit der Viskosität vom Glasfasergehalt

Beispiel Polyol eines Bayflex-Systems (BMS AG)

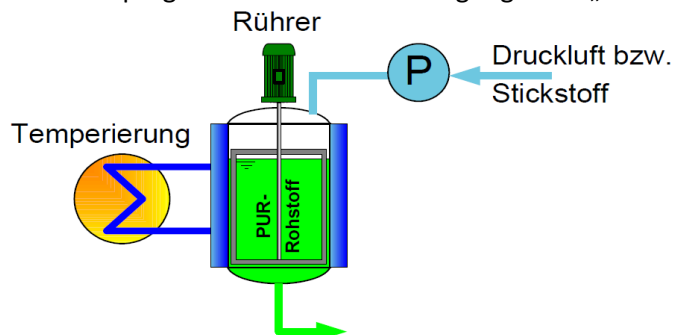


Der Nachdruck im RIM-Verfahren

Die Gasbeladung

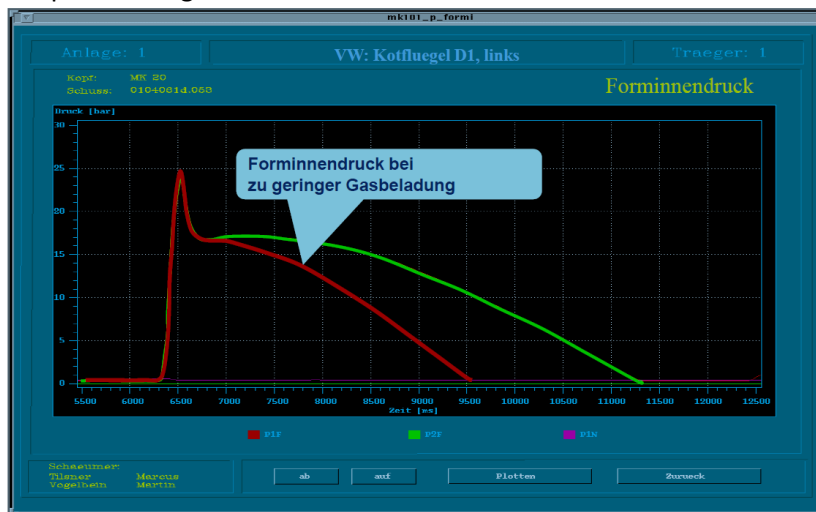
Gasdruckbeaufschlagung:

- Lösen von Gas zur Verbesserung der späteren Nukleierung
- Verhindern der Oxidation
- Verhindern von Wassereintritt
- Dispergieren von Gas zur Erzeugung eines „inneren“ Nachdrucks bei der RIM-Verarbeitung



Werkzeuginnendruckverlauf RIM-Prozess

Beispiel: Kotflügel VW-D1



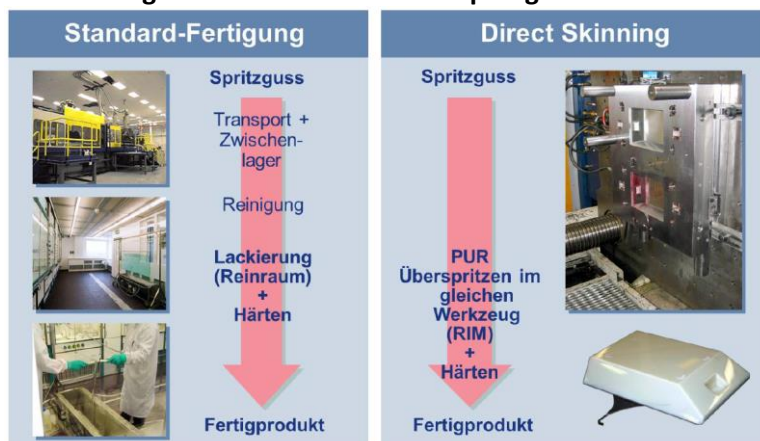
Herstellung von RIM-Formteile

Prozesskette: Nacharbeit und Lackierung



Kombi-Verfahren: Direct Skinning

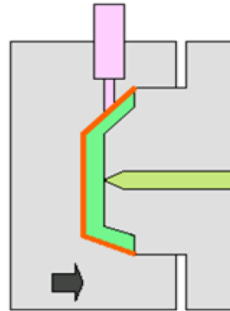
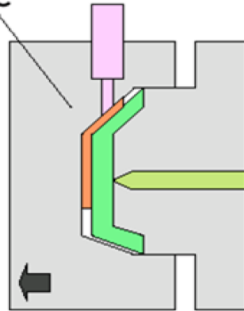
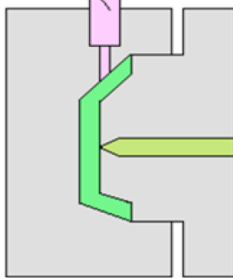
Dekorierung durch Kombination von Spritzguss und Schäumen



Einzelkavität-Verfahren

Reaktionsgemisch-
einspritzeinheit

Form-
temperatur
100° C



1. Injektion des
Thermoplasten

2. Werkzeugöffnung und
Injektion der Lackschicht

3. Schließen des
Werkzeuges und Aushärtung

Clear-RIM

PUR-Injektion in geschlossene Form

Furniere
konditionieren

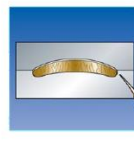
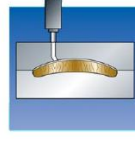
Werkzeug
eintrennen

Furnier
einlegen

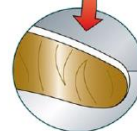


Aushärten

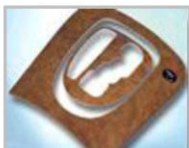
Entformen



Porenfreie, transparente
PUR-Beschichtung



Sonderverfahren

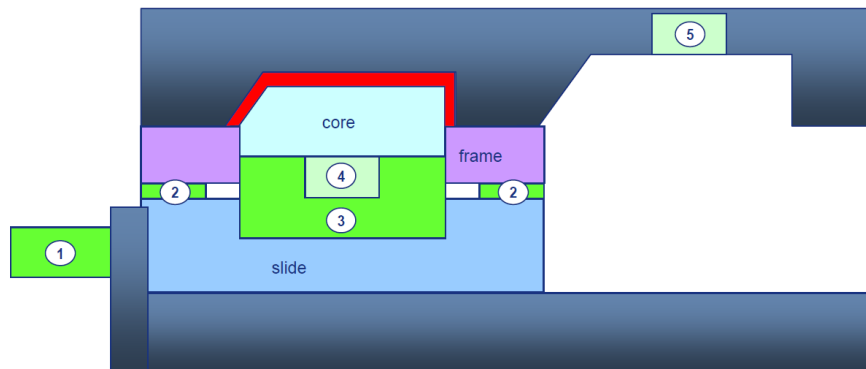


ClearRIM
Transparente Beschichtungen
auf Edelh Holz-Furnieren

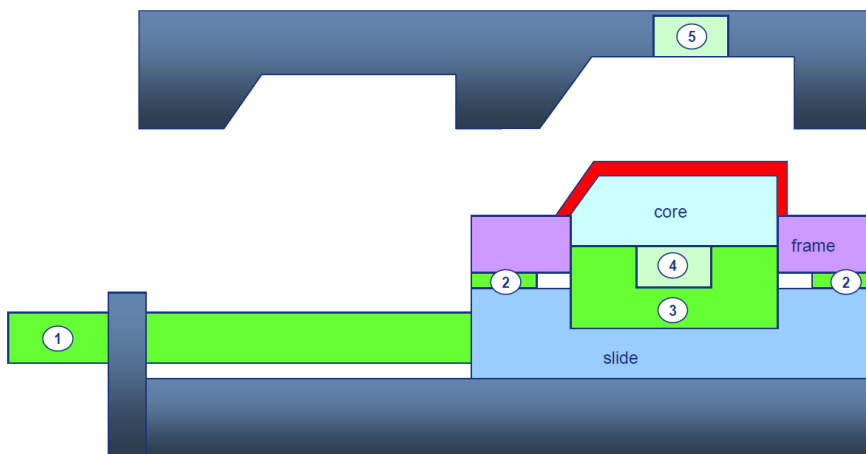


Zwei-Kavitäten Verfahren

Spritzgießen des Thermoplasten

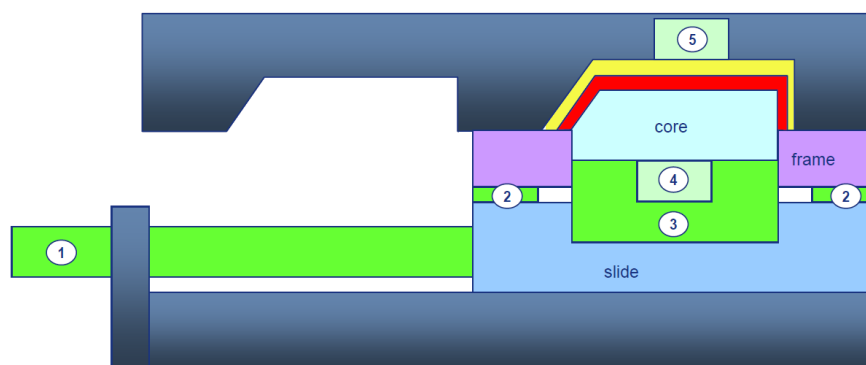


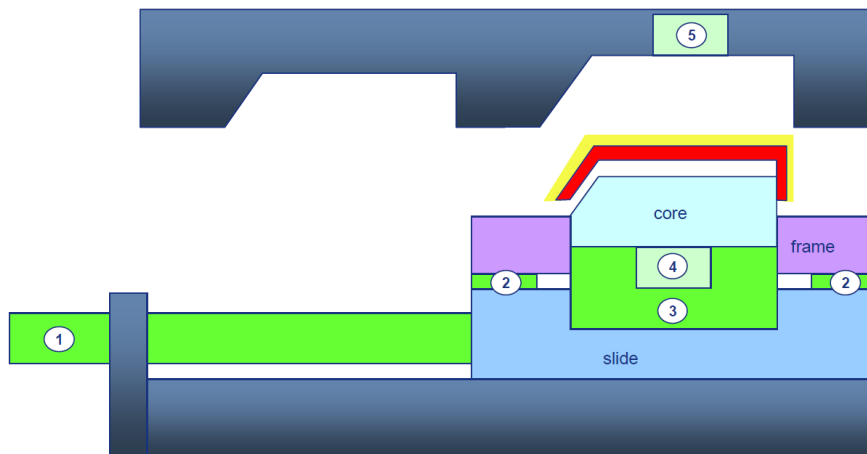
Wechsel der Werkzeugoberform



Injektion des reaktiven Polyurethan-Systems

- Einstellen der Farbschichtdicke über Werkzeugrahmen
- Aushärten des Lacks im Werkzeug





Vorteile-/Nachteile

Vorteile	Nachteile
- Durch Prozessintegration keine zusätzliche Lackierung erforderlich (Platzersparnis !) - Kein Transport zur Lackierung - Keine Oberflächenbehandlung (Reinigung, Beflämmen) - Hohe Flexibilität bei Lackschichtdicken ~ 50 – 1000 µm (kompakt) ≥ 1000 µm (kompakt) bis zu 4 - 5 mm bei geschäumten Häuten - Abbildung einer strukturierten Oberfläche möglich (Narbung) - Kein Overspray und keine Farbreste-Entsorgung - Schnelle Farbwechsel möglich - Beim Zwei-Kavitäten-Verfahren sind kurze Prozesszyklen möglich	- Nur begrenzt 3D-Strukturen - Lackschichtdicke und Lackschichtdickenverteilung bei gekrümmten Flächen - Keine Korrekturmöglichkeiten

Mögliche Anwendungen

Auto-Innenraum

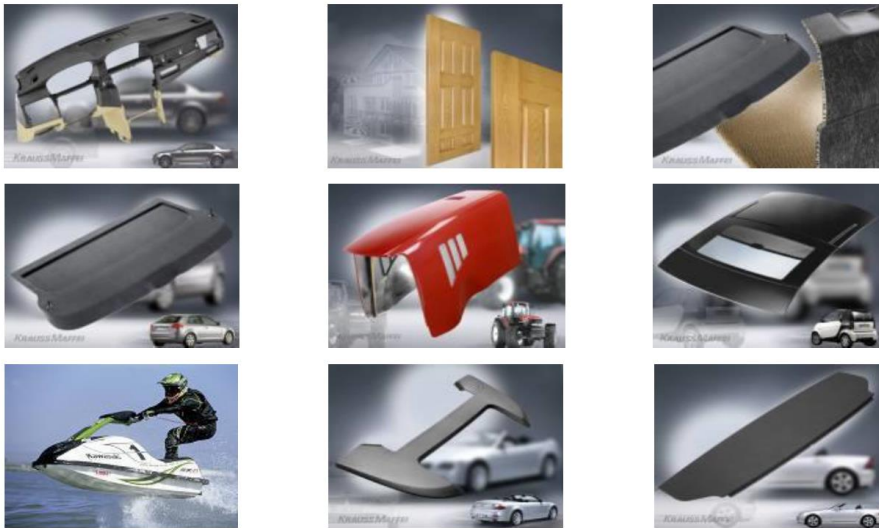
- Abdeckungen, Leisten, Handgriffe, I-Tafel, Türverkleidungen, Armlehnen etc.

Auto-Außenbereich

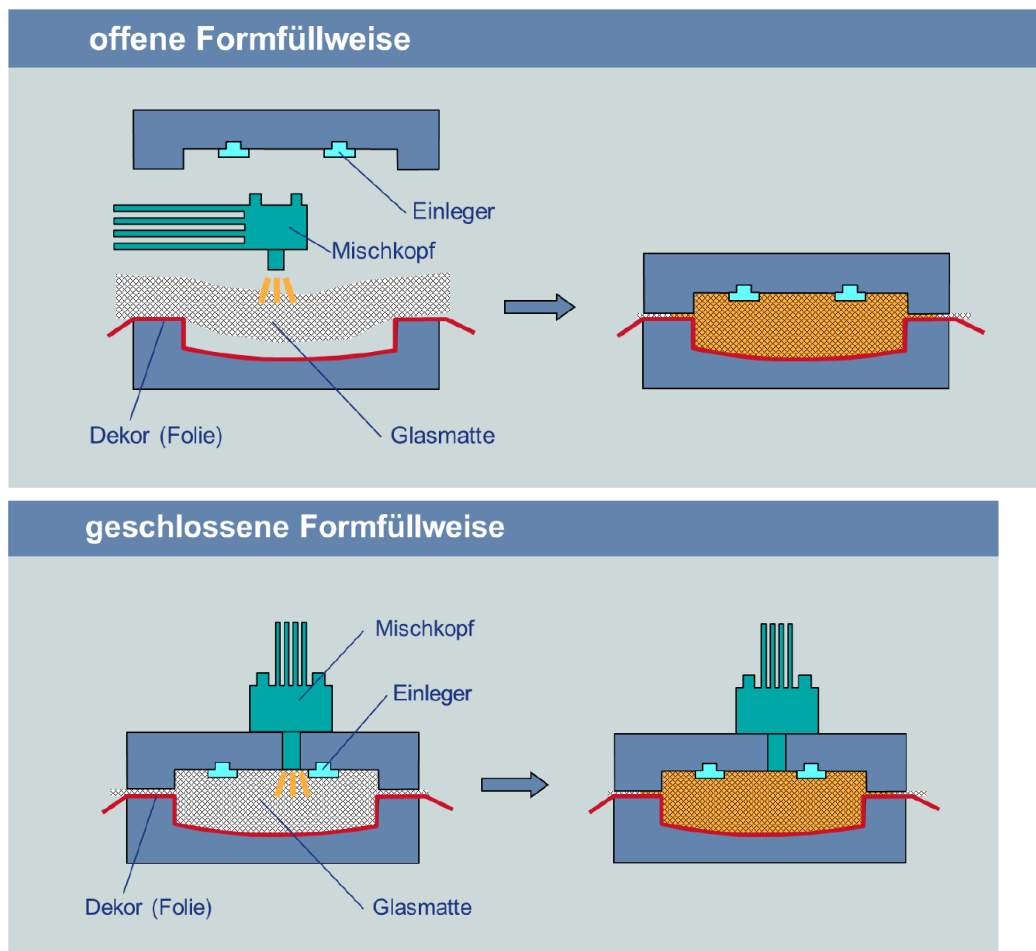
- Kotflügel, Spoiler, Spiegel etc. (als leitfähiger Primer)
- Zierleisten (clear coat noch erforderlich)
- Elektrobauteile
- Mobilfunk und Elektrokleingeräte (z.B. mit soft-feel-Lack, Rasierer etc.)

Freizeit- und Sportgeräte Griffen (soft grip)

Mit Langfasern verstärkte PUR-Formteile: Composite

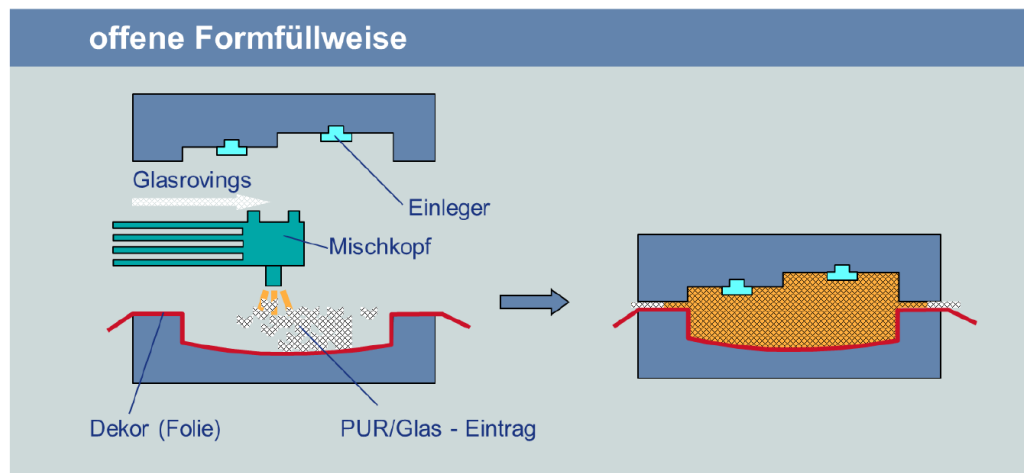


SRIM-Verfahren (Structural-Reaction Injection Molding)

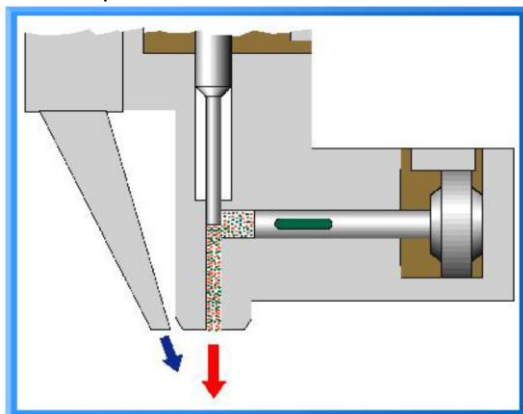


Langfaser (LGF)-PUR-Injektionsverfahren

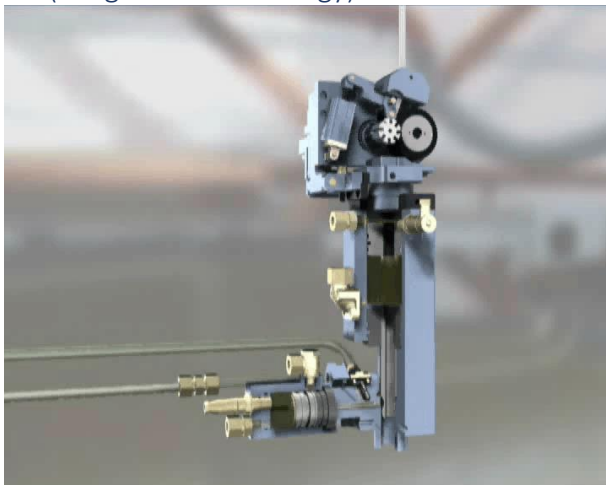
- Glasfaserrovings wird im / am Mischkopf zugeschnitten
- gleichzeitiger PUR u. GF-Eintrag
- Eintrag in offenes Werkzeug



Fasersprühverfahren mit Polyurethanen Mischkopf Bauart Hennecke

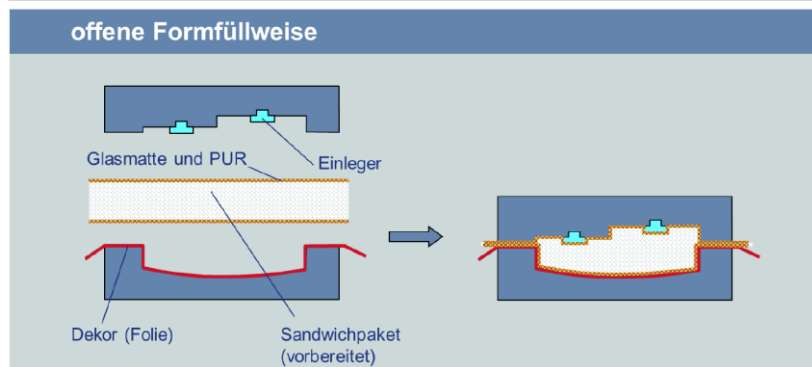
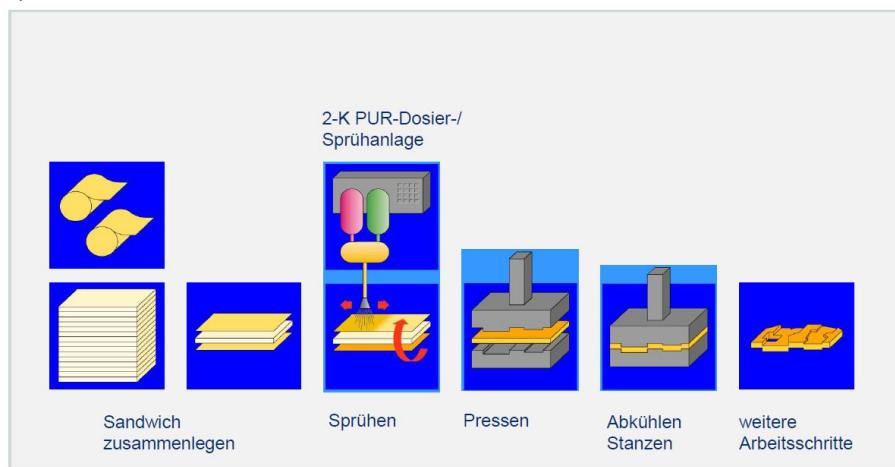


LFI (Long Fiber Technology) der Firma Kraus Maffei



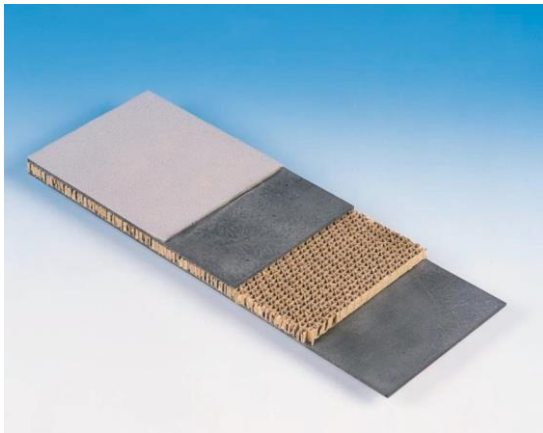


Baybreg-Sandwich Verfahren Sprüh-Press-Verfahren



Strukturbauteil in Sandwich-Konstruktion





Opel Zafira Dachmodul

Strukturbauteile mit Hochglanzfolie



Meilensteine

- Hochglanzfolie
- großflächiges Verbundbauteil
- komplexer Modulaufbau

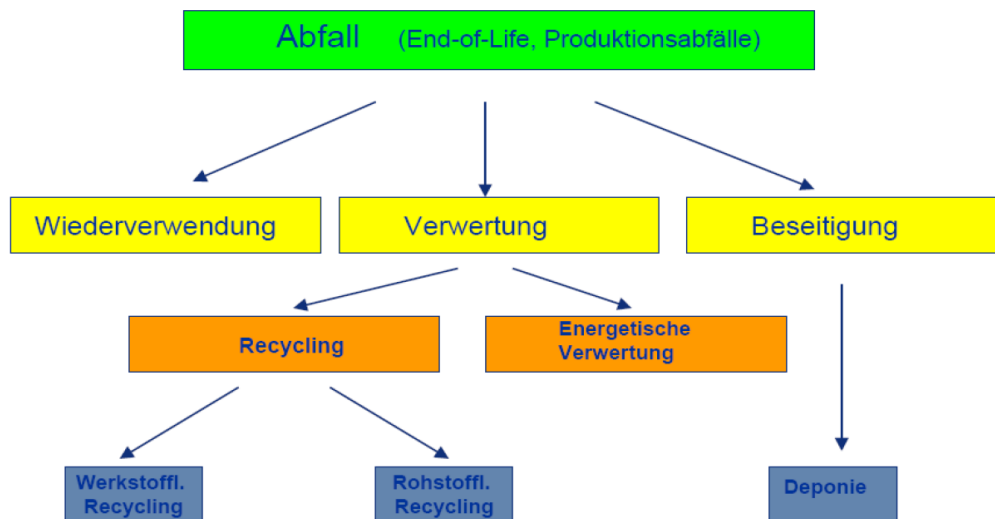
Thermoplastfolie:	PC-PC/ABS Lexan SLX (GE-Plastics)
PUR-Verfahren:	LFI-PUR® (KraussMaffei)
PUR-System:	Baydur STR

Bauteilhersteller / Quelle: Webasto

Fertigungsablauf Dachmodul



Recycling von Polyurethan

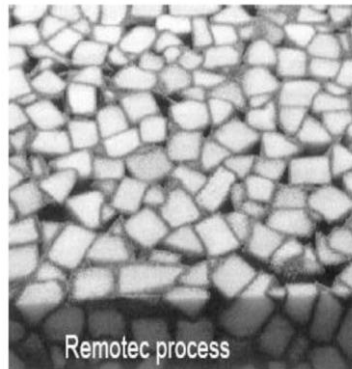
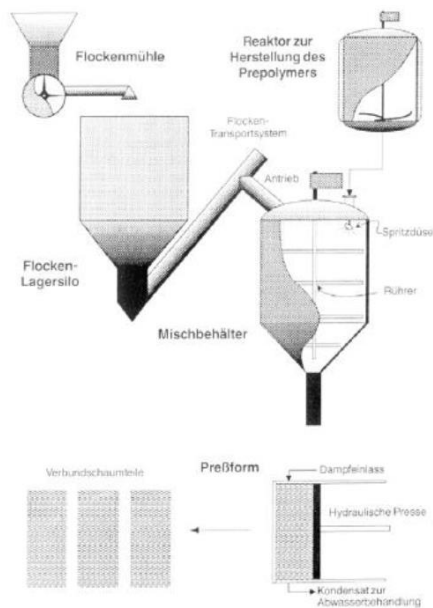


Werkstoffliches Recycling	Chemisches Recycling	Energie Gewinnung
Flockenverbund Klebpresen Partikelverbund Pulvereinarbeitung Fließpresen	Glycolyse Hydrolyse Petro-Chemisches Recycling Pyrolyse Hydrierung Gaserzeugung Reduktion	Hausmüllverbrennung Drehofen Metallurgisches Recycling Industriekraftwerk

Werkstoffliches Recycling

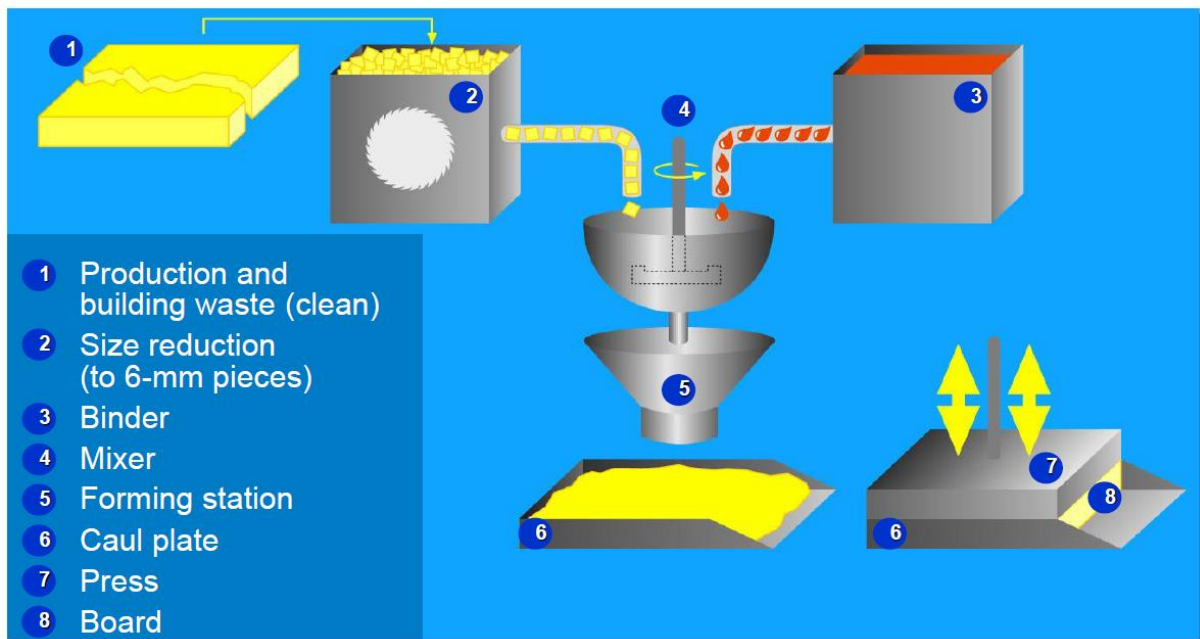
Flockenverbund

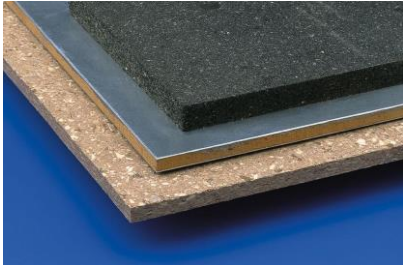
Recycling von Weichmacherschaumstoffen



Klebpresen

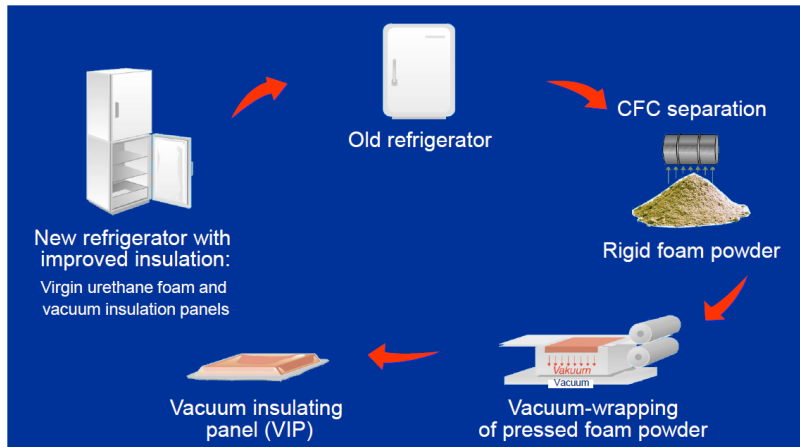
Herstellen von Platten





Partikelverbund

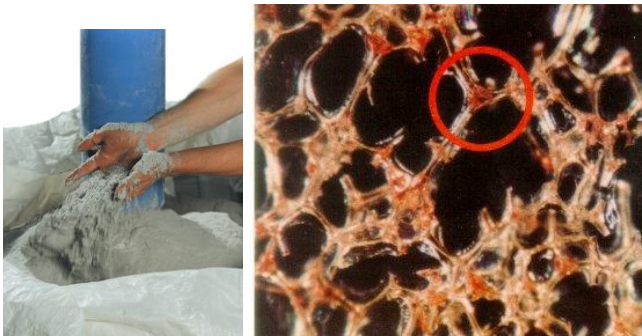
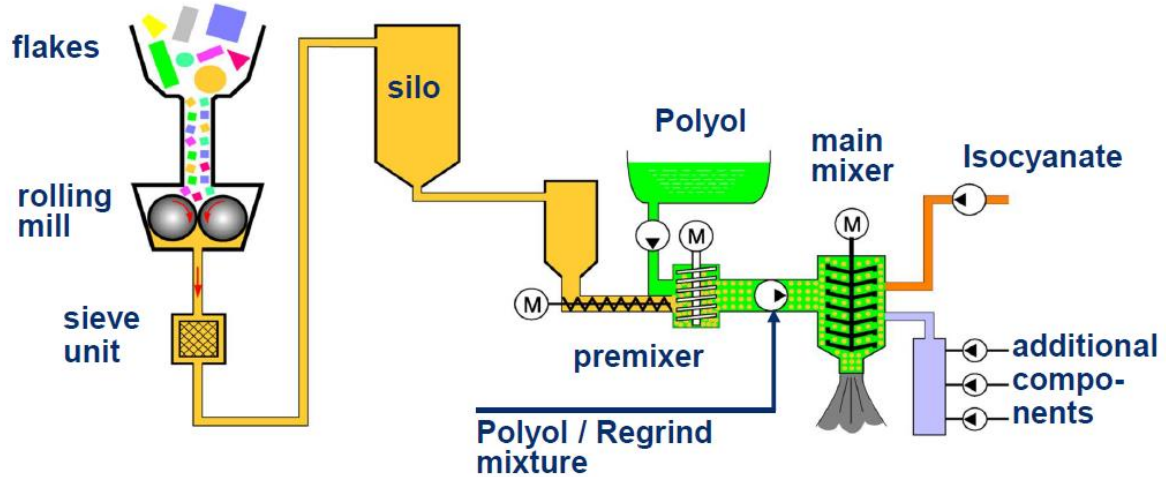
Einsatz in der Vakuum-Panel Technologie



Pulvereinarbeitung

GrindFlex:

PUR-Mahlgut und In-Line-Dosierung bei der kontinuierlichen Herstellung von Weichblockschaumstoffen



Alternativen zum werkstofflichen Recycling:

Energetische Verwertung:

- Verwertung polymerer Abfälle in Hausmüllverbrennung, Kraftwerken, ...
- Ansatz: Polymere haben hohen Heizwert (waste to fuel)
- zunächst Herstellung von Polymeren aus Erdöl, dann Nutzung, dann Nutzung des Heizwertes

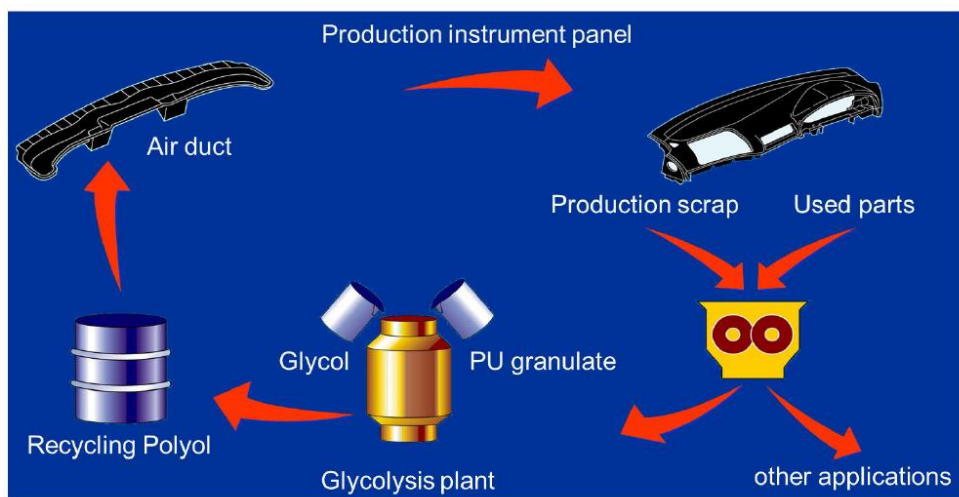
Rohstoffliches Recycling (z. B. Vergasung)

- bei hoher Temperatur wird der polymere Abfall zu Synthesegas verarbeitet
- Vorteil: gelingt für fast alle Abfallströme aus technischen Anwendungen,
- wird von den Behörden als Recycling zur Erfüllung von Quoten anerkannt
- Wirtschaftliche Lösung für heterogene Stoffstrom-Gemische wie z. B. SLF (Kunststoffe, Textilien, PUR, Coatings, Fasern, Dichtungstoffe, Bitumen, ...)

Chemisches Recycling

Glycolyse

- Herstellung von Recyclingpolyolen
- Spaltung der Urethangruppe in OH-Gruppen enthaltenden Verbindungen durch Umesterung mit zwei-wertigen Alkohole (Glykole)
- Durch verschiedene Nebenreaktionen entstehen keine „reinen“ Polyole



Zusammenfassung/Übung 5.

- Die wesentlichen Komponenten einer Polyurethan-Verarbeitungsanlage sind: Arbeitsbehälter, Förderpumpen und der Mischkopf. Man unterscheidet zwischen der Hochdruck- und der Niederdrucktechnologie.
- Anforderungen an einen Mischkopf sind eine intensive Vermischung und ein möglichst laminarer Austrag. Verstärkungsfasern, Füllstoffe und Luft können im Mischkopf zudosiert werden.
- Polyurethan-Produktionsanlagen arbeiten kontinuierlich oder diskontinuierlich. Tanklager, Werkzeugträger, Vorrichtungen zum Transport und zur Weiterverarbeitung sind integraler Bestandteil eines Produktionsbereiches.
- Produktionsanlagen werden in der Regel auf das zu fertigende Produkt zugeschnitten (Sondermaschinenbau)
- Zum Recycling von Polyurethane existieren unterschiedlichste, an die jeweiligen Rohstoffe angepasste Verfahren.

Vergleich Reaktionsspritzguss – Spritzguss Thermoplast

Typische Prozessparameter:

Reaktionsspritzguss

- Mischkammerdruck: 150 – 230 bar
- Injektionsdruck im Anguss: < 50 bar (2-10 bar)
- mittlerer Werkzeuginnendruck < 15 bar
- Werkzeugtemperatur RT – 60 °C
- Rohstofftemperaturen RT – 80°C
- Verstärkungsstoffe (~ 15 – 24 Gew.-% im Elastomeren) werden in einem Ansatzbehälter ins Polyol eingearbeitet

Thermoplast-Spritzguss:

- Schneckenorraum 500 – 2000 bar
- 500 bar
- 250 bar
- 20-120°C
- 200 – 300 °C (Schmelztemperatur)
- Bis 30%, werden über die Schnecke zudosiert oder sind im Granulat dispergiert

Direct-Skinning – Vorteile <-> Nachteile

- Durch Prozessintegration keine zusätzliche Lackierung erforderlich (Platzersparnis !)
- Kein Transport zur Lackierung
- Keine Oberflächenbehandlung (Reinigung, Beflämmen)
- Hohe Flexibilität bei Lackschichtdicken
 - ~ 50 – 1000 µm (kompakt)
 - ≥ 1000 µm (kompakt)
 - bis zu 4 - 5 mm bei geschäumten Häuten
- Abbildung einer strukturierten Oberfläche möglich (Narbung)
- Kein Overspray und keine Farbreste-Entsorgung
- Schnelle Farbwechsel möglich
- Beim Zwei-Kavitäten-Verfahren sind kurze Prozesszyklen möglich

Nachteile ?

- Nur begrenzt 3D-Strukturen
- Lackschichtdicke und Lackschichtdickenverteilung bei gekrümmten Flächen
- Keine Korrekturmöglichkeiten

6. Schäumen von Kunststoffen

Lernziele:

- Exkurs: Herstellung thermoplastischer Schäume
- Charakterisierung und Beschreibung der PUR-Schaumbildung
- Sonderverfahren: Hochleistungsschaumstoffe

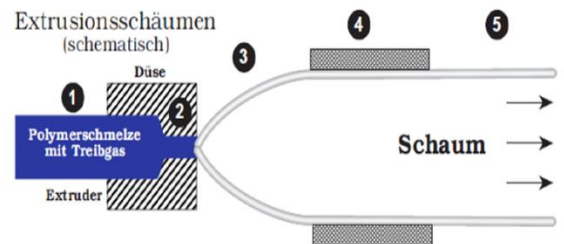
Exkurs: Herstellung thermoplastischer Schäume

Verfahrensvarianten

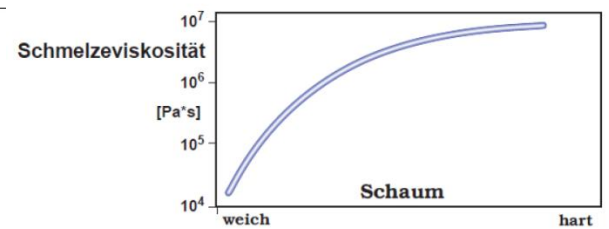
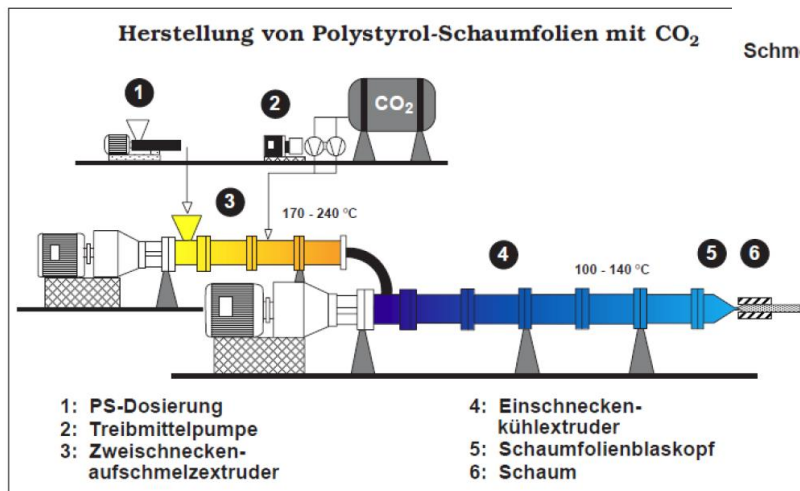
- Extrusionsschäumen
- Thermoplastschaum-Spritzgießen
- Partikelschäume (EPS, EPP)

Extrusionsschäumen

1. Extruder
2. Werkzeug und Düse
3. Expansion der Schmelze
4. Kalibrierung
5. Abzug des Schauprofils



Tandem-Extrusionsanlage

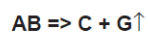


Treibmittel

physikalisch

- CO₂, N₂
- Butan, Pentan
- (FCKW, HFCKW)

chemisch



- Wasser
(-NCO + H₂O $\Rightarrow$ CO₂ $\uparrow$)
- Carbonsäuren
(-NCO + R - COOH $\Rightarrow$ CO₂ $\uparrow$)
- organisch: Azo, Diazo....

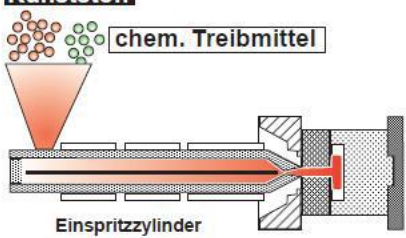
Schäumen	Treibmittel
vor:	bei geringem Druck in der Schmelze eine einphasige Lösung bilden
während:	schnell an Keimen Blasen bilden und in die Zellen nachdiffundieren
nach:	schnell aus den Schaumlamellen und Stegen herausdiffundieren und - als Gas in den Zellen verbleiben $\Rightarrow$ Wärmeisolation (FCKW) oder - schnell herausdiffundieren $\Rightarrow$ Brandschutz (n-Pentan)

Thermoplastschaum-Spritzgießen

TSG = Thermoplastschaum-Spritzgießen

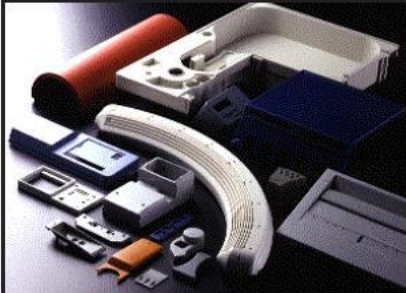
Kunststoff Dichte > 100 g/l

chem. Treibmittel



Einspritzzylinder

- hohe Einspritzgeschwindigkeit (Gasdruckspeicher)
- praktisch ohne Nachdruck
- kurze Fließwege



Mehrkomponenten-Spritzgießen

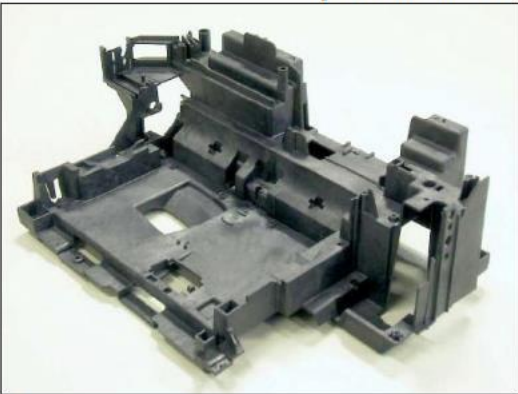
kompakte Haut	- geschäumter Kern
außen hart	- innen weich
außen verstärkt	- innen unverstärkt
außen unverstärkt	- innen verstärkt
außen leitfähig	- innen isolierend
außen Neuware	- innen Recycling

Haut

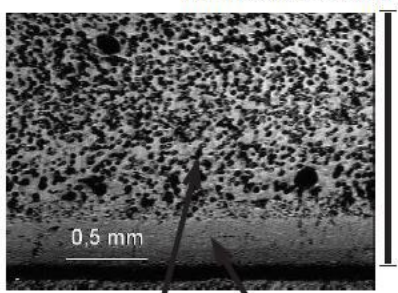
Kern

Strukturschaum-Bauteil

printer chassis of PPO



wall thickness 2.5 mm



0.5 mm

foamed core compact surface

advantage:

- weight reduction 8 %
- reduced clamping force from 4200 kN to 2500 kN
- reduced shrinkage 50 %
- shorter cycle time 25 %

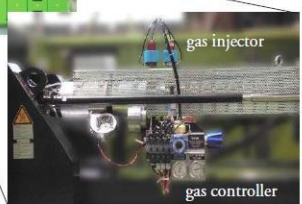
MuCell Technology

Engel ES3550/600 HL MuCell



MuCell Technology
 MuCell Injection Molding Unit
 MuCell Gas Injection Unit
 MuCell Software

TRAXEL INC.



gas injector

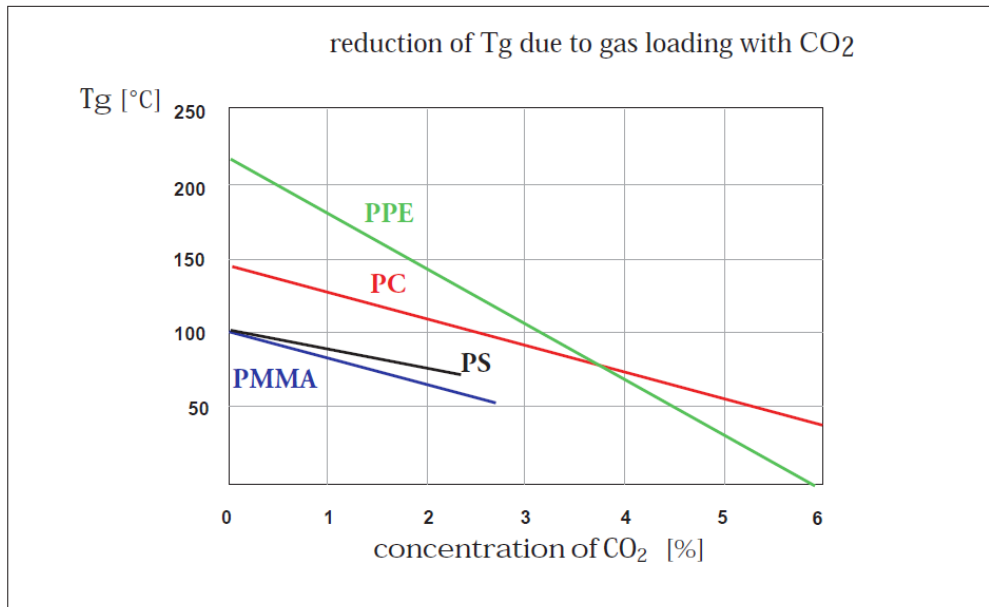
gas controller

advantage:

- weight reduction 60 %
- reduced locking force 40 %
- reduced processing temp. 80 °C
- reduced injection pressure 50 %
- shorter cycle time

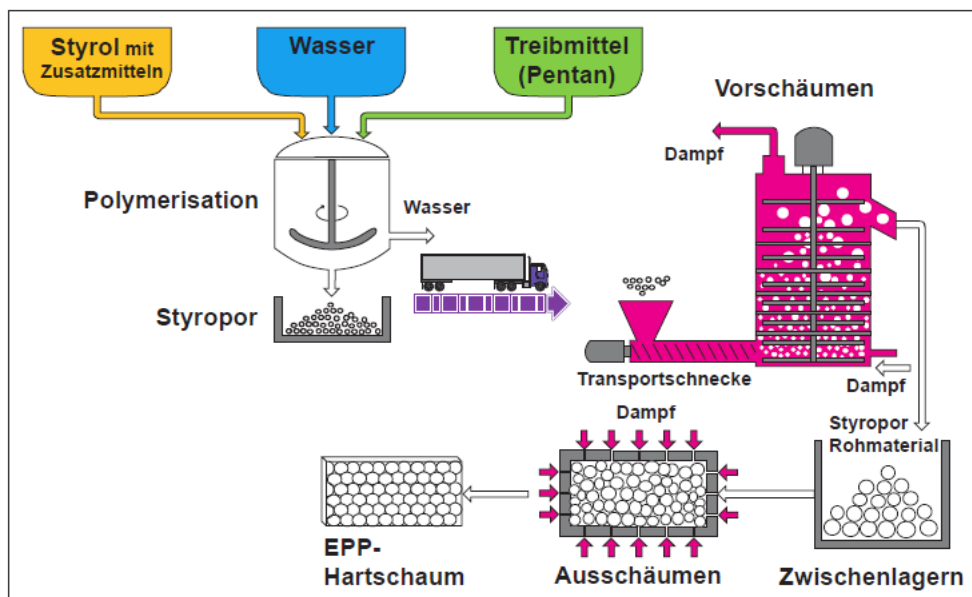
Schaumspritzgießen mit CO_2

Polymer Journal, Vol 22, No. 1, p 77-79 (1990)



Partikelschäume (EPS, EPP)

EPS-Herstellung



EPS-Produktbeispiele



[www.verpackung24.com]



[www.energiesparhaus.info]



[www.cnc-step.de]



[www.1-2-do.com]

EPS-Recycling

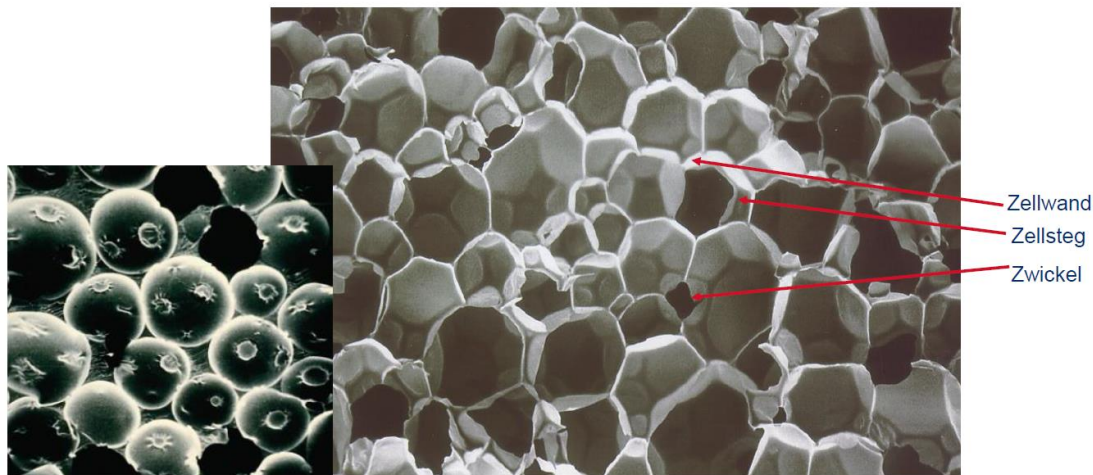


Charakterisierung und Beschreibung der PUR-Schaumbildung

Phänomenologie

Schaumstoffe sind leicht

Werkstoffe, die bis zu 98 bis 99% aus Luft oder - bei geschlossenzelligen Schaumstoffen – aus gasförmigen Treibmitteln und zu weniger als 5% aus massiven Zellstegen und -wänden bestehen.

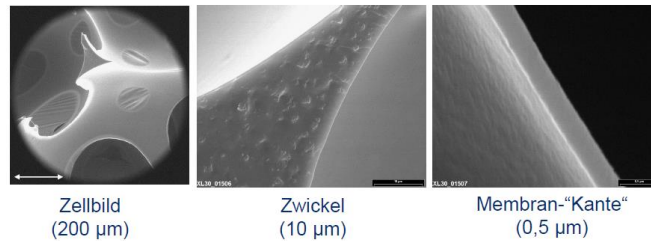


Schaum-Morphologie

Größenskalen

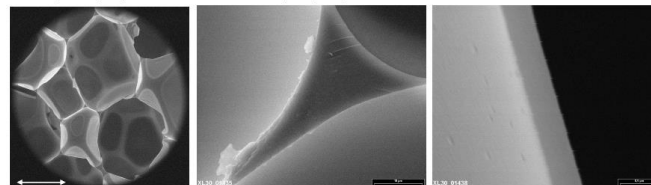
Weichblockschaum

HR-Schaumstoff
Dichte 45 kg/m³



Hartschaum

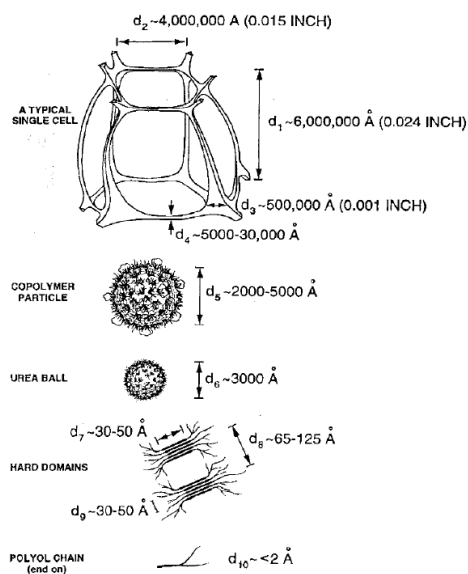
Blockschaumstoff
Dichte 40 kg/m³



Polymerstrukturen

in PUR Schäumen:

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$$



Größenordnungen

Weichschaum: **Zelle**

$$\varnothing \sim 5.000.000 \text{ \AA} = 5 - 0,5$$

$$\text{mm} = 5.000 - 500 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\text{Hartschaum: } \sim 100 \text{ }\mu\text{m}$$

Steg/Zwickel: ~

$$500.000 - 25.000 \text{ \AA} = 0,05 /$$

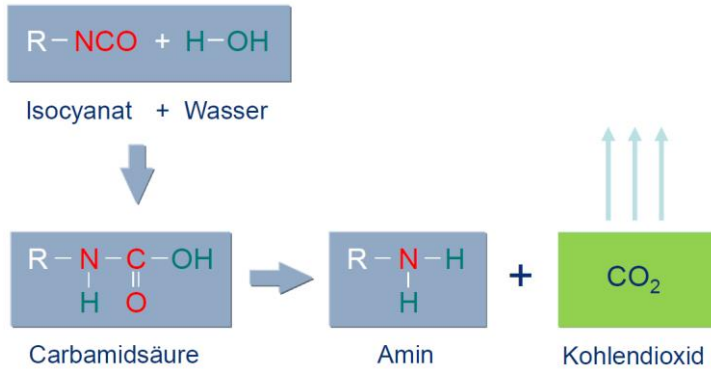
$$0,0025 \text{ mm} = 50 / 2,5 \text{ }\mu\text{m}$$

Polymerstrukturen:

z.B. **Domäne**

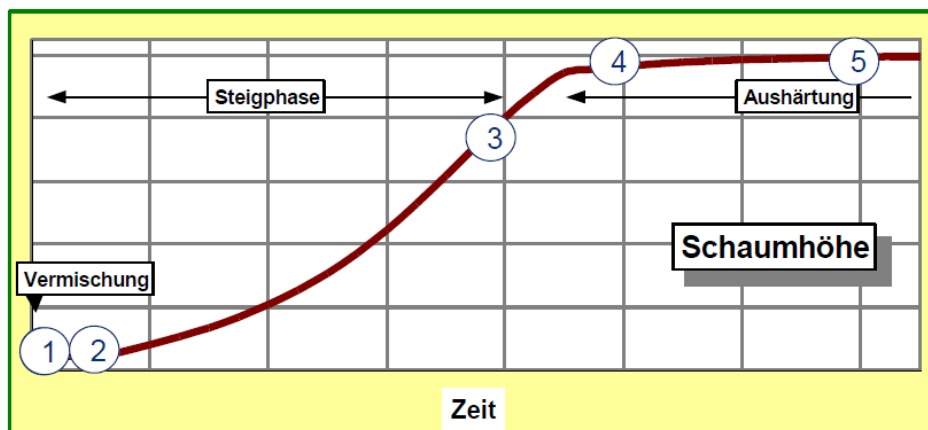
$$\sim 50 \text{ \AA} = 0,005 \text{ }\mu\text{m} = 5 \text{ nm}$$

Die chemische Treibreaktion

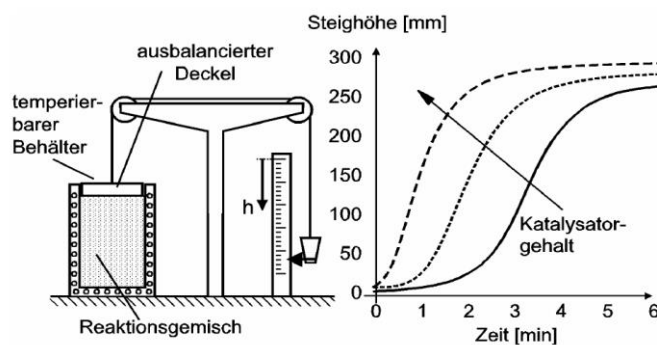


Phänomenologische Charakterisierung

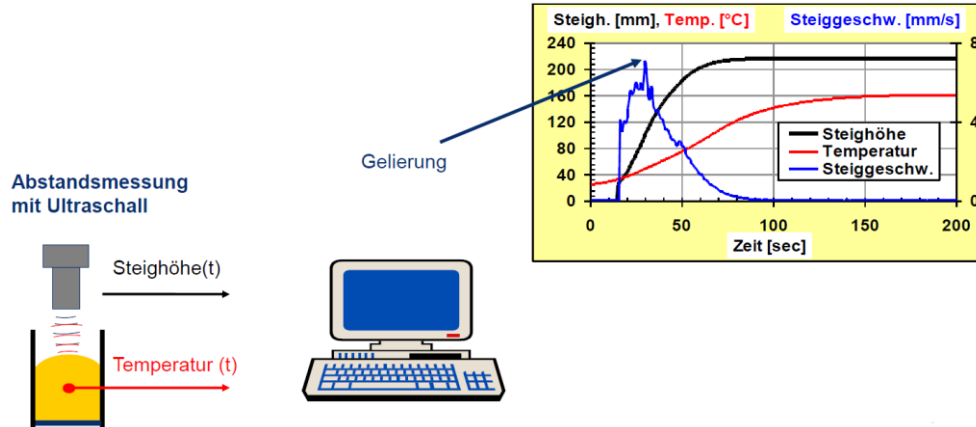
- (1) Mischzeit: Zeit innerhalb die Reaktionspartner gemischt werden
- (2) Startzeit: Zeitdifferenz von Beginn des Mischens bis zur optisch wahrnehmbaren Veränderung des noch flüssigen Gemisches (Volumenzunahme, transparent > opak)
- (3) Abbindezeit (Gelzeit): Zeit von Beginn des Mischens bis zu Zustand der ersten Verfestigung (Test mit Schaschlik-Spieß)
- (4) Steigzeit („Nachdruckzeit“): Zeit von Beginn des Vermischens bis zum Erreichen der vollen Schaumhöhe
- (5) Klebfreizeit: Zeit von Beginn des Vermischens bis Erreichen einer klebfreien Oberfläche (Bierdeckeltest)



Die ersten Geräte



Das Steigverhalten charakterisiert die Schaumbildung



Analyse der Schäumkinetik und des Fließverhaltens

Foamat-Messsystem der Fa. Format:



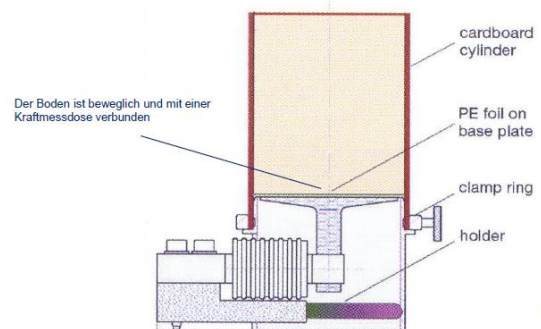
Sensoren:

- | | |
|-----------------|--|
| Foamat FPM 2: | Ø = 100 mm, ohne dielekt. Sensor, 100N-Kraftaufnehmer |
| Foamat FPM 150: | Ø = 150 mm, mit dielekt. Sensor + Heizung, 100N-Kraftaufnehmer |
| Foamat FPM 150: | Ø = 150 mm, mit dielekt. Sensor + Heizung, 500N-Kraftaufnehmer |

Messgrößen:

- Steighöhe (Ultraschall)
- Druck (im Boden)
- Dielekt. Polarisierung (im Boden)
- Temperatur (wir empfehlen separate Messung)

Druckmesseinheit:



Abschätzung der freien Rohdichte

Annahme: ideales Gas-Verhalten

$$p \cdot V = \text{Konstante} \cdot N \cdot T$$

p = Gasdruck (bei Freischaum Innendruck = Luftdruck)
 V = Gas-Volumen
 N = Zahl der Gasmoleküle in mol
 T = Temperatur in Kelvin ! (273 K = 0°C, 373 K = 100°C)

1 mol ideale Gasmoleküle = 22,4 Liter Volumen bei 22°C

Dies entspricht 44 g CO₂ = 18 g Wasser im Reaktionssystem

Beispiel: Freie Rohdichte

Berechnung für 1 kg Modellsystem

Rezepturvorgaben:

- 2,25% Wassergehalt = 22,5 g Wasser / kg Polyolformulierung
- Mengenverhältnis Polyol : Isocyanat = 100:50

- Dichte Polyol = 1,03 g/cm³; Dichte Isocyanat = 1,2 g/cm³
- Reaktionstemperatur 70 °C

Schätzen Sie die freie Rohdichte des Schaums (bei vollständiger Umsetzung des Wassergehalts)

Berechnung:

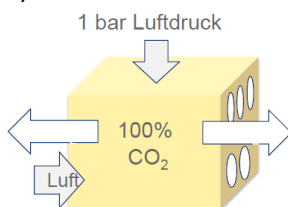
- 22,5 g Wasser in 1,5 kg System
- >> 15 g Wasser / kg System
- = 0,83 mol CO₂ / kg System (15 g / 18 g pro mol)
- >> 0,83 mol CO₂ bei 70°C = 21,7 Liter (ideales Gas: T/V = konst.)
- 1000 g / (21,7 l Gas + 0,924 l Polymer) = 44,2 g/l

In der Praxis findet man häufig höhere Dichten z.B. Maschinenschaum: 48 g/l

Gründe: Ausbeuteverluste, Schrumpf, Kollaps, Abblasen von Wasser

Warum schrumpft Schaumstoff?

1) CO₂ diffundiert 10-mal schneller als Luft = Unterdruck im Schaumstoff



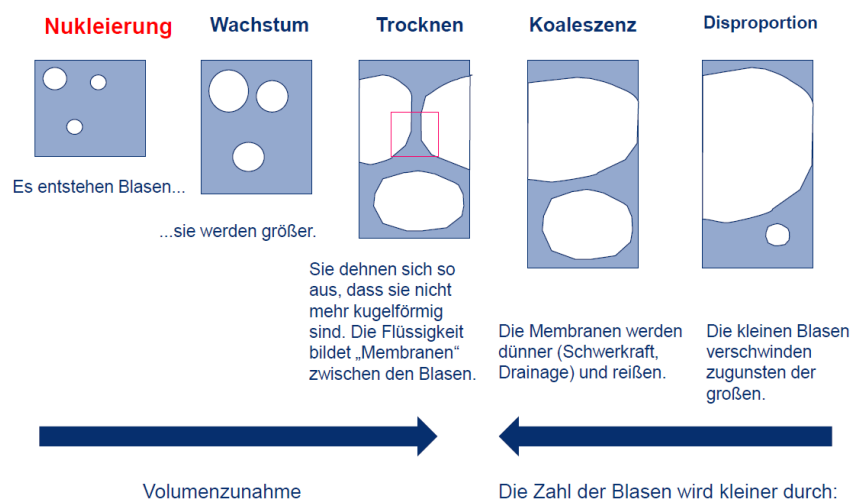
2) Thermische Abkühlung

3) Abblasen von Wasserdampf und Treibgas beim Öffnen des Schaums

4) Kollaps der Schaumzellen

Physik der Schaumbildung (Modelle)

Das „Leben“ der Schaum-Blase: Nukleierung



Klassische Nukleierungstheorie (homogen)

Thermodynamik:

Blasenbildung ist Folge von *Dichtefluktuationen* in der Flüssigkeit

Gedankenexperiment zur Blasenbildung:

Klassische *Gleichgewichtsthermodynamik*

1. Schritt: Bildung eines gasfreien Hohlraums → Aufwendung von Oberflächenenergie

2. Schritt: Transfer von Gas i.d. Hohlraum → Gewinn an Volumenenergie

Energie-Bilanz:

Gibbs'sche Freie Energie:

$$\Delta G = 4\pi r^2 \cdot \gamma - \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \Delta P$$

γ = Oberflächenspannung

r = Keimradius

ΔP = Übersättigung

$G < 0$: exergone Reaktion, die unter den gegebenen Bedingungen (Konzentrationen) freiwillig abläuft;

$G = 0$: Gleichgewichtssituation, Hin- und Rückreaktion laufen in gleichem Maße ab.

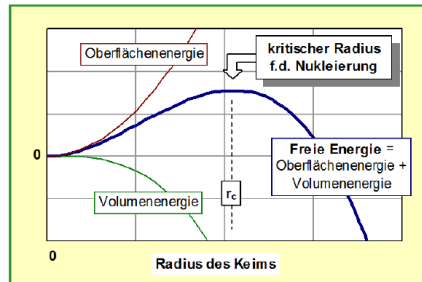
$G > 0$: endergone Reaktion, deren Ablauf in der angegebenen Richtung Energiezufuhr erfordern würde

$$\Delta G = 4\pi r^2 \cdot \gamma - \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \Delta P$$

γ = Oberflächenspannung

r = Keimradius

ΔP = Übersättigung



Für beliebige Oberflächenspannung und Übersättigung

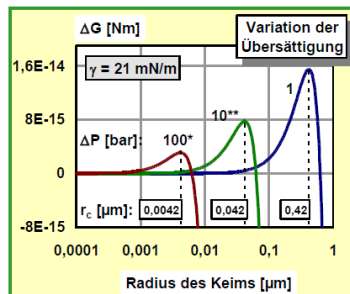
Bestimmung des kritischen Keimradius:

$$\partial \Delta G / \partial r = 8 \pi r_c \gamma - 4 \pi r_c^2 \Delta P = 0 \leftrightarrow r_c = 2 \gamma / \Delta P$$

siehe auch Gleichung von Laplace und Young

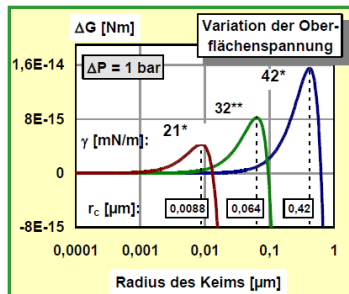
Betrachtungen zum kritischen Keimradius

$$r_c = 2 \gamma / \Delta P$$



* ΔG -Werte -2000 ** ΔG -Werte -50

Mit zunehmender Übersättigung (Drucksprung) nimmt der Keimradius ab >> feinere Schaumzellen



* ΔG -Werte -300 ** ΔG -Werte -15

Mit abnehmender Oberflächenspannung nimmt der Keimradius ab >> feinere Schaumzellen.
Beobachtungen in der Praxis:
Zugabe von Tensiden verbessert Schaumbildung

Nukleierungsrate N_{hom} nach Colton u. Suh:

Wahrscheinlichkeitsbetrachtung für das Überqueren der Energiebarriere

$$N_{hom} = f_0 \cdot N_g \cdot e^{-\frac{\Delta G_{hom}^*}{R \cdot T}}$$

$$\Delta G_{hom}^* = \frac{16 \cdot \pi \cdot \gamma_s^3}{3 \cdot \Delta p^2}$$

f_0 : Frequenz der Anlagerung von Gasmolekülen an Keimen
 N_g : Gesamtzahl der Gasmoleküle in Lösung
 ΔG_{hom}^* : Nukleierungsenergie zur Bildung eines Keims mit kritischen Radius

Schlussfolgerungen für die Schaumbildung:

Hohe Nukleierungsraten durch:

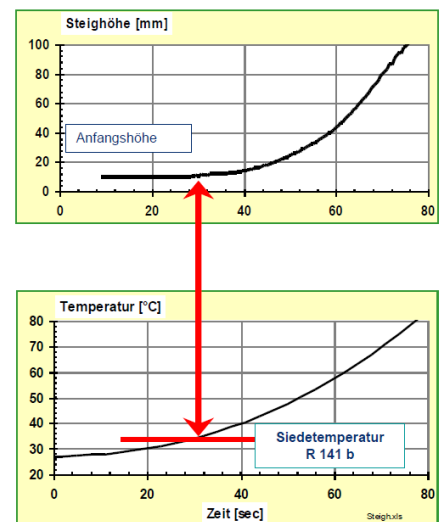
- Große Anzahl an gelösten Gasmolekülen
- Starke Übersättigung
 - Druckentspannung/Gasfreisetzung: $\Delta P \gg 1$ bar (typisch 10 ... 1000 bar)
 - Überhitzung/Treibmittelverdampfung: $\Delta T = T - T_{siede} \gg 0$ (typisch 100°C)

Folge aus der klassischen Nukleierungstheorie: Übersättigung bei der Polyurethan-Schaumentstehung

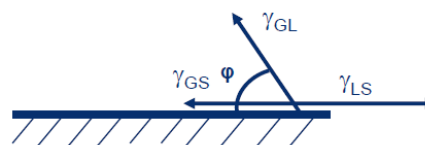
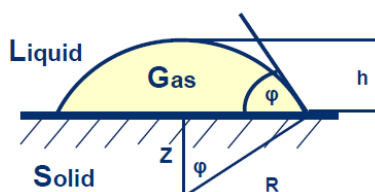
Messung

- Aufschäumverhalten eines physikalisch mit R 141b getriebenen Hartschaumsystems
- Schäumbeginn unmittelbar nach Überschreiten der Siedetemperatur (d.h. keine Übersättigung)
 - ➔ Übersättigung spielt bei reaktiven Schaumsystemen nur eine untergeordnete Rolle!
 - ➔ Übersättigung spielt eine wesentliche Rolle bei der Herstellung von Thermoplastschäumen (Druckentspannung beim Einspritzen ins Werkzeug)

Steighöhe und Temperatur (im Schaum)



Klassische Nukleierungstheorie (heterogen)



Gleichung nach Young:

$$\gamma_{LS} = \gamma_{GS} + \gamma_{GL} \cos \varphi$$

$$\gamma_{GL} = \gamma$$

Gibb'sche Frei Energie:

(nach Colton u. Suh, 1987)

$$\Delta G_{het} = \gamma_{GL} O_{GL} + \gamma_{GS} O_{GS} - \gamma_{LS} O_{LS} - V_G \Delta P$$

Nach einigen Umformungen:

$$\Delta G_{het} = (4 \pi R^2 \gamma - 4/3 \pi R^3 \Delta P) f(\varphi) = \Delta G_{hom} f(\varphi)$$

$$\text{mit } f(\varphi) = \frac{1}{4} (2 + \cos \varphi) (1 - \cos \varphi)^2 \quad \text{z.B. } \varphi = 20^\circ \gg f(\varphi) = 0,002; f(\varphi) \leq 1$$

Gibb'sche Freie Energie:

$$\Delta G_{\text{het}} = (4 \pi R^2 \gamma - 4/3 \pi R^3 \Delta P) f(\varphi) = \Delta G_{\text{het}} f(\varphi)$$

Für den kritischen Keimradius gilt:

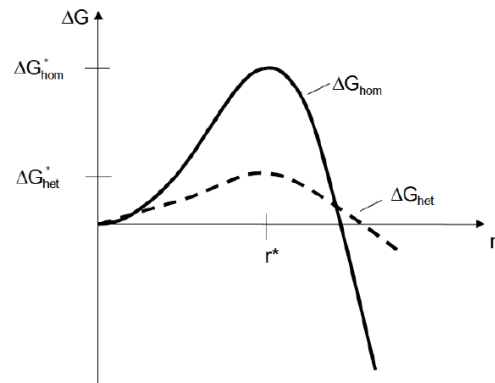
$$\partial \Delta G / \partial R = 0 \rightarrow R_{C, \text{het}} = 2 \gamma / \Delta P$$

$$\Delta G_{\text{het}, R_C} = (16 \pi \gamma^3 / 3 \Delta P^2) f(\varphi) \text{ mit } f(\varphi) < 1$$

Die Energiebarriere zur Bildung eines stabilen Keims ist bei der heterogenen Keimbildung deutlich geringer

Schlussfolgerung:

- Der Einsatz von Nukleierungshilfsmitteln (z.B. Füllstoffe) unterstützt die Keimbildung (ist in der PUR-Verarbeitung unüblich).



Keimbildung

Thermoplastische Schäume

Colton, Suh; Polym.Eng.Sci. 28 (1988)

KEIMBILDUNG

homogen
thermisch induzierte Dichteschwankungen

heterogen
grenzflächenkontrolliert

Ca-Stearat Konzentration	Keimbildungs- mechanismus	N ₂ Druck vor Entspannung	Keimdichte 10 ⁶ pro cm ³
0	homogen	35 bar	3
		70 bar	30
0,1 - 0,25%	homogen	35 bar	150
		70 bar	1.000
0,8%	heterogen	> 35 bar	100
3,3%	heterogen	> 35 bar	50.000

Beispiel: Extrusion-Schäumen von PS bei 110 °C Schmelzetemperatur

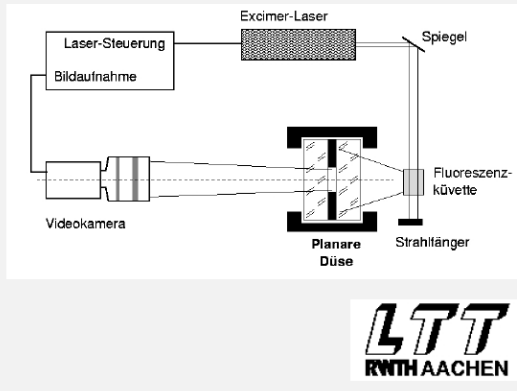
Strömungskavitation

Durchströmte Düsen

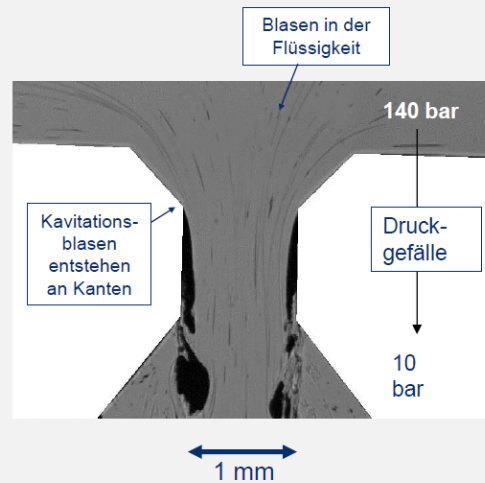
K. Lucas, H.-J. Koß, O. Genge (Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, RWTH Aachen):

Fluoreszenzpuls - Videotechnik zur Analyse von Düsenströmungen

PRINZIP:



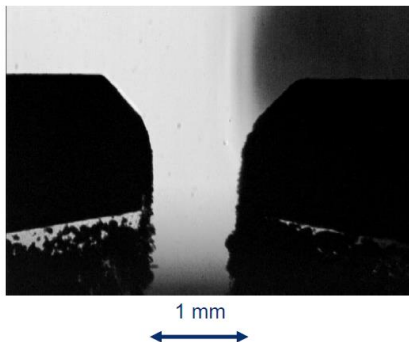
STRÖMUNGSKAVITATION in Mesamoll in durchströmten Düsen:



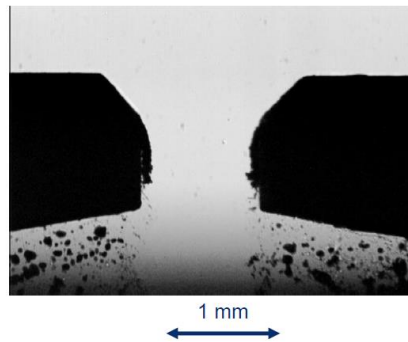
Blasenbildung durch Kavitation (Polyol-Modellfluid):

Entspannung

50 bar → 5 bar



50 bar → 10 bar

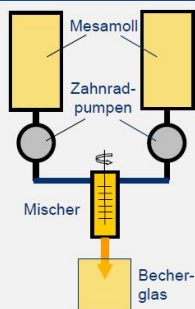


Polyurethan-Schaumentstehung

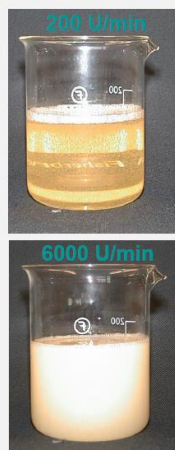
Kavitation

Modellversuch:

- Niederdruckvermischung von zwei Mesamoll-Strömen (Modell für Polyol) mit Stachelmischer
- Mesamoll: luftgesättigt bei Atmosphärendruck

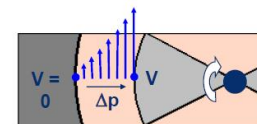


Produkt 1 min nach Austrag:



Formale Anwendung der Bernoulli - Gleichung:

$$2 \cdot p_1 + \rho \cdot v_1^2 = 2 \cdot p_2 + \rho \cdot v_2^2$$



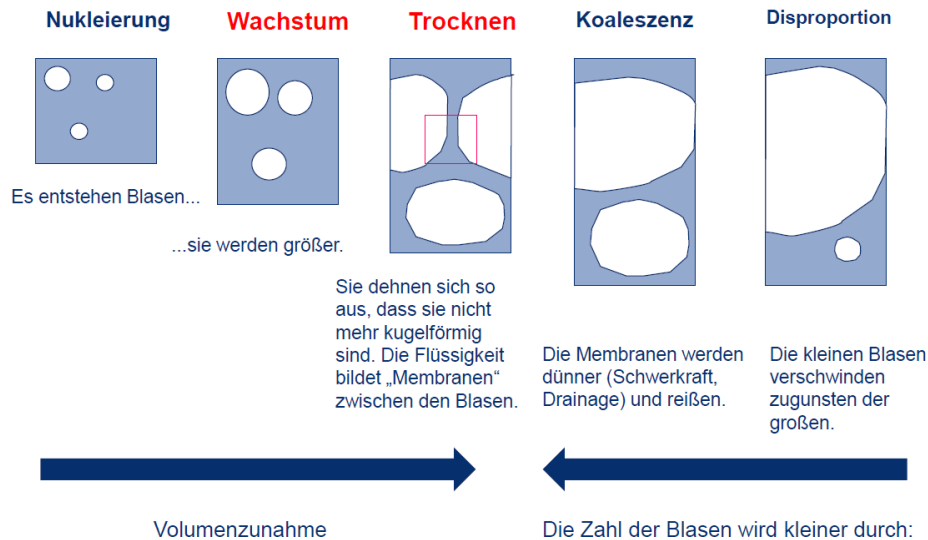
$$\Delta p \approx \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

$$U = 200 \text{ U/min} \rightarrow \Delta p \approx -90 \text{ mbar}$$

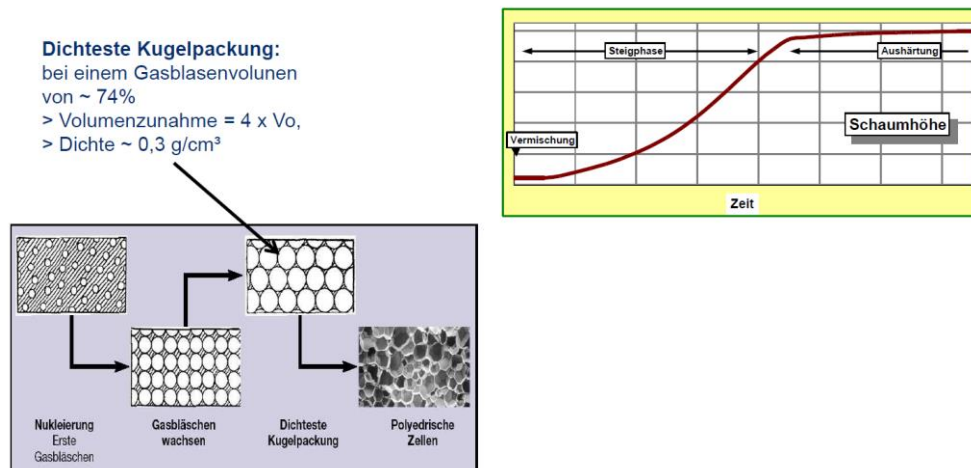
$$U = 6000 \text{ U/min} \rightarrow \Delta p \approx -750 \text{ mbar}$$

* Bemerkung: Wasserbau-Literatur
"Kavitationszahl nach Thoma" = $\frac{2 \cdot (p - p_{\text{dampf}})}{\rho v^2}$

Das „Leben“ der Schaum-Blase: Wachstum/Trocknen



Beschreibung der Polyurethan-Verschäumung



Blasenwachstum

Ableitung aus der klassischen Nukleierungstheorie

$$\Delta G = 4\pi r^2 \cdot \gamma - \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \Delta P$$

γ = Oberflächenspannung
 r = Keimradius
 ΔP = Übersättigung

Druck in Schaumblase:

$$P = 2 \gamma / r$$

1. Disproportionierung:

Druckdifferenz zwischen zwei Blasen mit unterschiedlichen Radien

$$\Delta P = P_R - P_r = 2 \gamma (1/R - 1/r) < 0$$

$$R > r$$

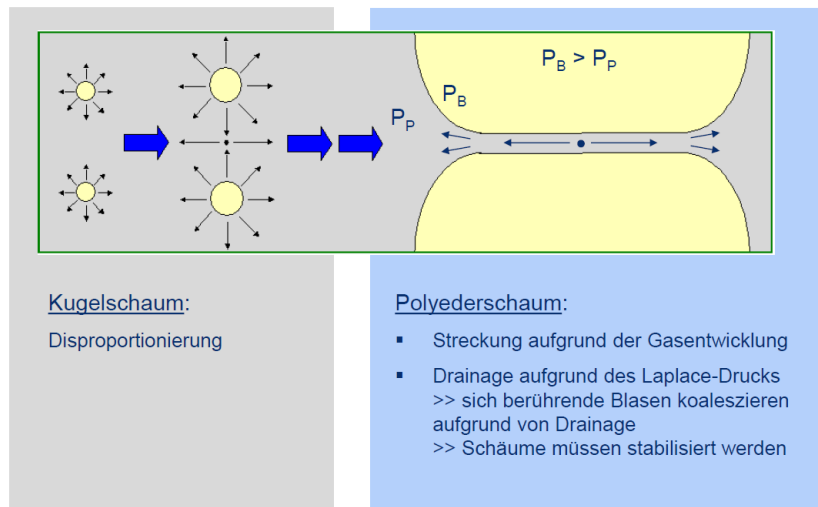
- Druckgefälle von der kleinen Blase (höherer Druck) zur großen Blase
- große Blase wächst auf Kosten der kleinen
- Blasen bewegen sich aufeinander zu (Koaleszenz)

>> aber: Relevanz für Polyurethan unklar !

(Viskosität der Matrix, höher viskose Systeme liefern feinere Schäume)

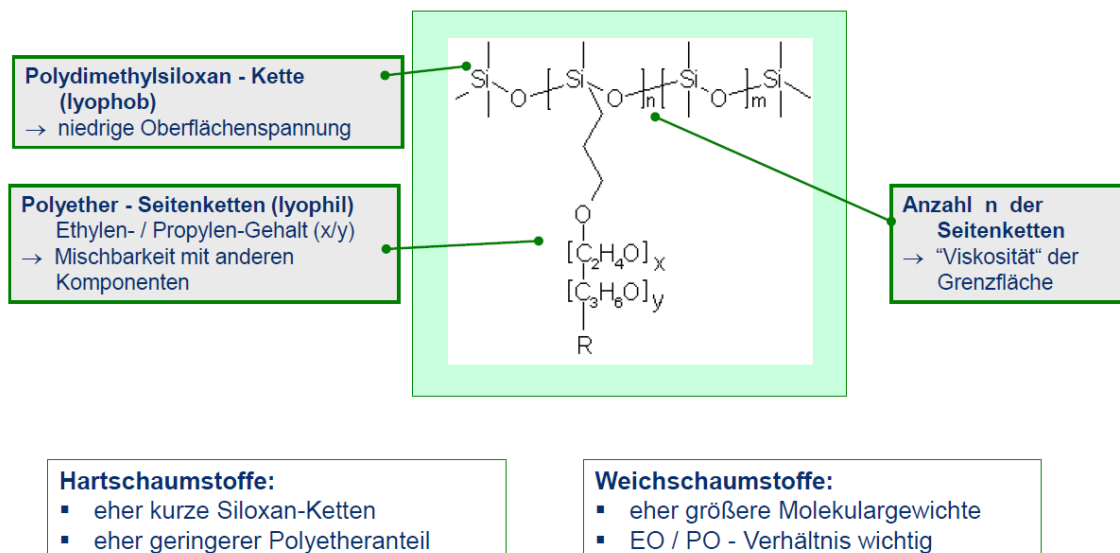
Polyurethan-Schaumentstehung

Entwicklung der Schaum-Membranen



Polyurethan-Schaumstoffe

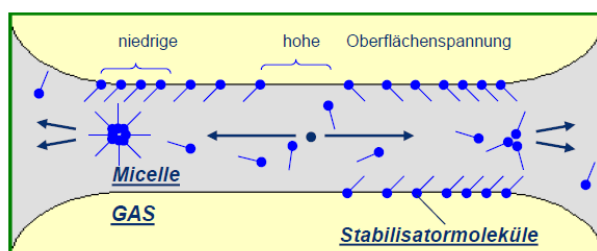
Polysiloxan-Stabilisatoren



Stabilisierung von Schaum-Membranen

Aspekte der Membranstabilisierung

- 1) Migration von Stabilisatormolekülen an die Oberfläche
 Stabilisatorschicht hat höhere „Visko-Elastizität“ als das Fluid
- 2) Marangoni-Effekt
 Oberflächenspannungs-Gradienten verzögern die Drainage
- 3) Viskositätsaufbau im Polymer-Material
 Viskosität des Fluids = f (Polymeraufbau, Abgabe des phys. Treibmittels, Temperaturverlauf)



DRAINAGE

Abnahme der Membrandicke

Modellvorstellung der Schaumstabilisierung

Diffusion+Adsorption vs. Marangoni Effekt

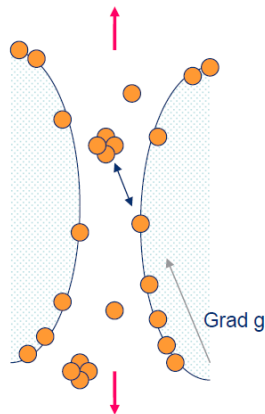
Diffusion und Adsorption

Stabilisatormoleküle diffundieren an die Grenzfläche und adsorbieren an die Grenzfläche (Tri-Phase).

Durch ihre Polymerstruktur bilden sie eine Phase mit viskoelastischen Eigenschaften.

Der Zusammenhalt der Stabilisatoren stabilisiert die Zelle.

Damit eine ausreichende Belegung möglich ist, muss die CMC = Critical Micelles Concentration überschritten werden. Die Micellen bilden im Polymer ein Reservoir an Stabilisatormolekülen.



Marangoni Effekt

Vergrößerung der Oberfläche der Zellwand

lokal nimmt die Konzentration an Tensid ab

Bildung eines Konzentrationsgradienten

die Tenside diffundieren in der Grenzfläche um den Gradienten zu verkleinern und bewegen (Wasser-) Moleküle mit sich

wirken dadurch gegen die Dickenabnahme der Membran.

Erklärungsansätze Schaumkollaps/-öffnung

Immer noch ein Mysterium?

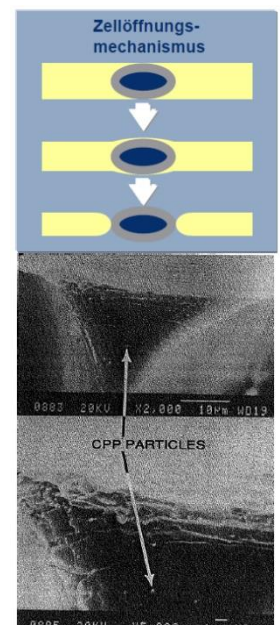
Balance zwischen Vernetzungs- und Treibreaktion !

- erfahrene Schäumer balancieren die Zellstruktur durch Wahl der Katalyse
- Blasenöffnung erfolgt in der viskosen Phase,

Zellstege müssen den Schaum mechanisch tragen

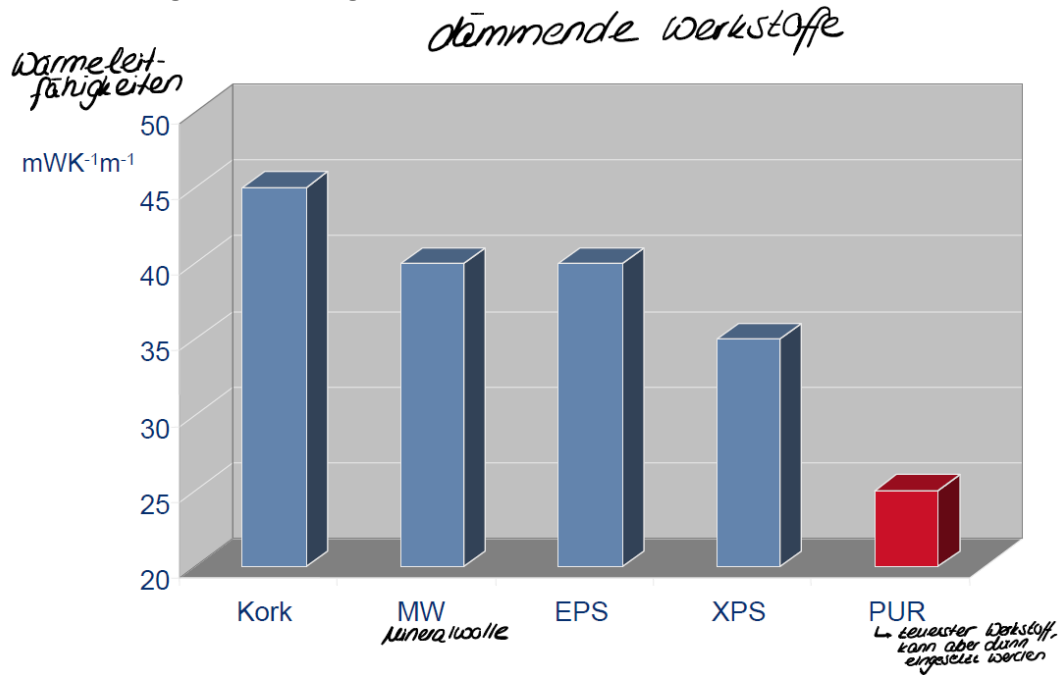
Verunreinigung oder Partikel im Schaum

- Öle, Silikone, Feststoffe in den Polymerrohstoffen können zu Zellkollaps führen
- feste Polymerfüllstoffe (CPP) oder Reaktionsprodukte, die ausfallen
- insbesondere Harnstoff aus der Wasser-Isocyanat-Reaktion kann ab einer bestimmten Konzentration aus dem Polymer ausfallen, Kristalle bilden und dann den Schaum öffnen.

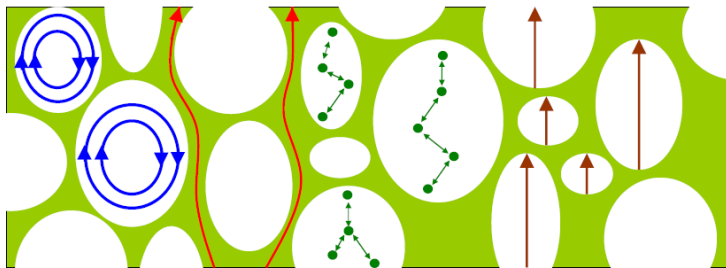


Sonderverfahren: Hochleistungsschaumstoffe

Wärmeleitfähigkeiten im Vergleich



Wärmeleitungsmechanismen in Schaumstoffen



Leitungsmechanismen:

$$\lambda = \lambda_G + \lambda_S + \lambda_M + \lambda_K$$

Wärmeleitung durch Zellgas

Wärmestrahlung

Wärmeleitung in der Matrix

Konvektion im Zellgas

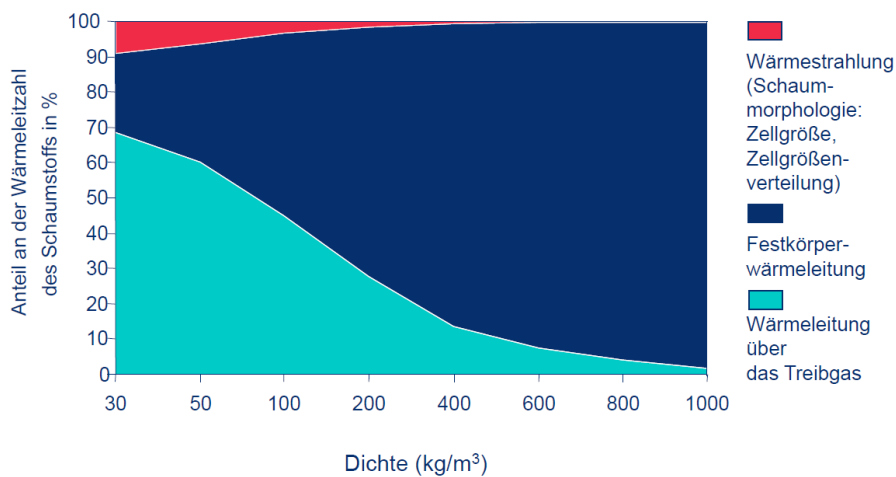
λ_G

λ_S

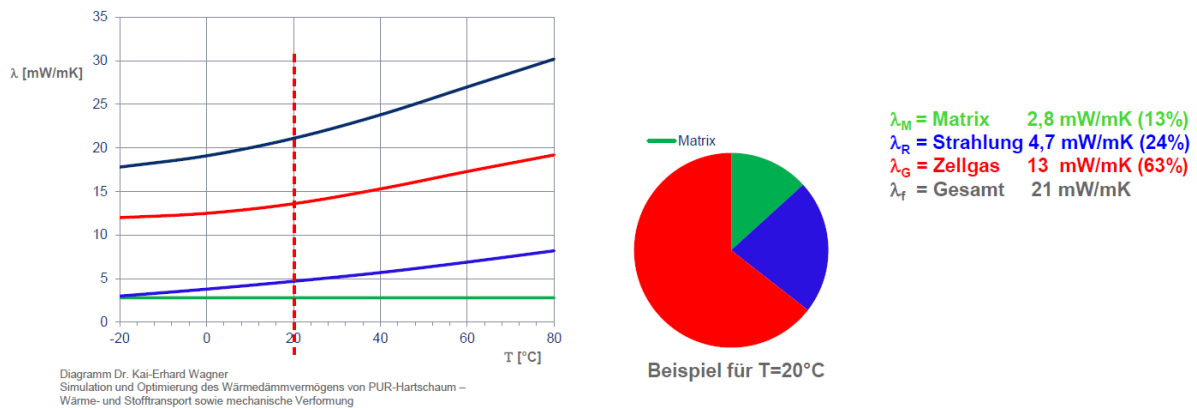
λ_M

λ_K

Was bestimmt die Wärmeleitzahl von Hartschäumen?

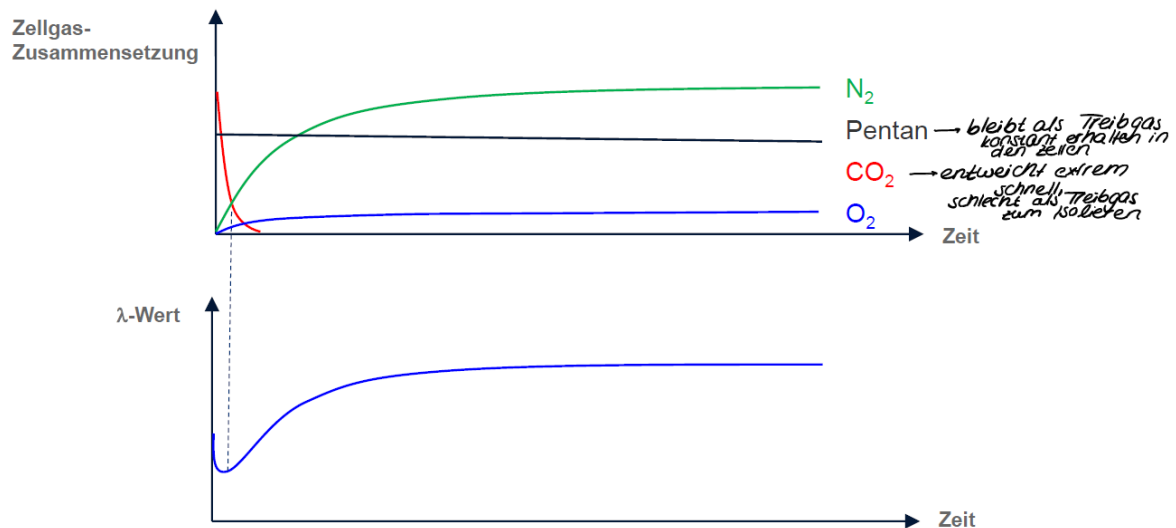


Anteile der für den Wärmetransport verantwortlichen Mechanismen ...eines ungealterten Schaumes in Abhängigkeit der Temperatur



(ohne Berücksichtigung von Kondensation)

Prinzipieller zeitlicher Verlauf der Wärmeleitzahl Aufgrund Gasdiffusion zwischen Zelle und Umgebungsluft



Entwicklungsziele

Optimierung Zellgaszusammensetzung

- Vereinfachte Berechnung der Wärmeleitung von Gasgemischen (Raoult'sches Gesetz)
- Hierbei werden die Wechselwirkungen zwischen interagierenden Gasen wie z.B. die Pentanderivate nicht berücksichtigt

$$\lambda_{\text{ges}} = \chi_{N_2} \times \lambda_{N_2} + \chi_{O_2} \times \lambda_{O_2} + \chi_{CO_2} \times \lambda_{CO_2} + \chi_{\text{Pentan}} \times \lambda_{\text{Pentan}}$$

χ_i = Stoffmengenanteil (Molenbruch)

Polyurethan (PUR) Hartschaumstoff

Treibmittel	Formel	Mol.-Gewicht	Siedepunkt °C	Brennbarkeit	ODP Fähigkeit Ozon-Schicht zu zerstören	GWP Global Warming Potential	Wärmeleitfähigkeit (Gas) mW/m · K	
FCKW 11	CCl_3F	137,4	23,7	—	1	1	8,5 (25°C)	→ zerstört Ozon-Schicht
H-FCKW 22	CHClF_2	86,5	-40,8	—	0,055	0,36	10,8 (25°C)	
H-FCKW 141b	$\text{CH}_3-\text{CCl}_2\text{F}$	117,0	32,0	brennbar	0,11	0,12	10,1 (25°C)	
H-FCKW 142b	$\text{CH}_3-\text{CClF}_2$	100,5	-9,2	brennbar	0,065	0,42	12,9 (25°C)	
H-FKW 134a	$\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3$	102,0	-26,3	—	0	0,25	13,7 (25°C)	
H-FKW 152a	CH_3-CHF_2	66,0	-24,7	brennbar	0	0,03	14,3 (25°C)	
H-FKW 245fa	$\text{CF}_3-\text{CH}_2-\text{CHF}_2$	134,0	15,3	—	0	0,24	13,0 (25°C)	
H-FKW 365mfc	$\text{CF}_3-\text{CH}_2-\text{CF}_2-\text{CH}_3$	148,0	40,2	brennbar	0	0,21	10,6 (25°C)	
n-Pentan	C_5H_{12}	72,0	36,0	brennbar	0	0,00044	14,0 (25°C)	wird heutzutage beim Schäumen verwendet, aber Sicherheitsvorkehrungen, da sehr giftig und leicht mit Sauerstoff
i-Pentan	C_5H_{12}	72,0	28,0	brennbar	0	0,00037	13,6 (25°C)	
c-Pentan	C_5H_{10}	70,0	49,0	brennbar	0	0,0004	12,4 (25°C)	
CO_2	CO_2	44,0	-78,5 sublim	—	0	0,00015	16,0 (25°C)	

ODP = ozone depletion potential ; GWP = global warming potential

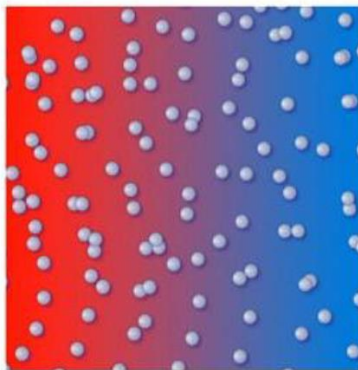
Verbesserung der Isoliereigenschaften

... durch Reduktion des Gasleitungsanteils (z. Z. ca. 60%)

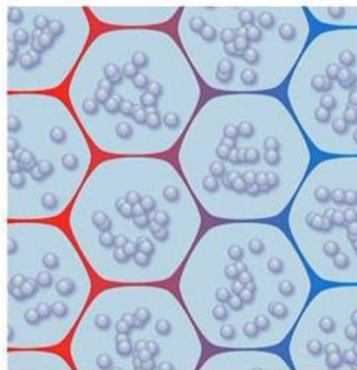
- Einfluss von Zellgröße und Gasdruck auf die Gas-Wärmeleitung als Haupt-Transport-Komponente (Grenzbereich → Knudsen-Effekt)
- Liegen Zelldurchmesser und mittlere stoßfreie Weglänge eines Gasmoleküls in der selben Größenordnung, so tritt praktisch keine Wärmeleitung auf.

Warum sind Aerogels gute Isolatoren?

Der Knudsen-Effekt

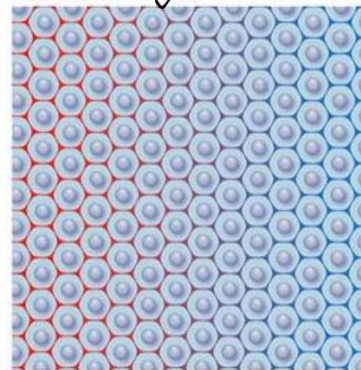


Air



Conventional Insulation

Entwicklung der NASA



↳ transparent, da kleinere Wellenlänge als Licht

Aerogel

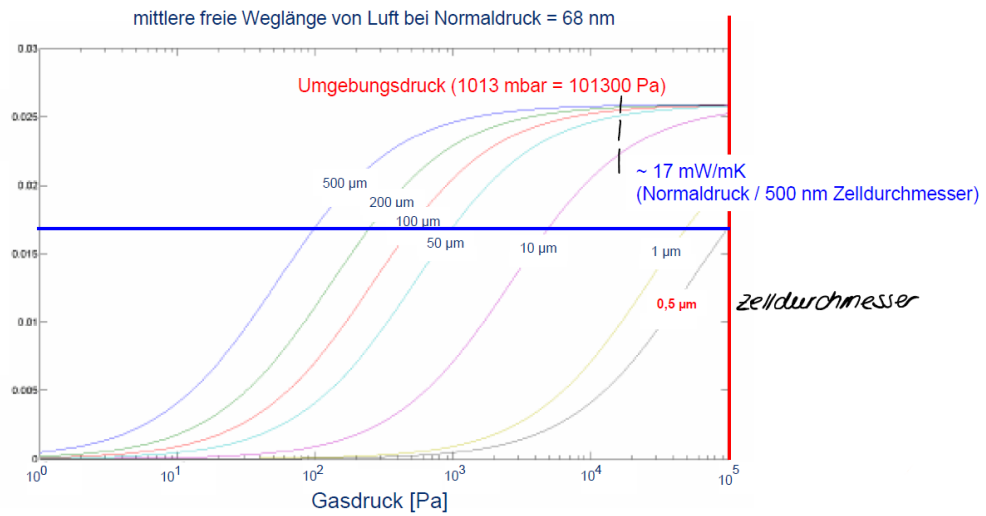
Zellen kleiner als mittlere freie Weglänge, gerade groß genug für ein Teilchen
→ Wärmeleitung durch Zellgas = 0



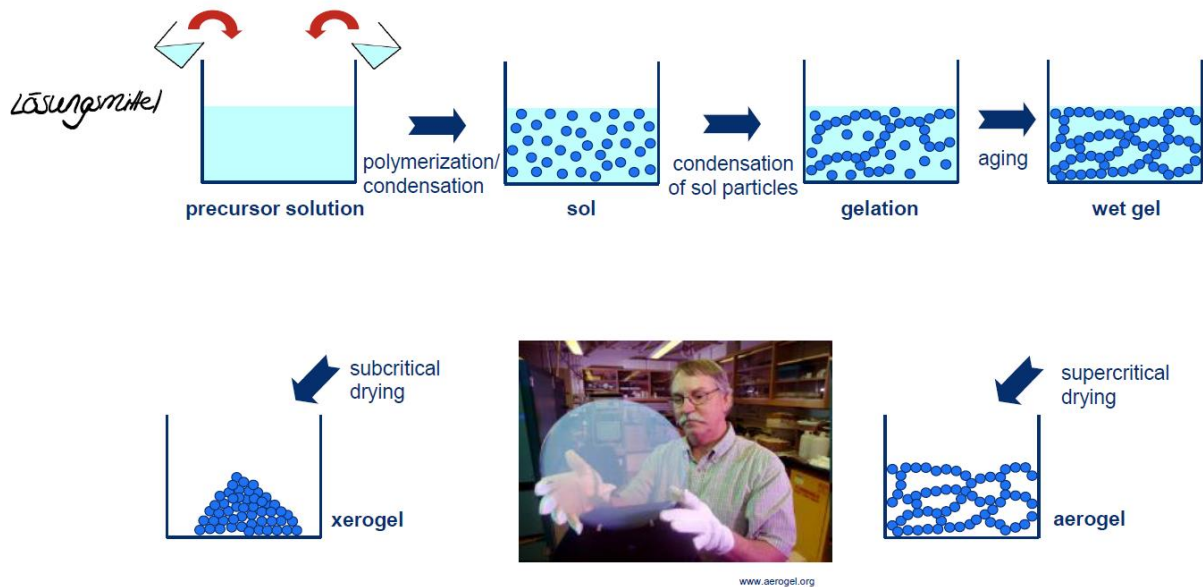
Verbesserung der Isoliereigenschaften durch Reduktion des Gasleitungsanteils

Knudsen-Effekt

Gas-
Wärmeleitung
[W/mK]



Sol-Gel-Prozess



Kontinuierliche Fertigung ist bisher schwierig zu realisieren (wegen des Trocknungsprozesses).



Materialien in technischen Konstruktionen

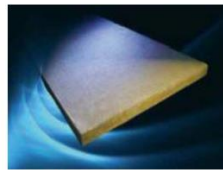
Anwendungen

Thermische Isolation



ASPEN aerogels, Inc.

Gebäude



ROCKWOOL, Aerowolle

Öl und Gas-Pipelines



Belichtung / Tageslicht



- Low thermal conductivity – U-value of 0.71 W/m²K
- High light transmission – 75% per cm
- Sound attenuation – reduces transmitted noise

Zusammenfassung/Übung 6.

- Thermoplastische Schäume lassen sich mittels Extrusion, Spritzguss oder als Partikelschäume herstellen.
- Die Phänomenologie der Polyurethan-Schaumbildung lässt sich von Verarbeitungsverfahren ableiten (scale down) oder durch physikalisch/chemische Analysenmethoden charakterisieren.
- Brauchbare Methoden zur Analyse der Nukleierung der Blasenentwicklung konnten bisher nicht entwickelt werden.
- Klassische Modelle zur Nukleierung erklären die PUR-Schaumentstehung nicht. Bei der PUR-Schaumbildung dürfte die Bildung von Mikrokavitation der maßgebliche Mechanismus sein.
- Verschiedene gleichzeitig ablaufende Prozesse beeinflussen Schaumstabilisierung und –kollaps. Maßgeblich sind die Wirkung des Stabilisators, der Katalyse und Feststoffe.
- Aerogele sind viel versprechende Hochleistungs-Schaumstoffe. Sie sind bisher großtechnisch noch nicht darstellbar.

Freie Rohdichte

Aufgabe

Berechnung für 1 kg Modellsystem

Rezepturvorgaben:

- 2,25% Wassergehalt = 22,5 g Wasser / kg Polyolformulierung
- Mengenverhältnis Polyol : Isocyanat = 100:50
- Dichte Polyol = 1,03 g/cm³; Dichte Isocyanat = 1,2 g/cm³
- Reaktionstemperatur 70 °C

Schätzen Sie die freie Rohdichte des Schaums (bei vollständiger Umsetzung des Wassergehalts)

Lösung

Berechnung für 1 kg Modellsystem

Rezepturvorgaben:

- 2,25% Wassergehalt = 22,5 g Wasser / kg Polyolformulierung
- Mengenverhältnis Polyol : Isocyanat = 100:50
- Dichte Polyol = 1,03 g/cm³ ; Dichte Isocyanat = 1,2 g/cm³

Berechnung:

- 22,5 g Wasser in 1,5 kg System
- >> 15 g Wasser / kg System
- = 0,83 mol CO₂ / kg System (15 g / 18 g pro mol)
- >> 0,83 mol CO₂ bei 70°C = 21,7 Liter (ideales Gas: T/V = konst.)

1000 g / (21,7 l Gas + 0,924 l Polymer) = 44,2 g/l

In der Praxis findet man häufig höhere Dichten z.B. Maschinenschaum: 48 g/l

Gründe: Ausbeuteverluste, Schrumpf, Kollaps, Abblasen von Wasser

7. Gestalten mit Polyurethan

Bauteilgestaltung und Auslegung

Konstruieren mit PUR-Formteilen

Grundsätzlich gilt:

Um alle materialspezifischen Eigenschaften und Vorteile optimal nutzen zu können, sollte die Entscheidung für den Werkstoff im frühest möglichen Stadium der Produktentwicklung getroffen werden!

Kriterien zur Materialauswahl

- Eigenschaftsprofil
 - welche Eigenschaften werden verlangt
 - tragendes und nichttragendes Bauteil
 - wie erfolgt die Belastung (statisch, dynamisch, schlagartig)
 - welche Durchbiegung ist erlaubt
- Einsatzbedingungen
 - mit welcher Kurz- und Langzeitbelastung ist zu rechnen
 - tritt in einer Richtung erhöhte Belastung auf
 - mit welcher Temperaturbelastung ist zu rechnen
 - welchem Klima ist das Bauteil ausgesetzt
 - stört die Wärmedehnung
 - kommt das Bauteil mit Nahrungsmittel in Kontakt
 - Anforderungen an das Brandverhalten
- Verarbeitungsmöglichkeiten
 - welche Maschinenausrüstung steht zur Verfügung (Hochdruck-, Niederdruckdosierung; Kolbendosiermaschine für Füllstoffverarbeitung)
 - ... mit welcher Austragsleistung
 - Werkzeugmaterial (Epoxid, Metall)
 - welche Formenträger werden eingesetzt
- Wirtschaftlichkeit
 - wie können große Formteile preiswert hergestellt werden
 - Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Werkstoffen
 - Integration von Montagebauteilen
 - Darstellung von Oberflächen (evtl. Lackierung nötig)

Konstruktionsrelevante Materialparameter

Biegesteifigkeit

(dichteabhängige Eigenschaft)

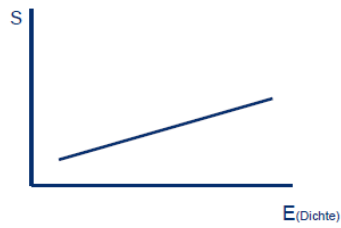
Beispiel: Hartintegralschaum mit unterschiedlichen Dichten

	σ_B	E-Modul	Dichte
Baydur 40	20 N/mm ²	~ 500 N/mm ²	~ 400 kg/m ³
Baydur 60	35 N/mm ²	800 - 950 N/mm ²	~ 600 kg/m ³
Baydur 110	60 N/mm ²	2000 N/mm ²	~ 1100 kg/m ³
Baydur GS	30-80 N/mm ²	900 - 2000 N/mm ²	~ 1200 kg/m ³

Steifigkeitssteigernde Maßnahmen:

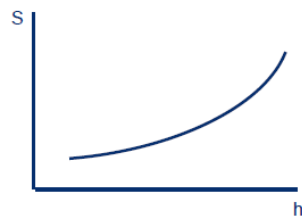
Material mit höherem E-Modul

$$S = I \times E$$

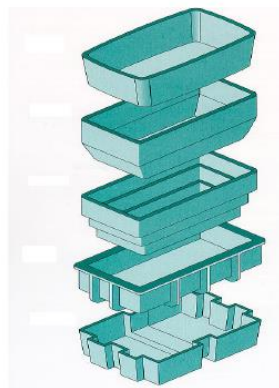


Erhöhung der Wanddicke h

$$I = b \times h^3 / 12$$



Aussteifen von Flächen



Bombierung

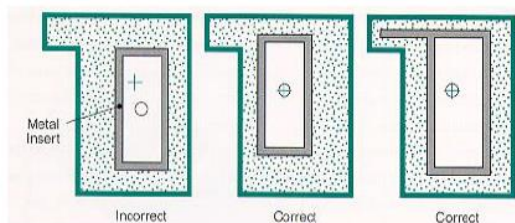
Faltung

Stufenbildung

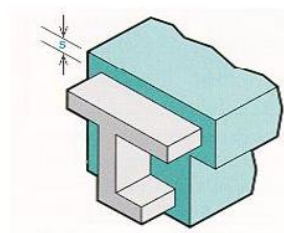
Ränder

Sicken

Armierung



Deckungsgleiche Schwerpunktlagen vermeiden Formteilverzug

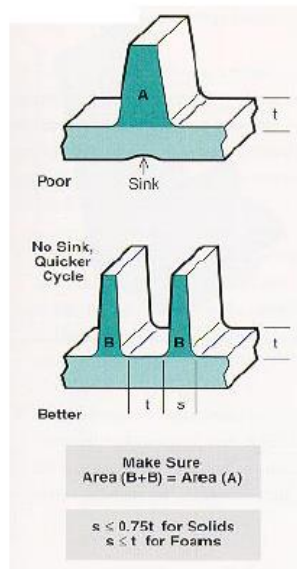


Wanddicke s :

≥ 6 mm (Schaumsystem)

≥ 3 mm (Massivsystem)

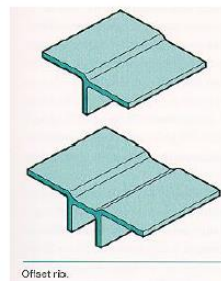
Rippen



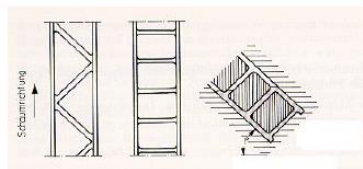
Rippenhöhe 5 bis 10 x Wanddicke

Rippenfuß mit Radien

Zur Vermeidung von Einfallstellen
Rippendicke < Flächendicke



Rippenmarkierung durch
Flächenversprung kaschieren



Verlauf vorzugsweise in
Schäum- bzw. Füllrichtung

Schlagzähigkeit

Beispiel: Hartintegralschaum mit unterschiedlichen Dichten
(dichteabhängige Materialeigenschaft)

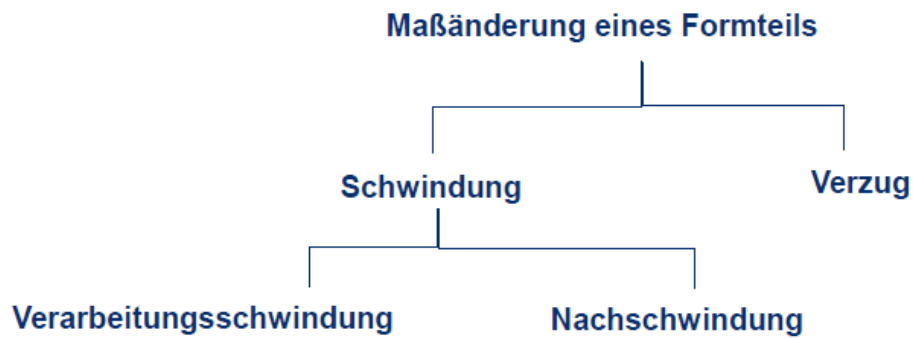
Baydur 40	~ 10 kJ/m ²
Baydur 60	15 - 18 kJ/m ²
Baydur 110	45 - 55 kJ/m ²
Baydur GS	40 - 65 kJ/m ²

Temperaturbeständigkeit (HDT - Heat deflection temperature)

Beispiel: Hartintegralschaum mit unterschiedlichen Dichten
(dichteabhängige Materialeigenschaft)

Baydur 40	~ 90 °C
Baydur 60	100 - 135 °C
Baydur 110	85 - 115 °C
Baydur GS	75 - 190 °C

Maße, Schwindung und Verzug



$$V_S [\%] = 100 \times (L_W - L) / L_W$$

V_S = Verarbeitungsschwindung

V_W = Werkzeugmaß

L = Formteilmaß

Auf Temperaturbezug achten ! (warmes vs. kaltes Werkzeug)

Einflussgrößen:

Schwindung

Prozessparameter

Verarbeitungsschwindung

↑↑
↑↑
↓↓
↓↓

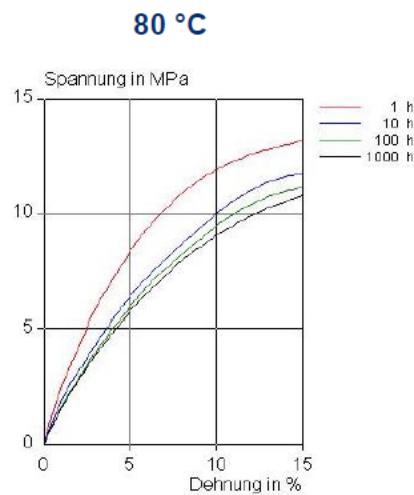
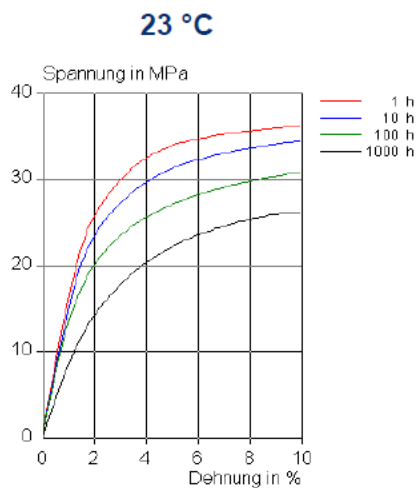
↑↑ Werkzeugtemperatur
↑↑ Wanddicke
↑↑ Formverweilzeit
↑↑ Dichte

Nachschwindung

Nachreaktion
Spannungsrelaxation
Diffusionsvorgänge

Kriechverhalten

Isochrone Spannungs-Dehnungslinien für Baydur 110

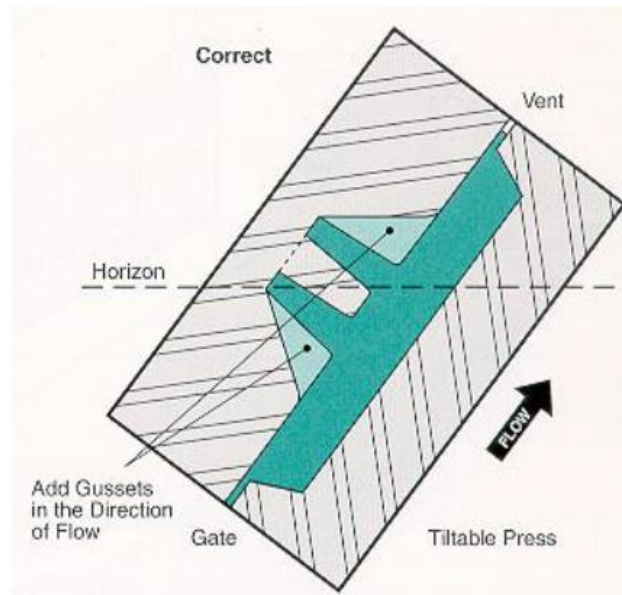


Kriechverformungen lassen sich durch Erhöhung der Steifigkeit (Verrippung, Profilierung) minimieren.

Werkzeuggerechtes Gestalten

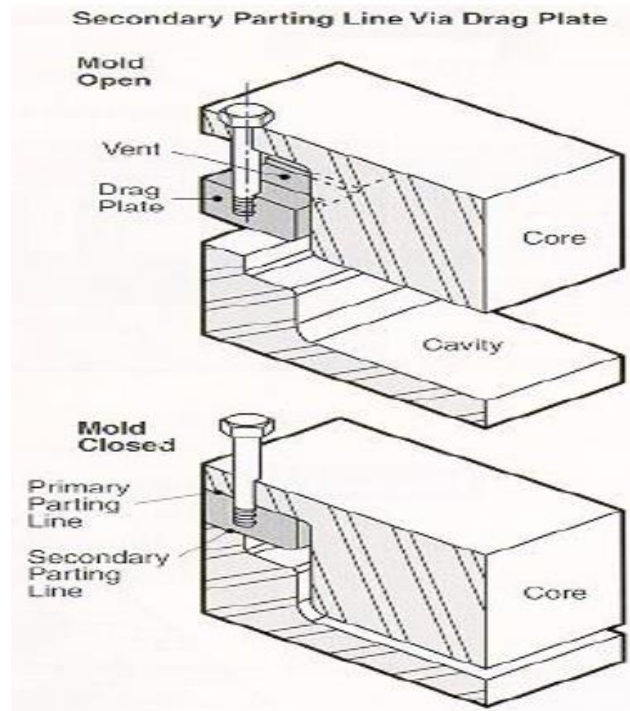
Fülltechnik

- Einwandfrei vermischtes Reaktionsgemisch turbulenzfrei ins Werkzeug eintragen
- Sichtfläche vorzugsweise unten
- Gegen die Schwerkraft schäumen

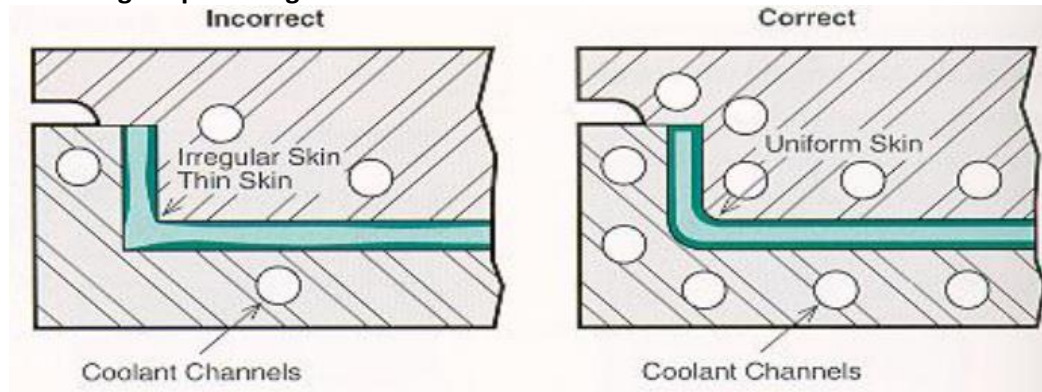


Trennebene

- Design sollte Möglichkeit der Werkzeugentlüftung berücksichtigen
- Zusätzliche Entlüftungsebene werkzeugseitig vorsehen (Entlüftungsleisten)



Werkzeugtemperierung



reproduzierbare Formteile = konstante Temperatur
+ / - 2 °C

Entformungsschrägen

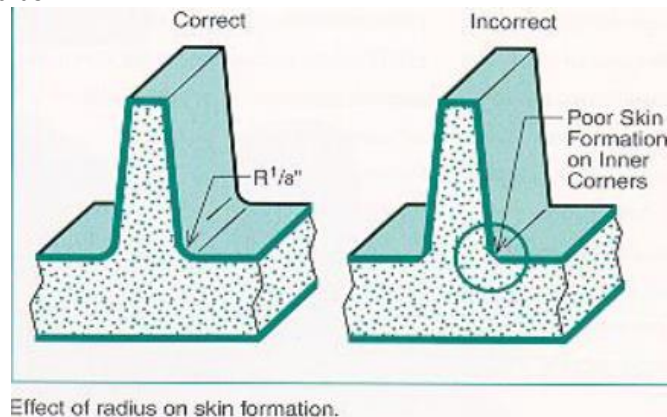
- Formteiltiefe bis 200 mm 1°
- Formteiltiefe über 200 mm 1,5 °

Geringe oder keine Entformungsschrägen setzen aufwändige Werkzeuge mit entsprechenden Schiebern voraus!

Bemessen von Radien

Radien sind scharfen Kanten vorzuziehen, wenn Formteiltrennung und Entlüftung nicht beeinträchtigt werden.

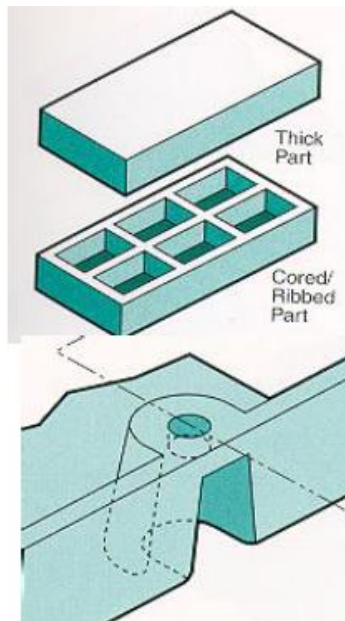
- Radien vermeiden Kerbwirkungen und Spannungsspitzen
- minimaler Radius 2 mm



Materialanhäufungen

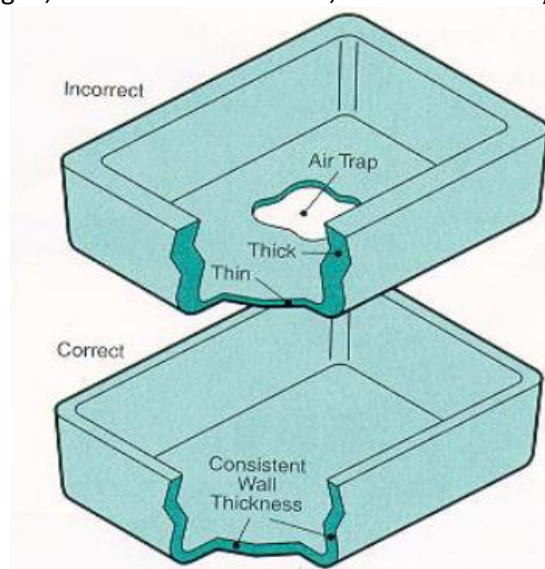
vermeiden, da Formverweilzeit von der Formteilmwanddicke abhängt oder aufgrund der Reaktionskinetik nicht zu realisieren ist.

- Kompakte Querschnitte durch Rippen / Stege auflösen
- durch Querschnittsaushöhlung reduzieren oder durch Verdrängungskörper minimieren



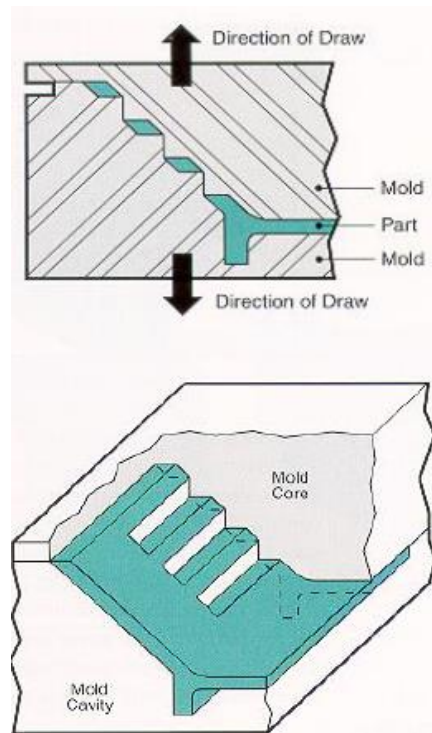
Querschnittsveränderungen

- große Waddickensprünge wegen Verzugsneigung vermeiden
- extreme Querschnittsverengungen immer unter Flüssigkeitsniveau füllen (Vermeidung von Oberflächenstörungen, Zusammenflussnähten, Lufteinschlüssen)

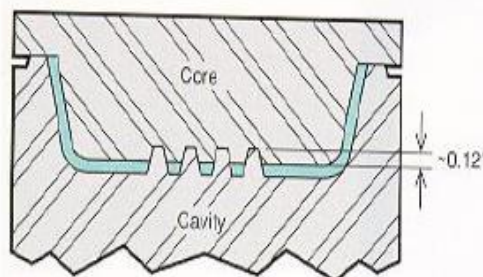
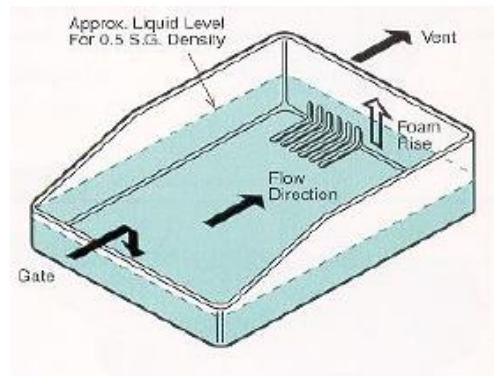


Durchbrüche

- vorzugsweise in Entformungsrichtung legen
- bei entsprechenden Entformungsschrägen lassen sich Schlitz und Durchbrüche in der Seitenwand auch ohne Schieber oder Einlegeteile herstellen

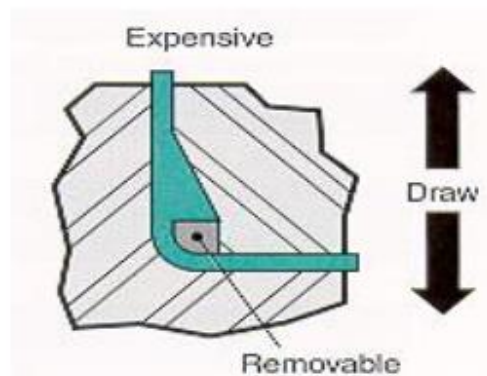
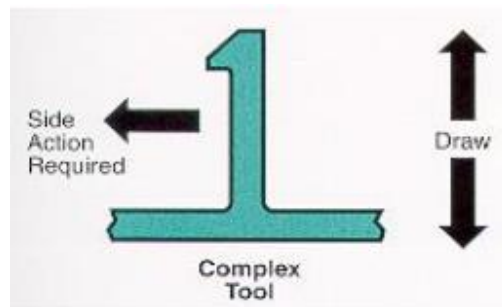


- Ausrichtung der Stege / Schlitze in Schäumrichtung, ansonsten unter Flüssigkeitsspiegel Positionieren
- Formkerne in gegenüberliegender Werkzeughälfte eintauchen = stehender Grat (bessere Entfernung)
- Gratbildung immer an der Nicht- Sichtseite vorsehen



Hinterschneidungen

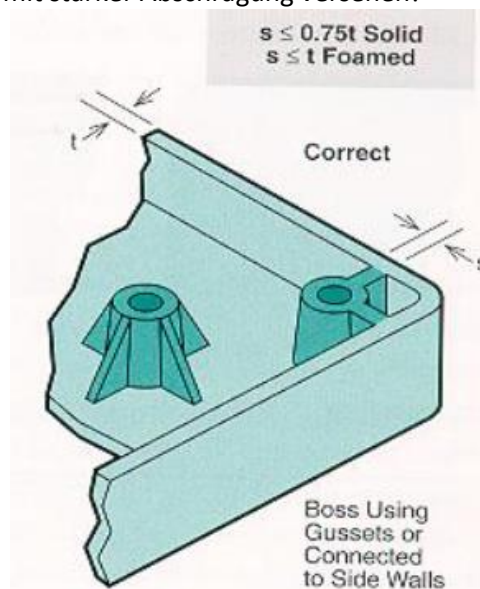
- setzen aufwendige Schieberwerkzeuge voraus
- Bei losen Einsätzen verlängert sich die Zykluszeit
- Werkzeuge mit Schiebern unterliegen einem höheren Verschleiß und sind stör - und reparaturanfällig



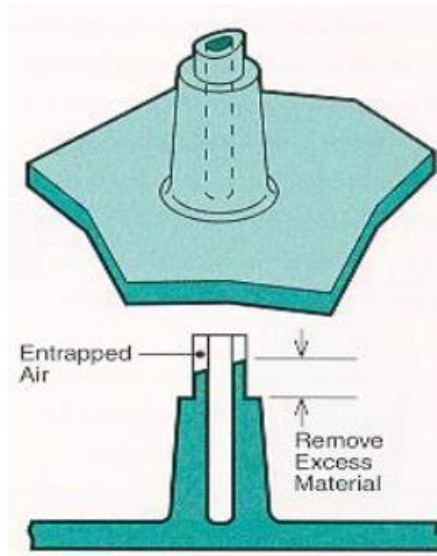
Hinterschneidungen möglichst vermeiden!

Nocken/Dome

- Sie dienen dem mech. Zusammenbau einzelner Formteilkomponenten.
- Sie sind Stützlager bzw. Abstandshalter.
- Zur Vermeidung von Lufteinschlüssen sollten Nocken mit der Formteilaußenfläche verbunden sein.
- Freistehende Nocken mit starker Abschrägung versehen!



- höher ausbilden, wenn Auflagefläche zu 100 % abgebildet sein muss (nachträglich mechanisch bearbeiten)



Gestaltungshinweise für PUR-Strukturbauteile

Baypreg-Sandwich

Aufbau

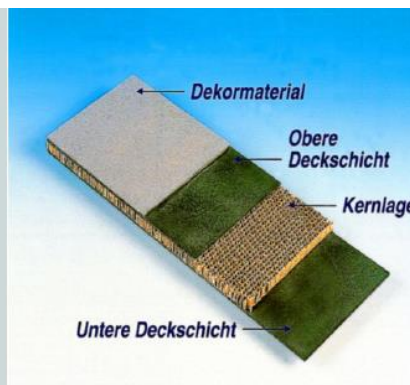
Aufbau

Deckschichten:

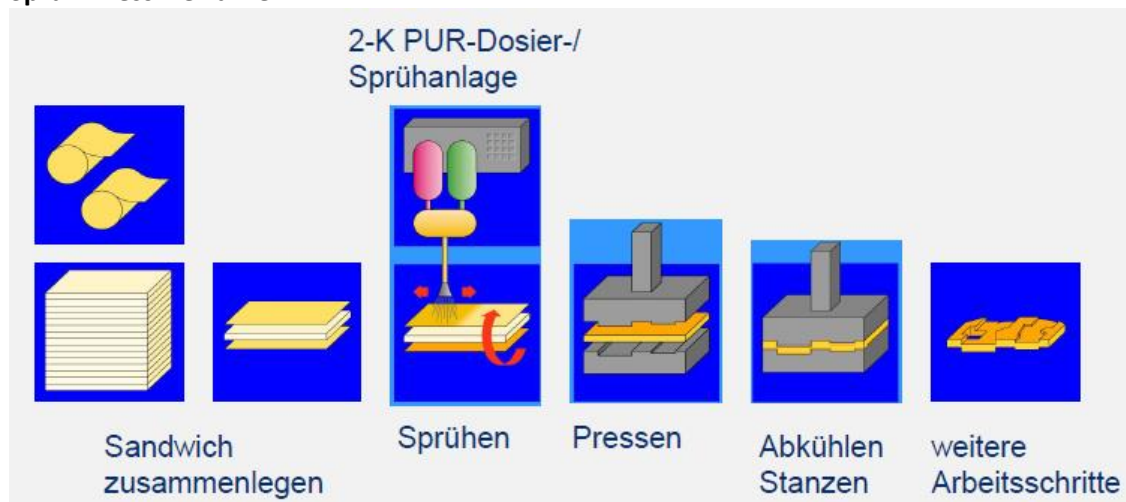
- PUR verstärkt mit Glas- oder Naturfasern

Kernschicht:

- homogen oder strukturiert
- Aluminium, Papier, Kunststoff



Sprüh-Press-Verfahren



Kernschicht – Papierwellenwabe



Eigenschaften:

- hohe Drucksteifigkeit in Dickenrichtung
- hohe Schubmodule
- vernachlässigbare Dehnsteifigkeit in der Fläche
- Anisotropie

Weitere Strukturen:



Honeycomb



Tubus

Methode der Partialdurchsenkung

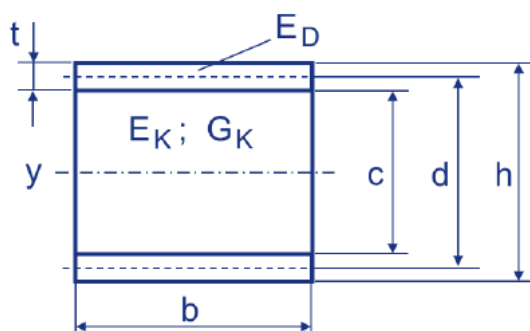
$$\text{Gesamtverformung} = \text{Biegeverformung} + \text{Schubverformung}$$

Beispiel: Kragbalken

$$\text{Gesamtverformung} = \frac{Fl^3}{3B_s} + \frac{Fl}{A_s}$$

B_s = Biegesteifigkeit; A_s = Schubsteifigkeit

Biege- und Schubsteifigkeit



Sandwichquerschnitt

Theorie dünner Deckschichten:

- Biegesteifigkeit

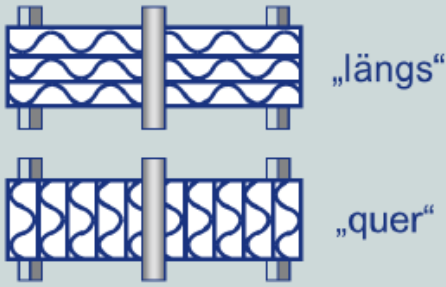
$$B_s = E_D I_{D,y} = \frac{E_D b t}{2} d^2$$

- $I_{D,y}$ = Flächenträgheitsmoment

- Schubsteifigkeit

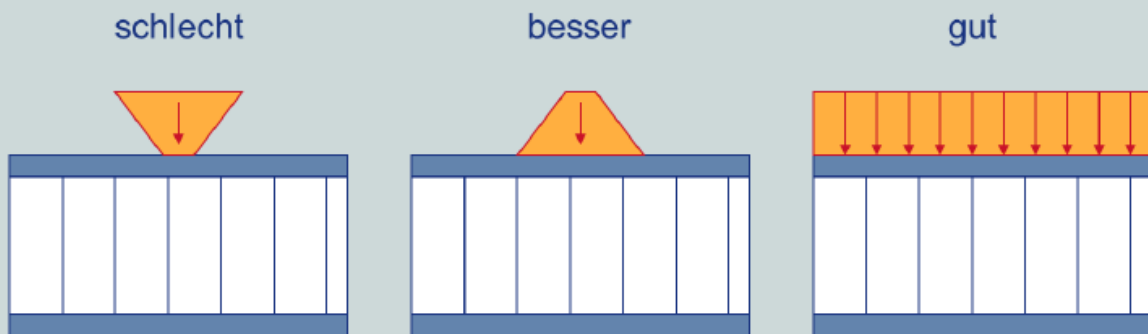
$$A_s = G_K \frac{b d^2}{c}$$

Einflussgrößen auf die Biegesteifigkeit

<u>Einflussgröße</u>	<u>Zusammenhang</u>	<u>Beispiel</u>
Sandwichdicke 	$B_s \sim d^2$	doppelte Dicke => vierfache Steifigkeit
Glasmattenflächengewicht 	$B_s \sim F_{GM}$	doppeltes F_{GM} => doppelte Steifigkeit
Temperatur 	$B_s = f(T)$	im Vergleich zu Thermoplasten gering
Orientierung des Kerns 	Biegesteifigkeit (und -festigkeit) „längs“ größer als „quer“	bis ~ 25 %
Glasmattenabzugsrichtung 	je nach Mattentyp: Orientierung der Glasfilamente in Abzugsrichtung	< 15 %

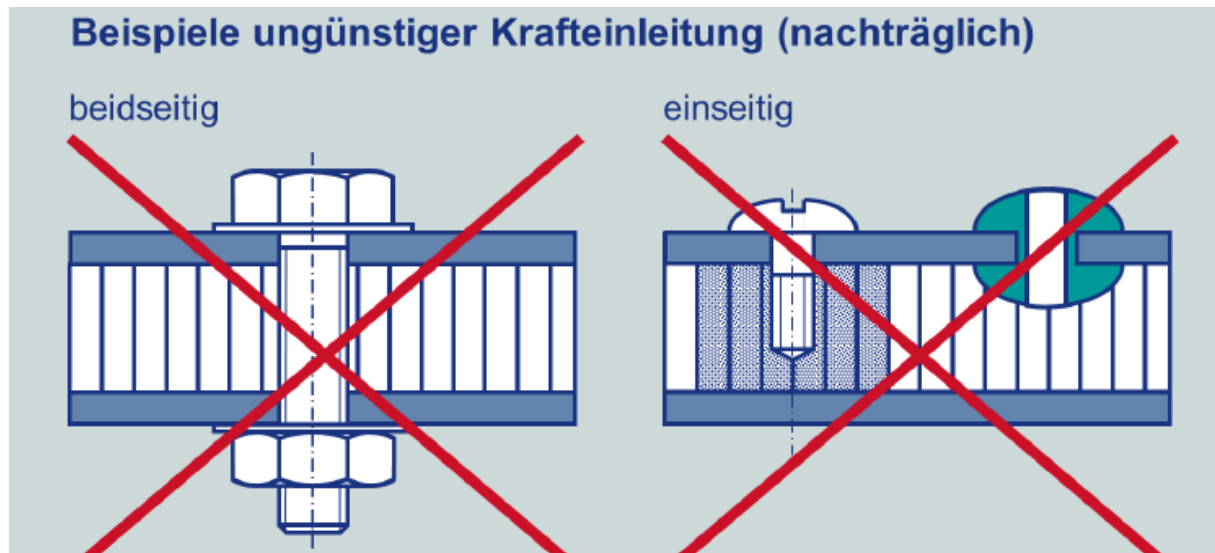
Prinzipien bauteilgerechter Konstruktion

Belastung auf Deckschicht



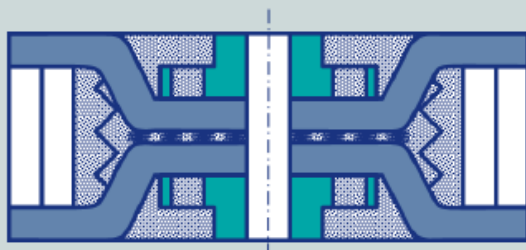
Maximale Druckbelastung < 0,5 MPa (für 5/5-er Wellpappe Testliner II)

Beispiele ungünstiger Krafteinleitung (nachträglich)

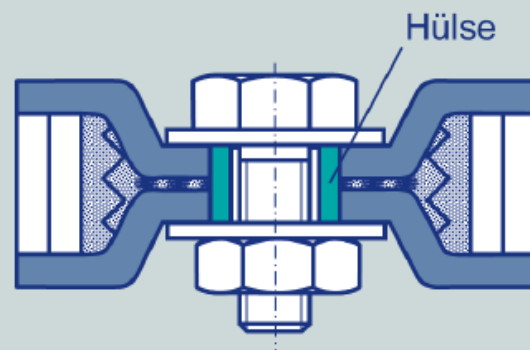


Beidseitige Krafteinleitung

in situ mit Nachbearbeiten



nachträglich



Einleger und Verbindungselemente

Wichtige Eigenschaften:

- kompatible Wärmedehnung PUR-Composite / Einleger
- gute Haftung PUR / Einleger

Geeignete Materialien:

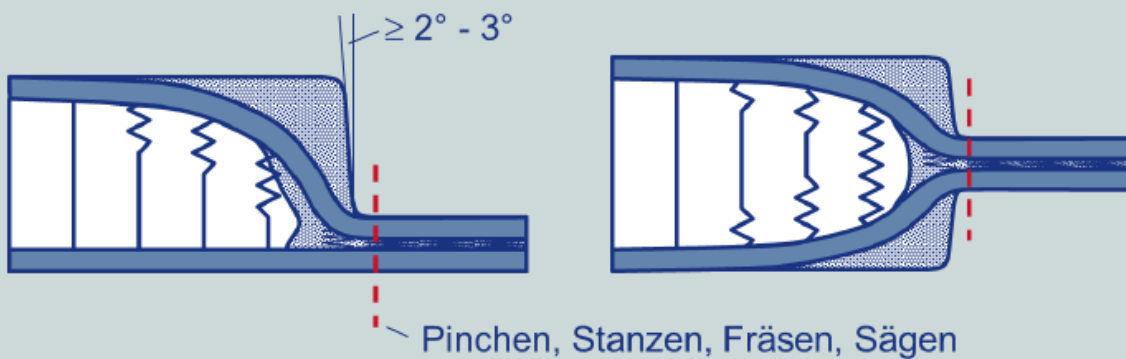
- PA GF 30, PC/ABS Blends GF 30
- Stahl, Aluminium (Primern bei selbst trennenden PUR-Systemen)

Ungeeignete Materialien:

- PE, PP, PS (keine Haftung)

Randbereiche

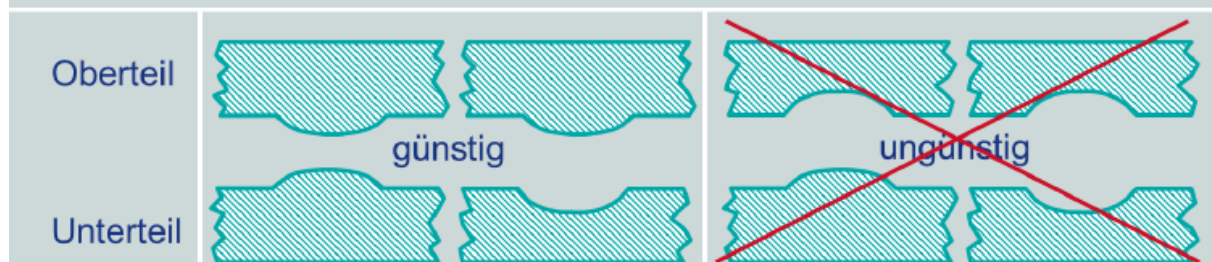
- keine offenliegenden Schnittkanten (Feuchtigkeit)
- geschlossene Kanten durch Abpressen im Presswerkzeug



Generelle Richtlinien der Werkzeuggestaltung

Entlüftung:

- Entlüftung erfolgt über Werkzeugrandbereiche (Trennebene)
- langsames Schließen des Presswerkzeugs (und/oder Entlüftungshübe)
- schwer zu entlüftende Taschen im Oberwerkzeug vermeiden:

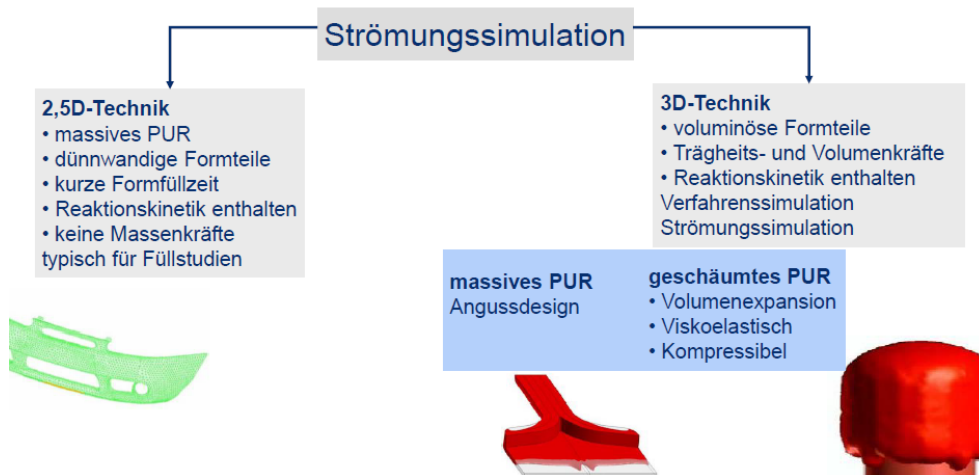


Ausgewählte Beispiele der rechnergestützten Formteilgestaltung

Numerische Berechnungen setzen u.a. die Kenntnis der relevanten Materialgesetze voraus.

Es ist das Geschick des Entwicklers, diese gerade so genau wie nötig zu erfassen.

CFD- Berechnungsansätze für PUR



2,5D-Formfüllsimulationstechnik

- Bauteilkontur-angepasstes 2D-FEM Netz
- Generalisierte Hele-Shaw-Strömung:

$$\nabla p = \nabla \cdot \bar{\tau}$$

- Kontrollvolumenmethode für die Fließfront
- Exotherme Reaktion, schwach kompressibel für Gasbeladung
- Nicht-Newtonsches Verhalten möglich:

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, T)$$

- FD-Auflösung der Energiegleichung in Dickenrichtung
- Parabelförmige Geschwindkeitsverteilung in Dickenrichtung
 - Dünnwandige Bauteile
 - Verschwindende Trägheits- und Volumenkräfte

An dieser Stelle finden sich viele Praxisbeispiele in den Vorlesungsfolien.

3D-Simulationstechniken mit am Markt erhältlichen CFD-Programmen

- Bauteilkontur-angepasste 3D-Netze
- Lösung der vollständigen Erhaltungsgleichungen
- Trägheitserscheinungen und Schwerkräfteinflüsse
- VOF-Modelle für freie Oberflächen
- Reaktionskinetik mit exothermer Reaktion
- Inkompressibel (kompakte, nicht schäumende Systeme)
- Nicht-Newtonsches Verhalten möglich
- Zeitaufwendige Netzgenerierung und lange Simulationszeiten

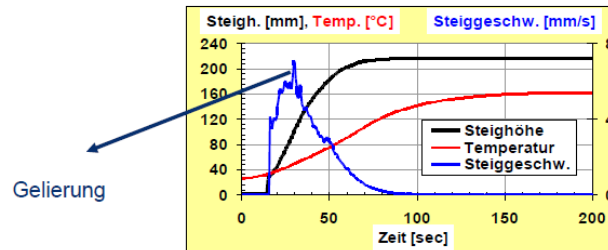
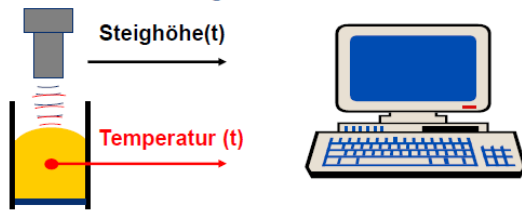
3D-Aufschäumssimulation

Vorhersage von Lufteinschlüssen

- Berücksichtigung der Gasphase (Umgebungsluft)
- Transport von eingeschlossenen Gasblasen
- Numerische Umsetzung mit einem VoF-Modell (Volume of Fluid)

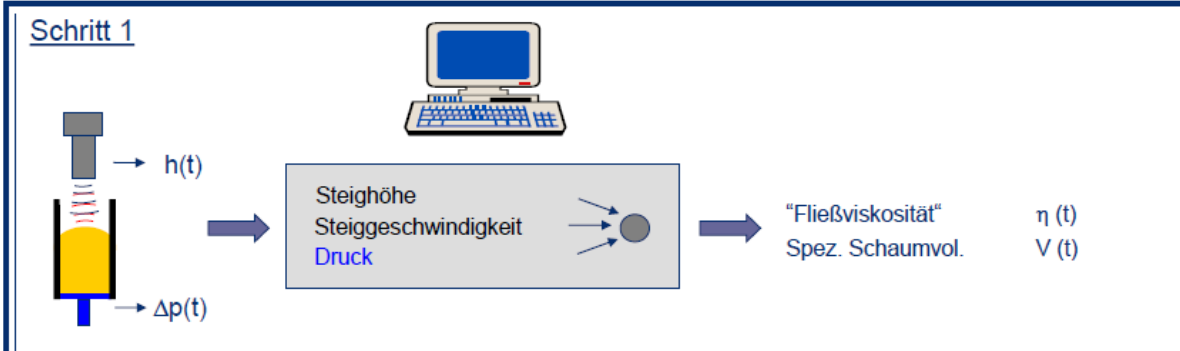
Das Steigverhalten charakterisiert die Schaumbildung

Abstandsmessung mit Ultraschall

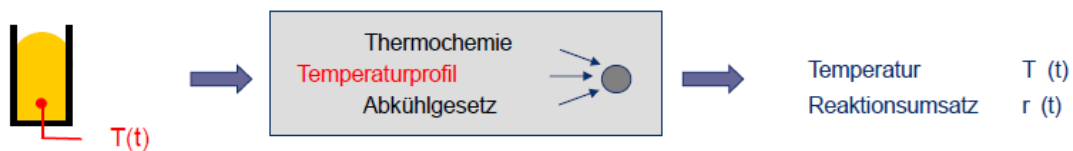


Charakterisierung der PUR-Aufschäum- und Reaktionskinetik

Schritt 1



Schritt 2

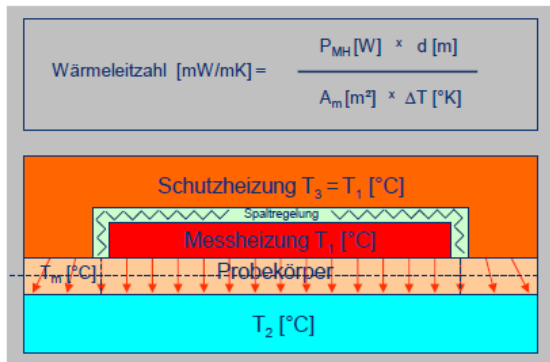


Materialprüfung – Sonderverfahren für Schäume

Wärmeleitfähigkeit

Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit:

Einplatten-Methode nach DIN 52612 / DIN EN 12667



$P_{MH} [W] = U [V] \times I [A]$	elektrische Leistungsaufnahme der Messheizung
$d [m]$	Probendicke
$A_m [m^2]$	Kontaktfläche der Messheizung
$\Delta T [K] = T_1 [^\circ C] - T_2 [^\circ C]$	Temperaturdifferenz (>10K)
$T_1 [^\circ C] (>T_2)$	Temperatur warme Seite (Messheizung)
$T_2 [^\circ C] (<T_1)$	Temperatur kalte Seite
$T_3 [^\circ C] (=T_1)$	Temperatur der Schutzheizung
$T_m [^\circ C] = (T_1 - T_2) / 2$	(verhindert Energieverlust an der Messheizung „Spaltregelung“) Mittentemperatur

Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit mit einer eingestellten Temperaturdifferenz und Messung der erforderlichen Heizleistung.

Beispielgerät: Lambda-Messtechnik Dresden Typ EP500

Probekörpergröße: 500 x 500 x 10...200 mm

Messbereich: 5...180 mW/mK

Mittentemperatur: -10...40°C (20 < d < 70 mm)

10...40°C (70 < d < 120 mm)

23°C (120 < d < 200 mm)

Messgenauigkeit: < 1,5% (19..60 mW/mK, d<90)

< 2,5% (Restbereich)

Reproduzierbarkeit: < 1% (19..60 mW/mK, d<90)

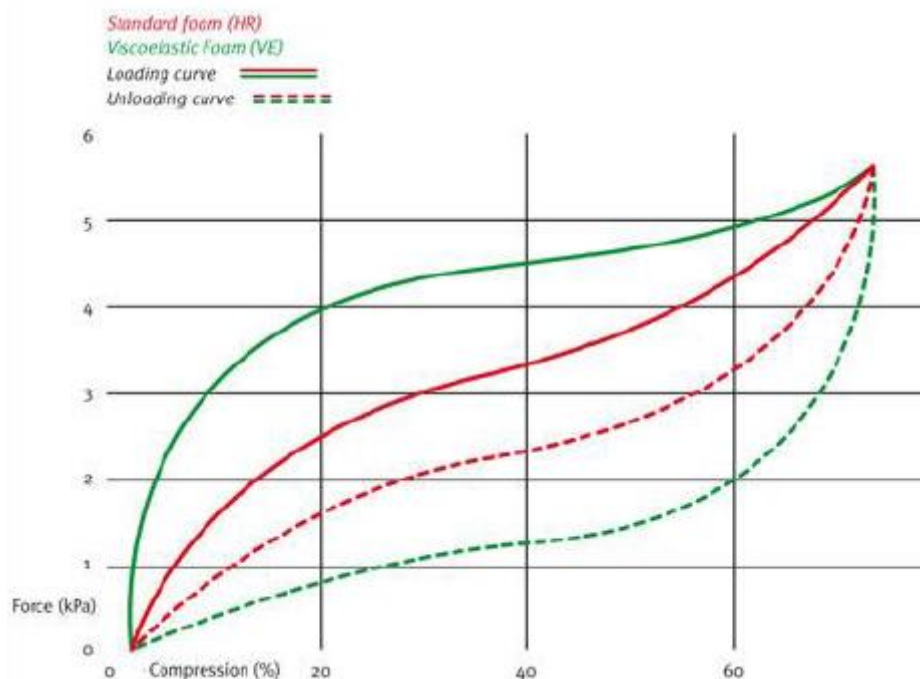
Um einen stoffspezifischen Wert ermitteln zu können, sollte der Probekörper eine homogene Struktur und vollflächig ebene, parallele Oberflächen aufweisen.

Viskoelastizität

Bestimmung viskoelastischer Kenngrößen

Welche Eigenschaften haben viskoelastische Schäume ?

- zeitverzögerte Rückstellung
- kraft- und temperaturbedingte Verformung



Ermittlung viskoelastischer Eigenschaften

Messmethode Recovery-Time:

Elektrodynamische Prüfmaschinen

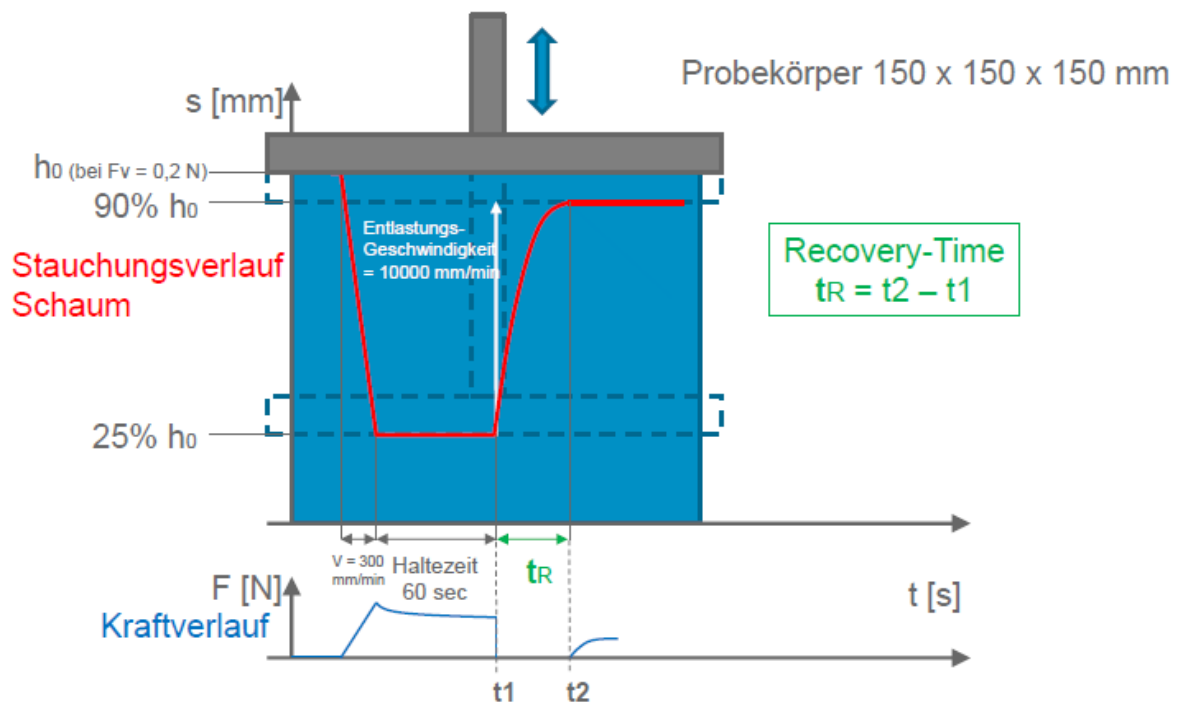
EZ005 Hub = 200 mm

$V_{\max} = 30 \text{ mm/min}$

Messwert Erfassungsrate = 500 Hz

Probekörpergröße = 150 x 150 x 150 mm

1. Referenzfahrt zum Nullen des Plattenabstandes
2. Einlegen der Probe
3. Messen der Probendicke h_0 (100 mm/min, Kraftanstieg um 0,2 N)
4. 10 Vorzyklen bis 10% der Ausgangsdicke ($v = 500 \text{ mm/min}$)
5. Wartezeit von 120 sec
6. Stauchen auf 25% der Ausgangsdicke mit $v = 300 \text{ mm/min}$
7. 60 Sec. Im gestauchten Zustand verharren → Timestamp T1
8. Rückfahren auf 90% der Ausgangsdicke ($v = 10000 \text{ mm/min}$)
9. Warten auf Probekörperkontakt / +0,2 N → Timestamp T2 (Kraftanstieg um 0,2 N)
10. Recoverytime = $T_2 - T_1$



Verbindungselemente

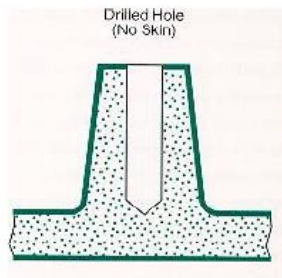
Lösbar	Schraubverbindung
bedingt lösbar	Schnappverbindung
nicht lösbar	Kleiverbindung

Schraubverbindungen

Merkmale:

- Verbinden von Fertig- und Montageteilen
- einfache Befestigung
- leichte Austauschbarkeit

Direkte Schraubverbindung



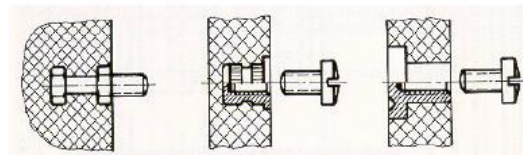
Vorbohrung



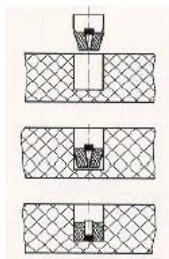
Vorformung
(höhere
Auszugsfestigkeit)

Schraubverbindung mit Gewindeeinsatz

eingeschäumter
Gewindeeinsatz



Expansionseinsatz



eingepresster Gewindeeinsatz



Schnappverbindung

Merkmale:

- Haken, Noppe oder Wulst werden bei der Montage kurzfristig ausgelenkt und rasten in einer Vertiefung des Verbindungspartners ein.
- Nach Ausführung des Hinterschnittes ist die Verbindung lösbar oder unlösbar.

Voraussetzung: Material mit guter Zähigkeit

Klebverbindung

Voraussetzungen:

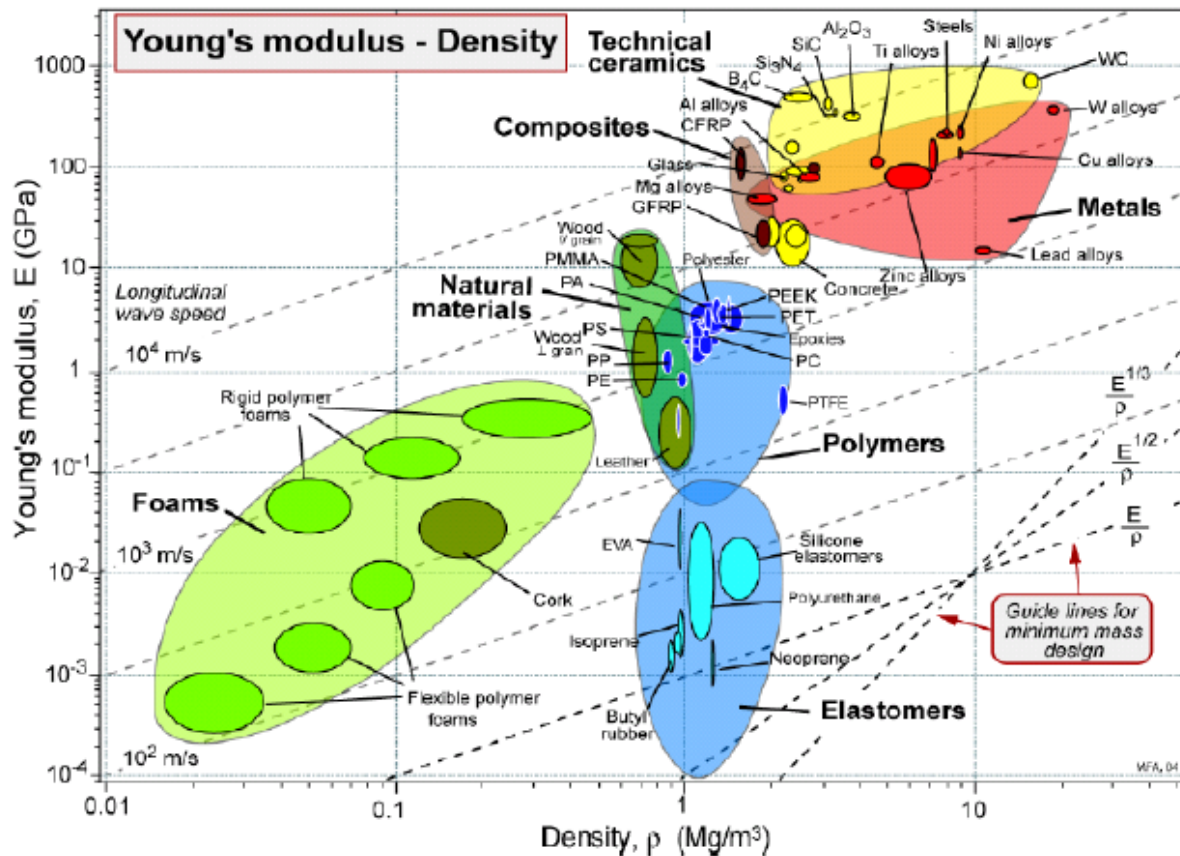
- Klebgerechte Gestaltung der Verbindung
- Vorbehandlung der zu klebenden Oberflächen
- Gute Haftung des Klebstoffes auf den Oberflächen
- Festigkeit der Klebstoffschicht
- Fixieren und Pressen der Klebverbindung

Zusammenfassung/Übung 7.

- Das Verarbeitungsverhalten von PUR-Systemen kann mit phänomenologischen und analytischen unterschiedlichen Methoden charakterisiert werden (z.B. Viskosimetrie, Spektroskopie)
- Bei der Gestaltung von Polyurethan-Formteilen ist deren von der Dichte abhängiges Eigenschaftsprofil zu beachten.
- Bei Polyurethan-Formwerkzeugen sind die Besonderheiten des Schaumfüllvorganges zu berücksichtigen.
- Mechanische Kennwerte für Sandwichverbundbauteile werden auf Basis von Formteilen ermittelt. Formteil-Verbindungen sind formschlüssig auszuführen, nicht kraftschlüssig.
- 2,5D-Formfüllberechnungen ermöglichen die Vorhersage von Entlüftungspositionen, Faserorientierung und des Formteilverzuges.
- 3D-Füllberechnungen sind hinsichtlich Materialmodellierung Gegenstand der Forschung und hinsichtlich Rechenprozeduren noch sehr aufwändig.
- Neben Standardprüfverfahren erfordern Polyurethan-Schäume besondere Prüfverfahren, die sich teilweise von spezifischen (Kunden-) Anforderungen ableiten (z.B. viskoelastische Eigenschaften).

8. Vernetzende Formmassen

The materials science point of view



Kunststoffklassen

	Lineare Kettenmoleküle	Thermoplaste (amorph, teilkristallin)	schmelzbar löslich bei RT weich- bis hart-zäh oder hart-spröde
	verzweigte Kettenmoleküle		
	schwach vernetzte Kettenmoleküle	Elastomere	nicht schmelzbar quellbar unlöslich bei RT im elastisch weichen Zustand
	stark vernetzte Kettenmoleküle	Duroplaste	nicht schmelzbar nicht quellbar nicht löslich bei RT im allg. hart

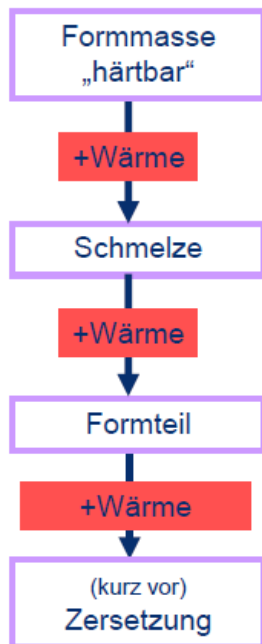
Vernetzende Kunststoffe

Basiseigenschaften vernetzbarer Kunststoffe

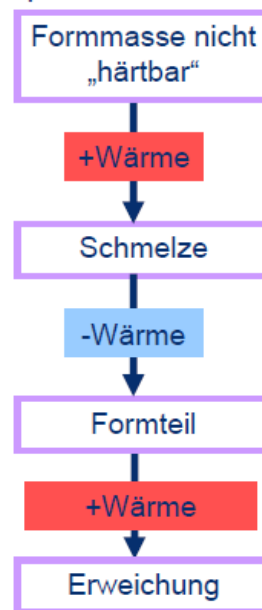
- gutes elektrisches und thermisches Isolationsvermögen
- hohe Festigkeit, Steifigkeit und Oberflächenhärte
- hohe Dimensionsstabilität, kleiner thermischer Ausdehnungskoeffizient
- hohe Temperatureinsatzgrenzen
- hohe Medienbeständigkeit, keine Spannungsrissskorrosion

- günstiges Brandverhalten ohne Flammschutzmittel
- Sicherheitsreserven bei Temperaturspitzen

vernetzende Kunststoffe



thermoplastische Kunststoffe



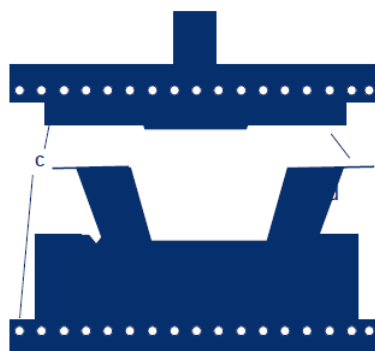
BMC – Bulk Moulding Compound

BMC ist eine sauerkrautartige Masse : Harz, Fasern Füllstoffe, Additive

Pressen von vernetzenden Formmassen

Rohmaterial erwärmt sich und die Vernetzung startet

Ist die Vernetzung abgeschlossen, kann die Form wieder geöffnet und das Formteil aus der Kavität herausgenommen werden.

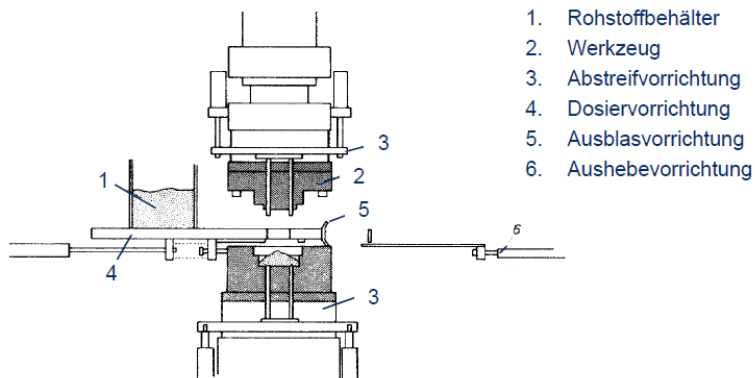


- a = Rohling
- b = Werkzeug
- c = Heizplatten
- d = Austriebsnuten

Das überlaufende Material, welches den Grat bildet, ist notwendig! Es stellt den für den Prozess wichtigen Nachdruck sicher!

Pressen von Duroplasten

1. Beschicken



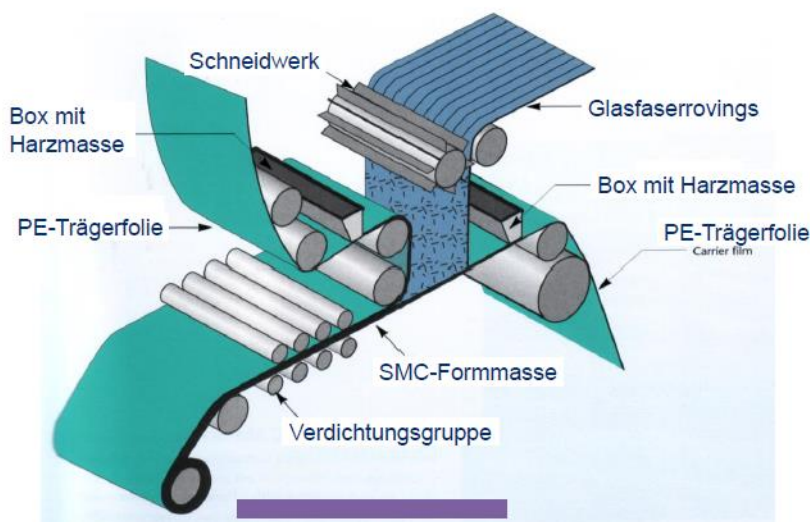
2. Pressen

3. Ausdrücken – Abstreifer fährt ein

4. Abstreifen

SMC

Mattenherstellung



Faserorientierung



SMC-R
mit unge-
richteten Fasern



SMC-D
mit gerichteten
Langfasern



SMC-C
mit gerichteten
Endlosfasern



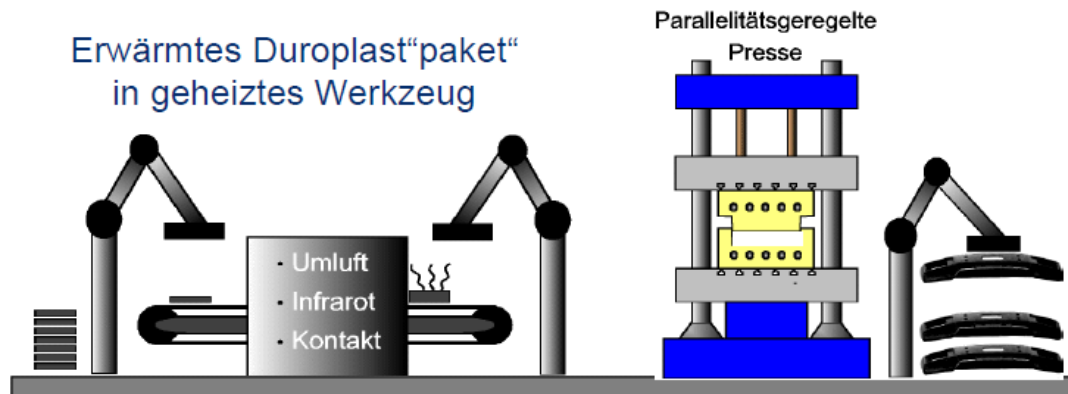
SMC-D/R



SMC-C/R

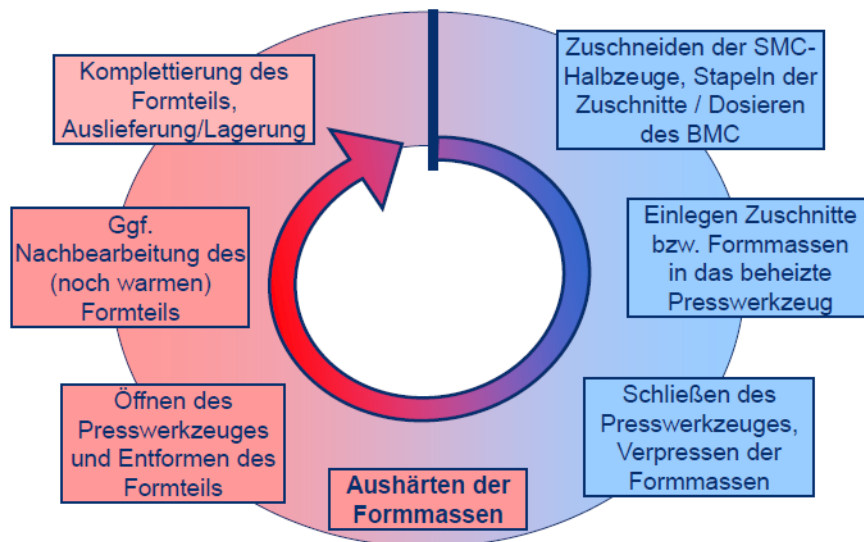
Verarbeitung

Bei den Formstoffen SMC (vom engl. Sheet Moulding Compound) handelt es sich um Formstoffe, die aus einem (oder mehreren) ungesättigten Polyesterharz(en), Verstärkungsfasern (z.B. Glasfasern) und Füllstoffen bestehen.

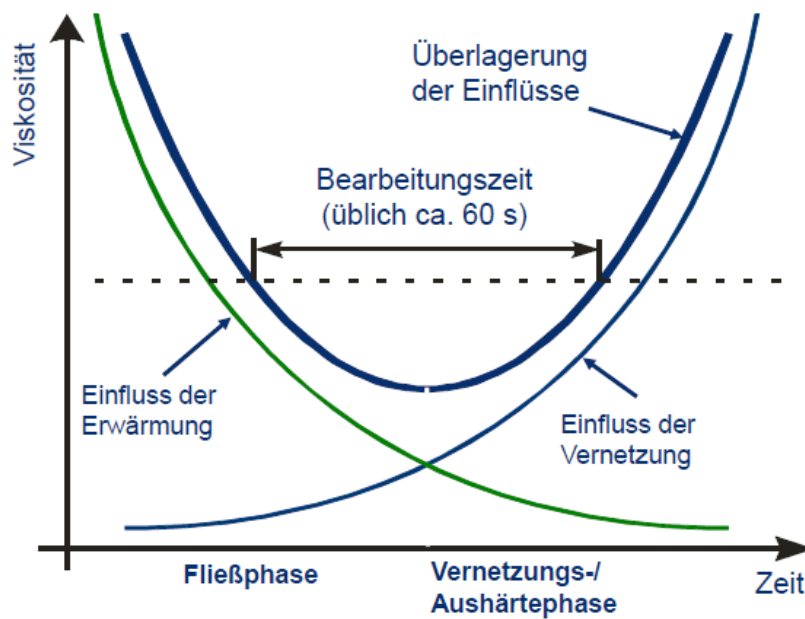


Pressen von SMC/BMC

Prinzipieller Aufbau



Fließ-/Härtungsverhalten von SMC/BMC



Viskositätsverlauf einer Pressmasse

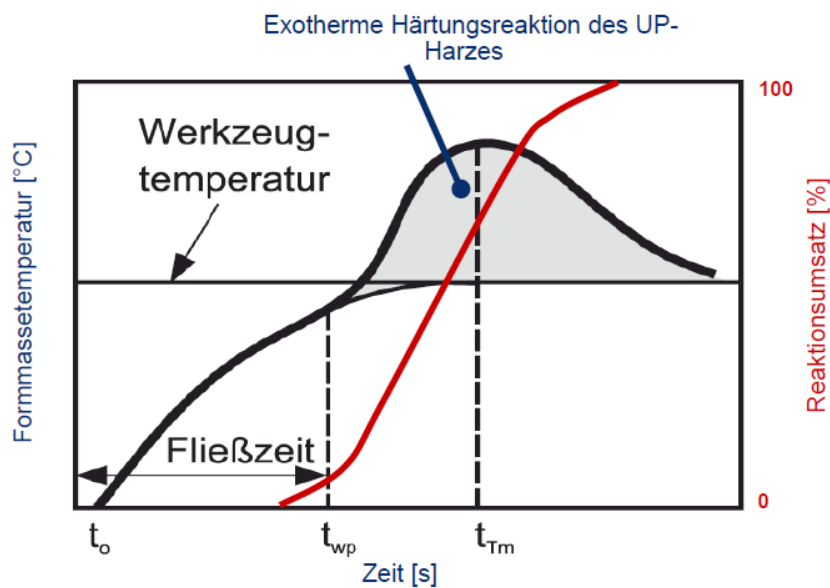
Bei der Verarbeitung von Duroplasten erfolgt die Erstarrung der Formmasse durch Vernetzung nach Wärmezufuhr.

Beim Pressen von Duroplasten wird das Vorprodukt zunächst erwärmt, so dass es fließfähig wird und das Material verpresst werden kann.

Gleichzeitig wird jedoch der Vernetzungsvorgang angeregt, wodurch die Fließfähigkeit wieder abnimmt.

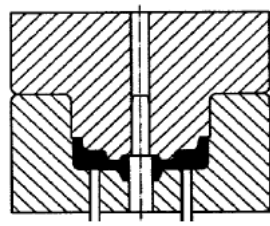
Für das Pressen der duroplastischen Formmasse bleibt somit nur ein begrenztes Verarbeitungsfenster, in dem das Formteil seine endgültige Gestalt erreicht haben muss.

Härtungsverlauf

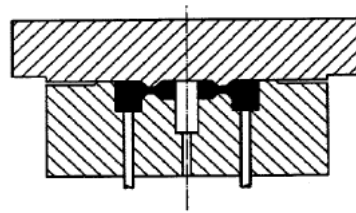


Presswerkzeuge für die SMC/BMC-Verarbeitung

Beim Pressen werden üblicherweise Tauchkanten- oder Überlaufwerkzeuge verwendet.



**Füllraumwerkzeug
(Tauchkantenwerkzeug)**



Überlaufwerkzeug

- Tauchkantenwerkzeuge besitzen eine gut dichtende Trennebene und benötigen eine genaue Dosierung der Formmasse, da ein Überschuss nicht entweichen und eine Unterdosierung zu Lunkern führen kann.
- Überlaufwerkzeuge erfordern eine weniger genaue Dosierung, da Überschuss, mit dem bei solchen Werkzeugen grundsätzlich gearbeitet wird, entweichen kann.

Sheet Moulding Compound

Vergleich zu thermoplastischen Bauteilen (GMT)

GMT -> Glasfasermatten-Thermoplast

Pressen mit thermoplastischer Matrix

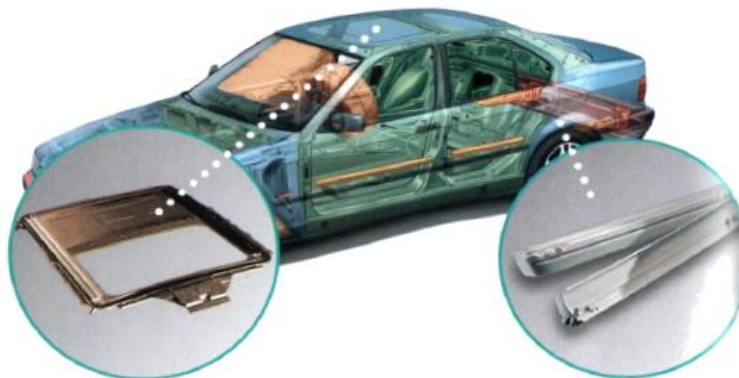
Vorteile

- schwer entflammbar (flammgeschütztes SMC brennt nicht, schmilzt nicht und tropft nicht)
- höhere Steifigkeit
- höhere Temperaturstabilität
- bessere Lackierbarkeit (GMT meist mit PP Matrix)

Nachteile

- höhere Dichte als GMT
- höhere Materialkosten als GMT

SMC – Vorteile

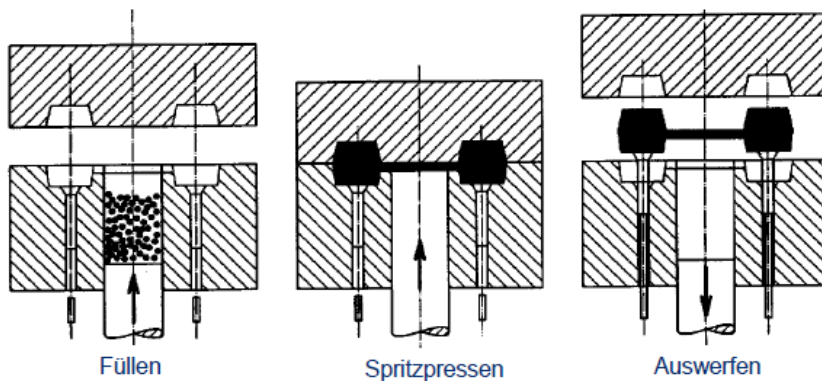


Sonnendach aus SMC:
25 % Gewichtsersparnis
Integration von Funktionen
1 Bauteil ersetzt 20 Metallbauteile
Gestaltungsfreiheit (cw-Wert)

Stoßfänger aus SMC:
Gestaltungsfreiheit
geringere Investitionskosten
keine Korrosion
geringes Gewicht
hohe Festigkeit bei Stoß

Spritzpressen vernetzender Kunststoffe

Beim Spritzpressen wird beim Pressen durch einen Stempel Vorprodukt in die Kavität gespritzt.



Vorteile

- gleichmäßigere und schnelleren Erwärmung des Materials
- genauere Dosierung gegenüber Pressen

Nachteile

- richtungsabhängige mechanische Festigkeiten einstellen
- höherer Materialverbrauch

Spritzgießmaschine

- Beim Spritzgießen von vernetzenden Kunststoffen, erfolgen Formgebung und Vernetzung in einem Verarbeitungsschritt und laufen fast zeitgleich ab.
- Die Form wird innerhalb weniger Sekunden gefüllt und anschließend wenige Minuten bei Temperaturen von meist 180 bis 200 °C vernetzt.
- Einspritzt wird in der Regel eine Komponente, die Vernetzungschemikalien beinhaltet und bei Wärmezufuhr die Reaktion startet.

Spritzgießen vernetzender Kunststoffe

- Da vernetzbare Polymere bei der Verarbeitung ihre chemische Struktur ändern, hat die Verarbeitungszeit einen enormen Einfluss.
- Die Vorprodukte werden als körniges Haufwerk und z.B. Schnitzmassen klebriger Konsistenz eingefüllt.
- Reagierende Massen werden bei Kontakt mit der Werkzeugwand besonders niedrigviskos, aufgrund der anfangs noch niedrigen Molmasse. Grate können sich bilden.
- In den Werkzeugen entstehen oft starke Rückstände.
- Werkzeuge und Plastifizieraggregate verschleßen durch Füllstoffe und chem. Korrosion
- Die Rohstoffe sind beschränkt lagerfähig. Sie können zum einen anvernetzen oder zum anderen durch Feuchtaufnahme inaktiv werden.

Spritzgießen von Silikon

Flüssigsilikone (LSR = Liquid Silicon Rubber)

Für LSR - Spritzguss werden Spritzgussanlagen verwendet, die den konventionellen Spritzgussanlagen stark ähnlich sind.

Anwendung

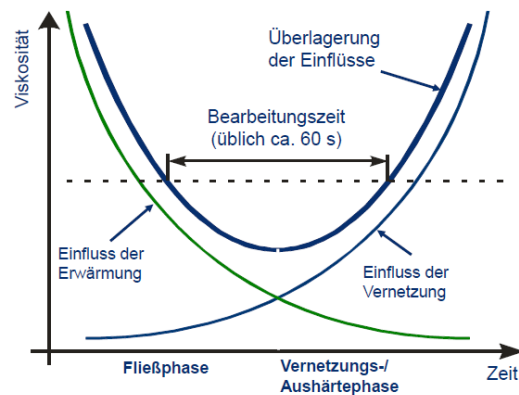
Silikone werden verwendet bei

- hohen Einsatztemperaturen
- hoher Witterungsbeständigkeit
- sehr guter chemischer Resistenz
- guten physiologischen Eigenschaften

Zusammenfassung/Übung 8.

- Erklären sie den Viskositätsverlauf über die Zeit einer Duromeren Formmasse während der Formgebung.

->



- Was ist der Unterschied zwischen der Vulkanisation eines Elastomers und der Vernetzung eines Duroplastes?

->

Elastomer: Polymer wird durch ein Vulkanisationsmittel (Schwefel) unter Wärmzufuhr vernetzt, Duromer: Vernetzung mit/ohne Härter, Temp hilft ist aber nicht notwendig

- Weshalb kommt es im Spritzgießverfahren mit Duromeren eher zur Gratbildung als mit Thermoplasten?

->

Viskositätsverlauf, kein Erstarren an der Wkz-wand während des Einspritzens

- Welche Bedeutung hat die Überlaufkammer eines Presswerkzeuges für das zu fertigende Bauteil?

->

Grat gut entfernbar, definierter Grat, Luft kann gut entweichen, stellt in gewisser Weise den Nachdruck sicher

- Was bedeutet SMC und was BMC? Aus welchem Grund eignet sich welches Verfahren zur Herstellung von Heckklappen?

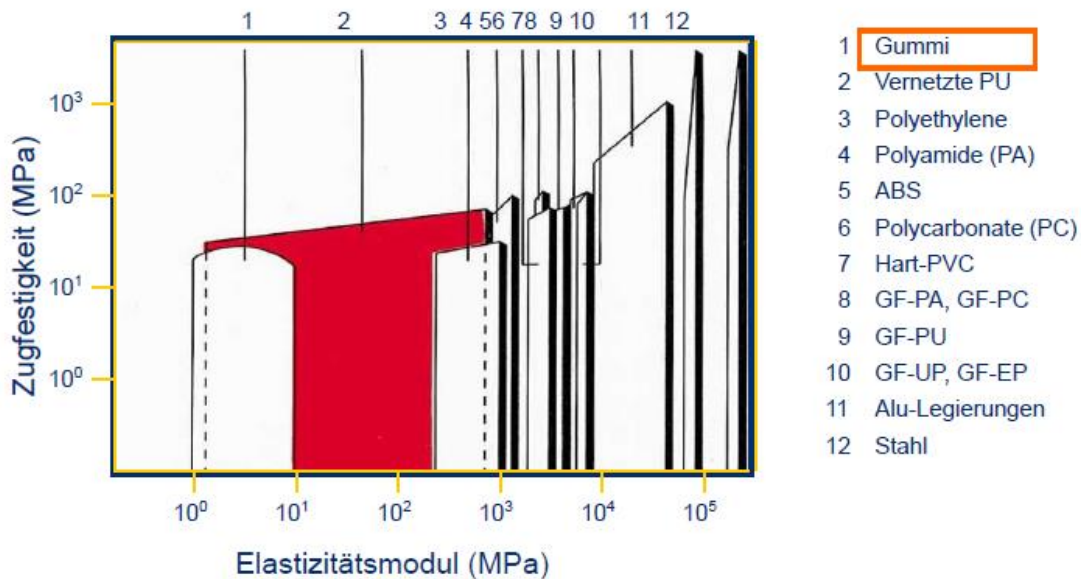
->

- SMC (vom engl. Sheet Moulding Compound) handelt es sich um Formmatten, die aus einem (oder mehreren) un-gesättigten Polyesterharz(en), Verstärkungsfasern (z.B. Glasfasern) und Füllstoffen bestehen
- BMC (vom engl. Bulk Moulding Compound) handelt es sich um Formmassen, die aus einem (oder mehreren) un-gesättigten Polyesterharz(en), Verstärkungsfasern (z.B. Glasfasern) und Füllstoffen bestehen
- Zuschnitt entspricht eher der Form (flach, Schale), kurze Fließwege, hohe Produktivität

9. Elastomerverarbeitung I

Kautschuke und Elastomere

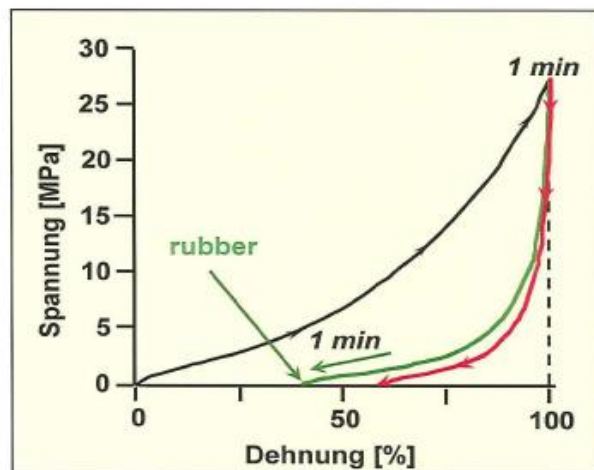
Elastizitätsmoduli verschiedener Werkstoffe



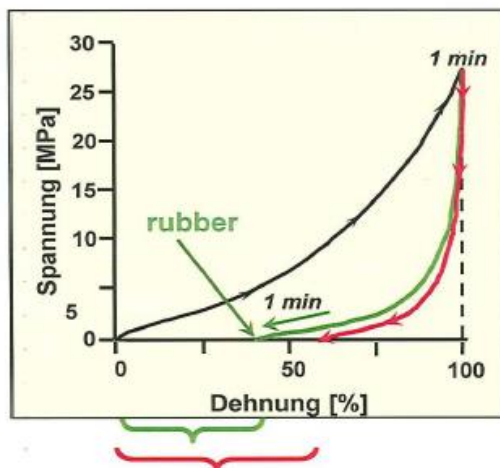
„Standard Terminology Relating to Rubber“ (ASTM D 1566 - 98)

rubber, *n*-a material that is capable of recovering from large deformations quickly and forcibly, and can be, or already is, modified to a state in which it is essentially insoluble (but can swell) in boiling solvent, such as benzene, methyl ethyl ketone, or ethanol toluene azeotrope.

DISCUSSION - A rubber in its modified state, free of diluents, retracts within 1 min to less than 1,5 times its original length after being stretched at room temperature (18 to 29°C) to twice its length and held for 1 min before release.



Ursachen für die „bleibende Dehnung“

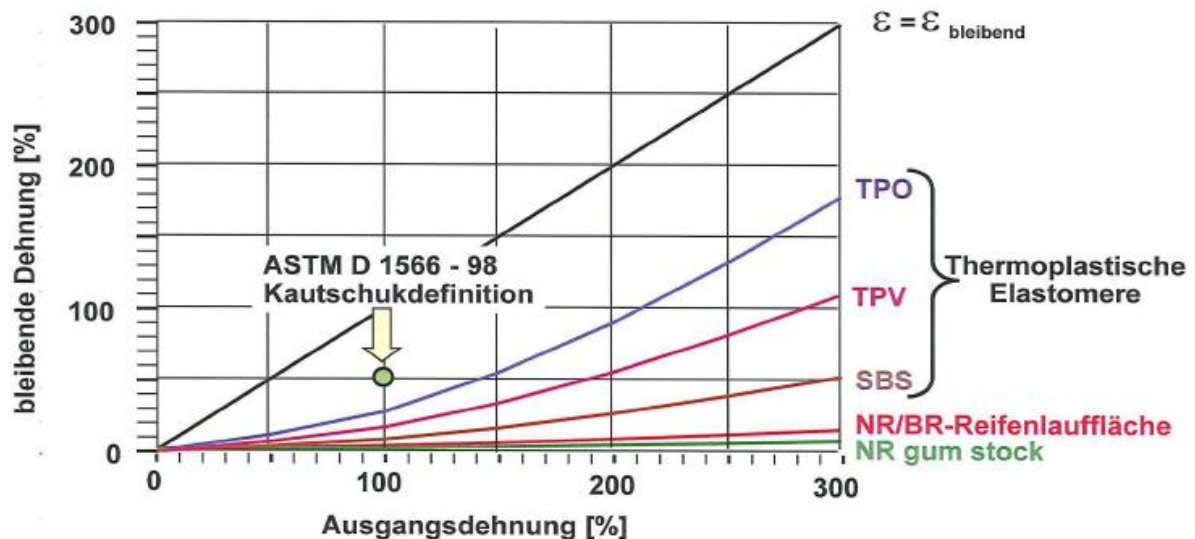


Bleibende Dehnung oder tension set

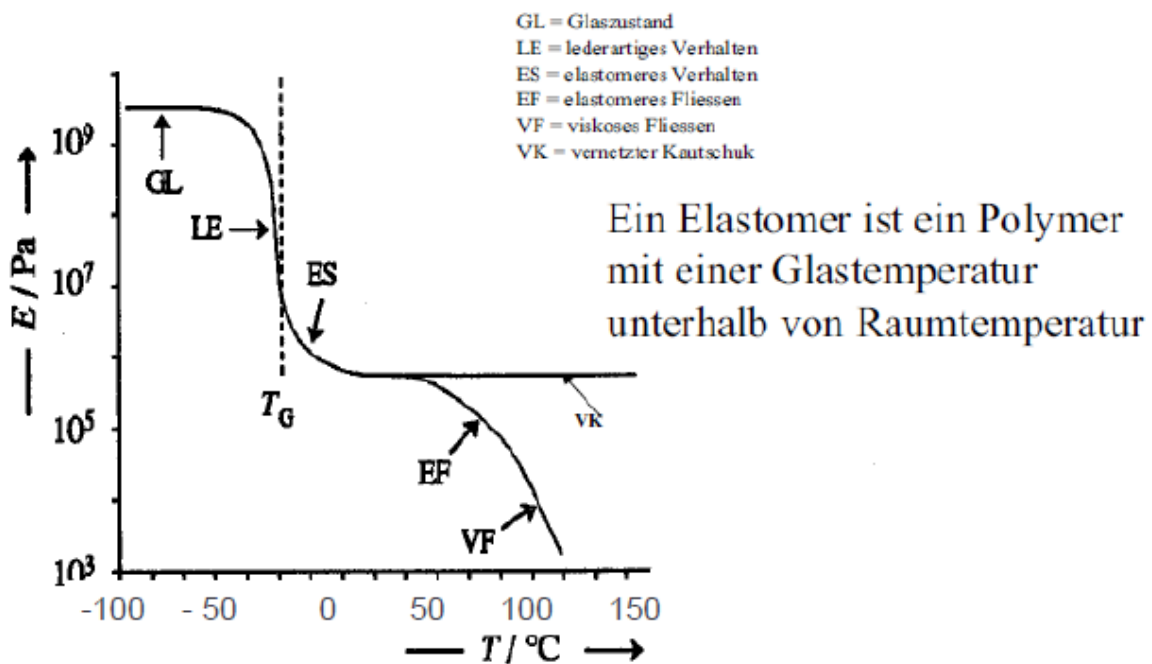
Irreversible (unelastische) Vorgänge bei Spannungs / Dehnungs- bzw. bei Kompressions-Belastung

- Niedrige bzw. unzureichende Netzwerkdicke
- Instabile Netzknoten (physikalische Vernetzung)
- Abgleiten adsorbierter Netzketten von Rußoberfläche etc.
- Zerstörung des „Rußnetzwerks“
- Irreversibles oder plastisches Fließen „starrer“ Polymerketten
- Schlechtes Netzwerk mit vielen freien Kettenenden
- Inhomogenes Netzwerk
- Dehnungskristallisation
- Reißen maximal beanspruchter Netzbögen

Vergleich vulkanisierter Kautschuke mit thermoplastischen Polymeren



Glasübergang bei Elastomeren



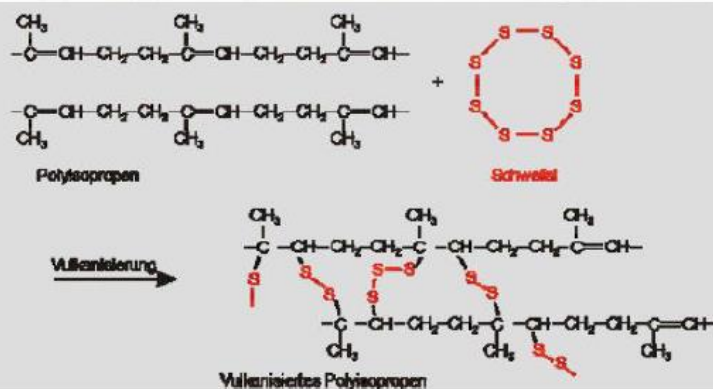
Beschreibung Kautschuk und Elastomer

- Ein Kautschuk ist ein unvernetztes, amorphes oder kristallines Polymer (natürlich oder synthetisch) mit einer Glastemperatur der Hauptkette $<$ Gebrauchstemperatur.
- Ein Thermoplast ist ein unvernetztes Polymer (natürlich oder synthetisch) mit einer „Erweichungstemperatur“ (T_g oder T_m) $>$ Gebrauchstemperatur.
- Vulkanisierten Kautschuk (oder Vulkanisat, Elastomer, Gummi) erhält man durch die chemische Vernetzung (Vulkanisation) von Kautschuk.
- Thermoplastische Elastomere (TPE) sind physikalisch vernetzte Kautschuke / Thermoplaste

Vulkanisation

Beispiel cis-Polyisopren

- Methode zur dreidimensionalen Vernetzung von Kautschuk.
- Schwefel spendende Stoffe (Dischwefeldichlorid (S_2Cl_2)), Peroxide, Metalloxide, energiereiche Strahlung.
- Langkettige Kautschukmolekülen werden durch Schwefelbrücken vernetzt; Übergang der Kautschukmischung plastisch $\rightarrow$ elastisch.
- Elastizität abhängig von der Zahl der Schwefelbrücken (weich bis hart).



Kautschuk mit
 $n \sim 3000 - 6000$
Monomereinheiten

Die Vernetzungsreaktion läuft in der Regel bei Temperaturen zwischen 140 und 200 °C ab.

Vernetzungssystem

Das Vernetzungs- oder Vulkanisationssystem enthält alle zur Vernetzung notwendigen Komponenten.

Konventionelle Vernetzungssysteme basieren auf Schwefel und Zinkoxid.

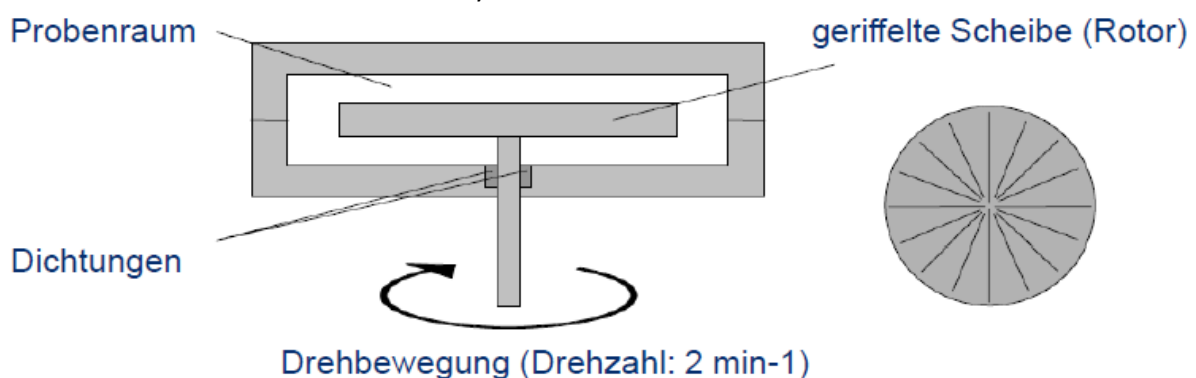
Kautschuke mit sehr geringem Restdoppelbindungsgehalt erfordern Vernetzungssysteme mit besonderen Chemikalien, wie zum Beispiel Peroxiden.

Die Zusammensetzung des Vernetzungssystems wird durch das Vulkanisationsverfahren sowie die gewünschten mechanischen und physikalischen Eigenschaften bestimmt. Aufgrund der chemisch unterschiedlichen Zusammensetzung der verschiedenen Kautschuke weichen die Vernetzungssysteme zum Teil deutlich voneinander ab.

Vernetzungsverhalten

Das Vernetzungsverhalten wird bestimmt, indem man eine beheizbare Kammer mit Kautschuk oder einer Kautschukmischung füllt und das Drehmoment für die Bewegung einer geriffelten Scheibe (Rotor) misst. Die Prüfung erfolgt meist bei 100°C.

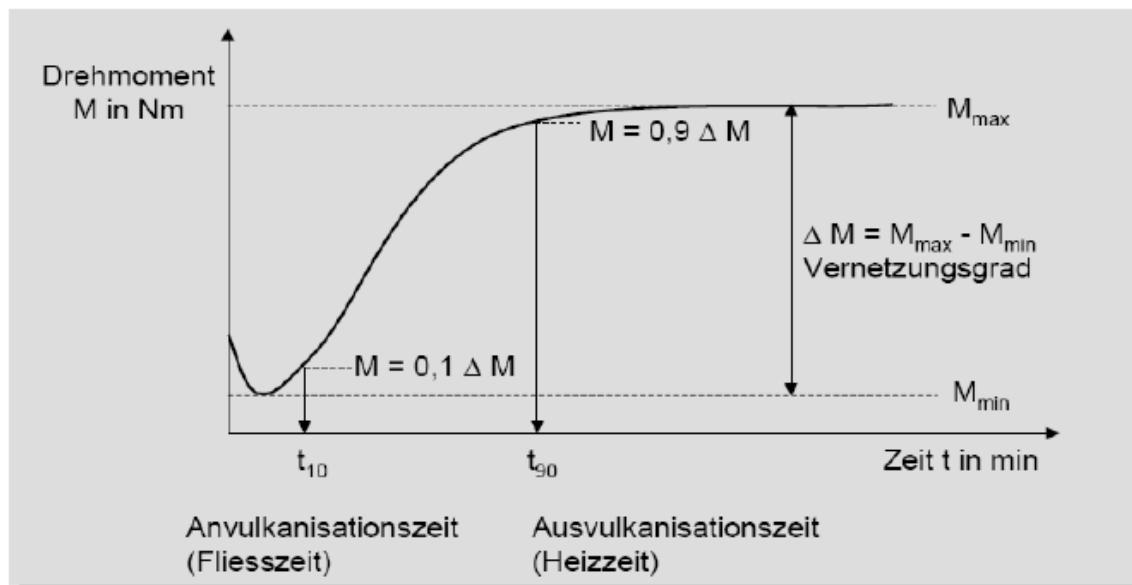
Scherscheibenviskosimeter nach Mooney:



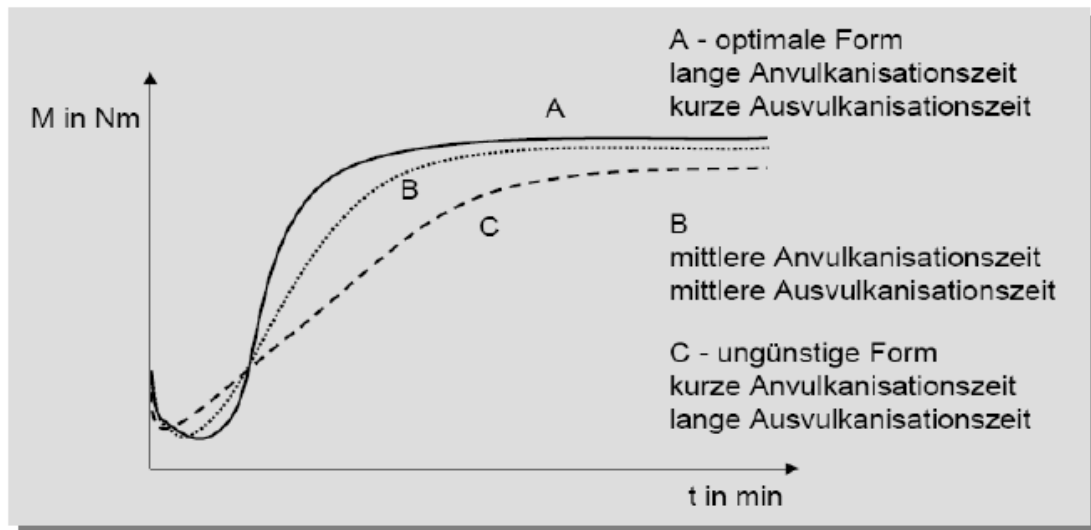
Vernetzungssystem

Rheometerkurve (Vulkanisationskurve)

Die Rheometerkurve zeigt den Ablauf der Vernetzungsreaktion:



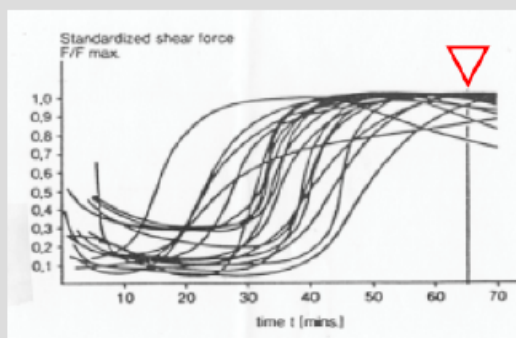
Einfluss von Vulkanisationsbeschleunigern auf die Vernetzungsgeschwindigkeit



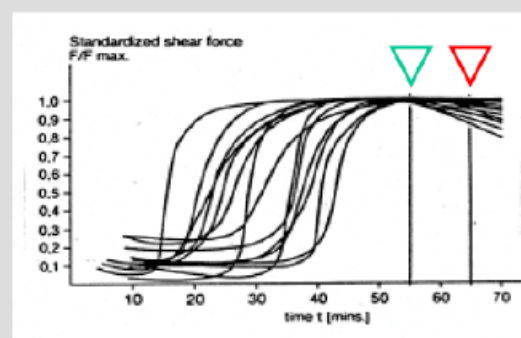
Für eine optimale Vernetzung müssen oft mehrere Vulkanisationsbeschleuniger kombiniert werden. Dies ist besonders wichtig bei Artikeln, die aus mehreren Mischungen bestehen, zum Beispiel Reifen.

Einfluss von Vulkanisationsbeschleunigern auf die Vernetzungsgeschwindigkeit

Anpassung von Vulkanisationszeiten am Beispiel der Mischungen in einem LKW-Reifen



nicht optimierte Vulkanisationssysteme:
einige Mischungen sind nach
65 Minuten über- oder untervulkanisiert.



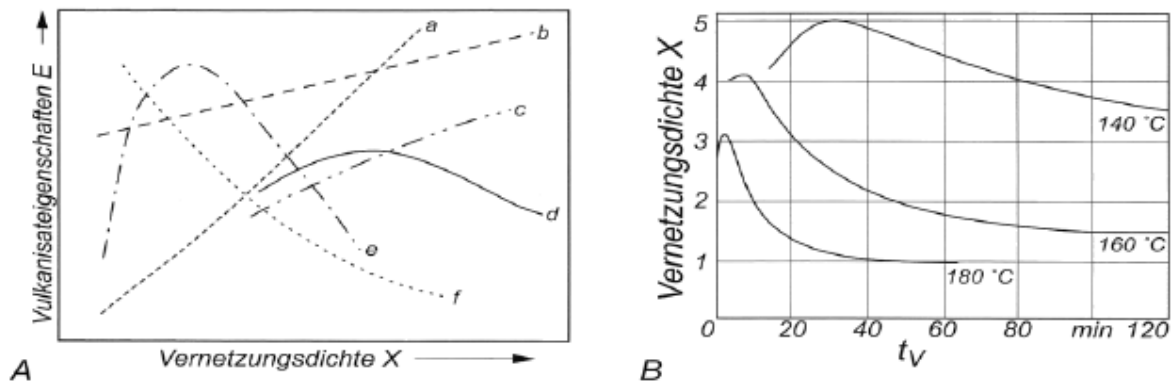
optimierte Vulkanisationssysteme:
alle Mischungen sind nach
55 Minuten optimal vulkanisiert.

Vulkanisationseigenschaften und -parameter

Vulkanisationszeit stark von Temperatur abhängig, Temperaturerhöhung um 10 K halbiert

Vulkanisationszeit -> Werkzeugtemperatur möglichst hoch, jedoch begrenzt:

- Zersetzungstemperatur des Polymers darf nicht überschritten werden
- Kautschukmischung muss vor Vulkanisation fließen
- Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von Vernetzungsdichte (abhängig von T)



A: Vulkanisationseigenschaften als Funktion der Vernetzungsdichte

a Statischer Modul, b Dynamischer Modul bei hohen Geschwindigkeiten, c Härte, d Zugfestigkeit, e Ermüdungsfestigkeit, Zähigkeit, f Hysterese, bleibende Verformung, Reibungskoeffizient

B: Temperaturabhängigkeit der Vernetzungsdichte

Anforderungen an Elastomerwerkstoffe

- Elastomerwerkstoffe haben verschiedene Aufgaben:
 - Dichten
 - Kraft übertragen
 - Medien befördern (Gase, Flüssigkeiten, Feststoffe)
 - Energie weiterleiten (die Elastomere isolieren den metallischen Leiter)
 - Dämpfen (dabei müssen die Werkstoffe flexibel bleiben)
- Elastomerwerkstoffe unterliegen vielfältigen Anforderungen:
 - gute mechanische Eigenschaften
 - hohe dynamische Belastbarkeit
 - Hitzebeständigkeit
 - Kältebeständigkeit
 - Beständigkeit gegen Kraftstoffe, Öle, Fette und Chemikalien

-> Oft werden mehrere dieser Anforderungen gleichzeitig gestellt.

-> Die zur Herstellung verwendete Kautschukmischung muss für das jeweilige Verarbeitungsverfahren geeignet sein.

Auswahl des Kautschuks

Weitere Anforderungen:

Grundsätzlich werden bestimmte (statische) mechanische Eigenschaften gefordert, wie Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Härte und Druckverformungsrest.

Artikel, die wechselnder Verformung ausgesetzt sind, wie zum Beispiel Reifen und Riemen, müssen zusätzlich eine bestimmte dynamische Belastbarkeit aufweisen.

Werkstoffe, die im Freien eingesetzt werden, müssen wetter- und ozonbeständig sein.

Viele Elastomerwerkstoffe müssen auch bei sehr tiefen Temperaturen elastisch bleiben („Kälteflexibilität“).

-> Diese Eigenschaften werden zum großen Teil vom Rezepturaufbau („Compounding“) der Kautschukmischung beeinflusst.

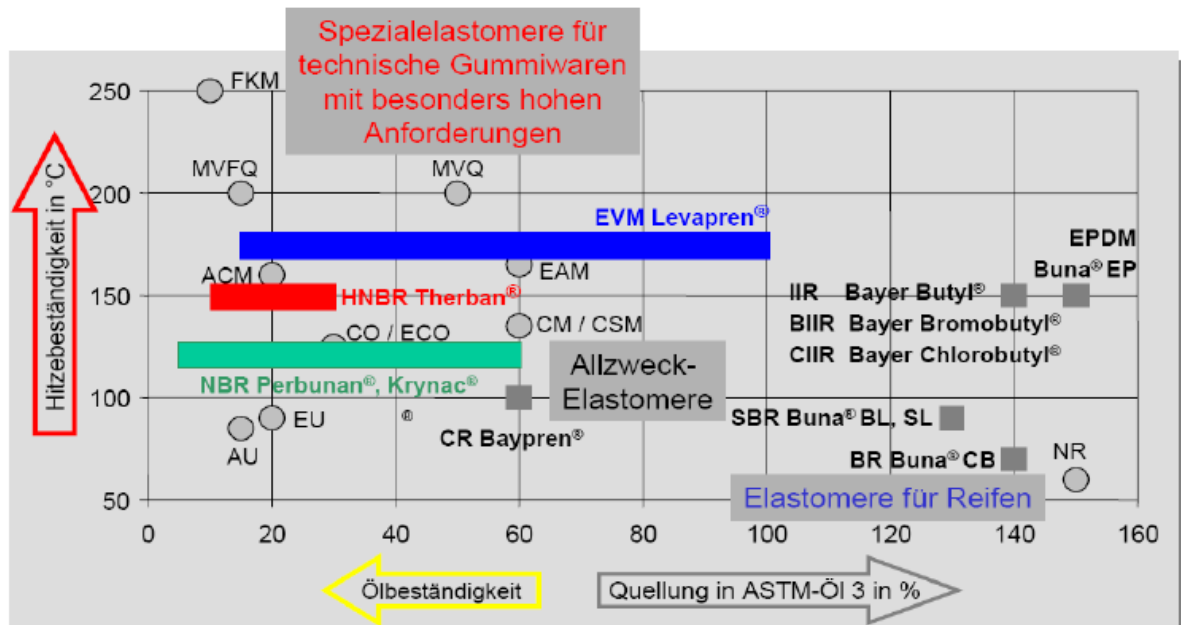
-> Neben der Wahl des Kautschuks muss die Kautschukmischung bestmöglich zusammengestellt werden.

Klassifizierung der Elastomere

Einteilung nach Hitze- und Ölbeständigkeit:

Die aus den verschiedenen Kautschuken hergestellten Elastomere werden nach ihrer Hitzebeständigkeit und ihrer Ölbeständigkeit eingeteilt.

Die Hitzebeständigkeit wird durch die Änderung typischer Eigenschaften nach Lagerung bei erhöhter Temperatur bestimmt (zum Beispiel 70 Stunden bei 100°C). Wird die Probe gleichzeitig in Öl gelagert, quillt sie mehr oder weniger stark. Je geringer die Quellung ist, desto höher ist die Ölbeständigkeit. In vielen Anwendungen müssen Elastomerwerkstoffe gegen aggressive Chemikalien beständig sein, die auch ölbeständige Elastomere angreifen. Die Ölbeständigkeit alleine ist daher kein allgemeingültiges Kriterium für die chemische Beständigkeit eines Elastomers.



Herstellung von Elastomerwerkstoffen

- Elastomerwerkstoffe werden aus Kautschuken und Kautschukchemikalien hergestellt.
-> Die Wahl der einzelnen Bestandteile der Kautschukmischung ist entscheidend für die Eigenschaften des Elastomers.
- Die einzelnen Komponenten werden sorgfältig nach bestimmten Kriterien ausgewählt und miteinander vermischt.
- Nach Formgebung und Vulkanisation entsteht der einsatzfertige Elastomerwerkstoff. Es ist nicht möglich, nach der Vernetzung (Vulkanisation) weitere Bestandteile hinzuzufügen.

Auswahl der Kautschukchemikalien

Kautschukchemikalien sind zur Herstellung eines Elastomers unbedingt erforderlich.

Man unterscheidet folgende Gruppen:

- Vernetzungssystem
- Alterungsschutzmittel
- Füllstoffe
- Weichmacher
- Verarbeitungshilfsmittel
- Spezielle Chemikalien

Alterungsschutzmittel

Alterungserscheinungen:

Alterung von Vulkanisaten kann unterschiedliche Auswirkungen haben:

- verhärten, verspröden
- erweichen
- Verlust elastischer Eigenschaften und Festigkeit

- Rissbildung
- Änderungen der Oberfläche (Abkreiden, Orangenhaut)

Diese Alterungseffekte sind hauptsächlich auf die Einwirkung von Sauerstoff, Ozon, UV-Licht, Wärme, oder Ermüdung durch dynamische Beanspruchung zurückzuführen.

Schutzwirkung:

Bei Elastomeren aus Kautschuken mit Doppelbindungen in der Hauptkette verzögern Alterungsschutzmittel die Änderung der Eigenschaften durch äußere Einflüsse. Sie

Füllstoffe und Weichmacher

Füllstoffe und Weichmacher werden hauptsächlich aus drei Gründen verwendet:

- zur Einstellung verarbeitungsrelevanter Größen
- (Mischungsviskosität; Oberflächenglätte; Spritzquellung)
- als Streckmittel zur Preisreduktion
- Erreichung bestimmter mechanischer oder dynamischer Eigenschaften wie zum Beispiel Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Härte, Elastizität, Abrieb, Heat-Build-Up; aber auch Flammwidrigkeit, elektrische Eigenschaften und andere.

Füllstoffe und Weichmacher beeinflussen Mischungs- und Vulkanisationseigenschaften meistens gegensätzlich.

Für einfache Anwendungen werden hauptsächlich inaktive (nicht verstärkende) helle Füllstoffe wie Kaolin, Kreide oder Talkum sowie Mineralölweichmacher eingesetzt.

Elastomere mit einem anspruchsvollen Niveau mechanischer oder dynamischer Eigenschaften erfordern aktive (verstärkende) Füllstoffe und Spezialweichmacher.

Die wichtigsten Füllstoffe sind Ruße unterschiedlicher Aktivität (= Verstärkerwirkung).

Spezialweichmacher (Vulkanol) werden verwendet, um beispielsweise die Elastizität zu erhöhen, aber auch, um gute Kälteflexibilität bei möglichst geringen Einbußen an die Hitzebeständigkeit zu ermöglichen.

Die ursprünglich nur für farbige Artikel verwendeten Kieselsäurefüllstoffe (Vulkasil) haben aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften zunehmende Bedeutung.

Haftmittel und Mastiziermittel

Haftmittel:

Reifen, Antriebsriemen, Förderbänder, verstärkte Schläuche, gummierte Gewebe und andere sind Verbundwerkstoffe. Sie bestehen aus Gummi und einer Verstärkung (Festigkeitsträger) aus Textil und / oder Metall.

Ohne Verstärkung würde keine Zugkraft übertragen; das Elastomer würde sich dehnen und schließlich reißen.

Mastiziermittel:

Die Mastikation dient zur Reduzierung der Viskosität von Naturkautschuk.

Synthesekautschuke werden bereits in verschiedenen Viskositätsbereichen angeboten.

Auswahl der Kautschukchemikalien

Vernetzungssystem

Diese Chemikalien beschleunigen oder verzögern die Vernetzungsreaktion.

Die Vernetzung ist Voraussetzung für die Gummielastizität und für das Erreichen der angestrebten mechanischen und dynamischen Eigenschaften.

Alterungsschutzmittel verzögern die Änderung der Eigenschaften durch äußere Einflüsse („Alterung“), zum Beispiel durch Hitze, Sauerstoff, Ozon und dynamische Belastung (Ermüdung).

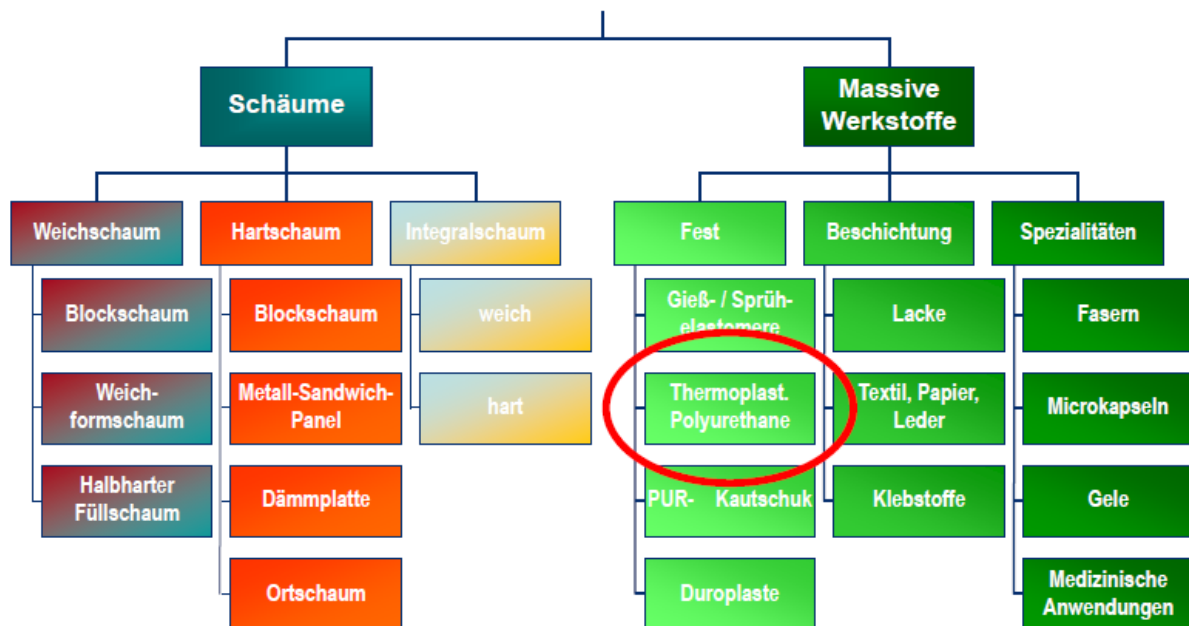
Füllstoffe ermöglichen ein technologisch sinnvolles Niveau mechanischer oder dynamischer Eigenschaften. Auch als Streckmittel verwendet.

Weichmacher erleichtern die Verarbeitung durch Absenken der Mischungsviskosität. Spezialweichmacher verbessern die Kälteflexibilität von Elastomeren.

Verarbeitungshilfsmittel optimieren das Verarbeitungsverhalten.

Spezielle Chemikalien dienen der Verbesserung der Haftung an Textil oder Metall, oder der Erhöhung der Flammwidrigkeit; daneben gibt es Treibmittel, Farbstoffe und andere.

Klassifizierung der Polyurethane



Was sind Thermoplastische Elastomere?

- Thermoplastische Elastomere sind Werkstoffe, bei denen elastische Polymerketten in thermoplastisches Material eingebunden sind.
- Sie lassen sich in einem rein physikalischen Prozess (thermoplastisch) in Kombination von hohen Scherkräften, Wärmeeinwirkung und anschließender Abkühlung verarbeiten.
- Obwohl keine chemische Vernetzung durch eine zeit- und temperaturaufwendige Vulkanisation, wie bei den Elastomeren, notwendig ist, haben die hergestellten Teile aufgrund ihrer besonderen Molekularstruktur doch gummielastische Eigenschaften.
- Erneute Wärme- und Scherkräfteinwirkung führt wieder zur Aufschmelzung und Verformung des Materials.
- Das bedeutet aber zugleich, dass die TPE weit weniger thermisch und dynamisch belastbar sind als der Gummi.

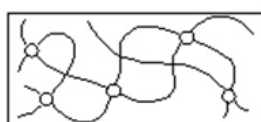
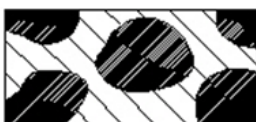
Welche TPE-Arten gibt es?

Thermoplastische Elastomere können gegliedert werden in

TPE-Blends

und

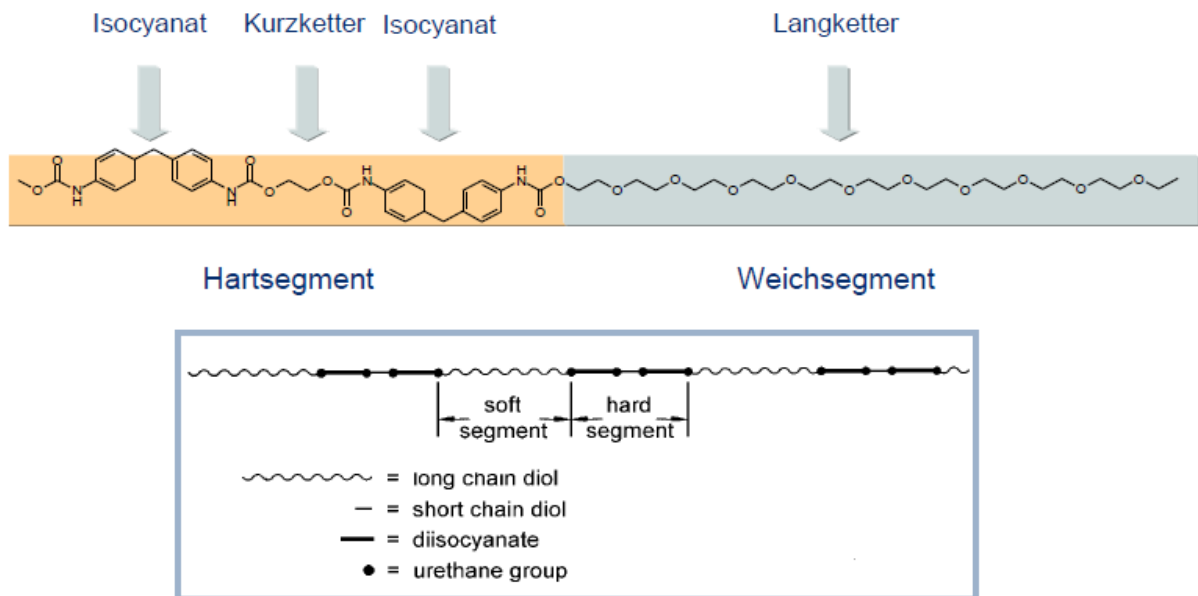
Block-Copolymere



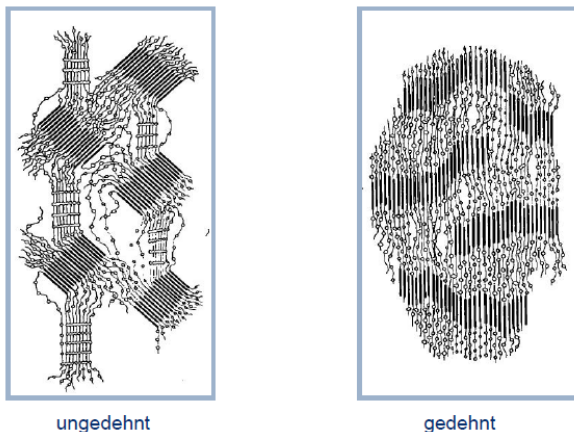
Blends sind Legierungen aus einer Kunststoffmatrix und einem weichen Werkstoff, z.B. einem Elastomer.

Block-Copolymere sind Molekülketten mit unterschiedlichen Segmenten, die sich beim Abkühlen zu „Hart“- und „Weich“-Bereichen zusammenlagern. Es gibt TPS (Styrol-Block-Copolymer), TPU (thermoplastisches Polyurethan), TPE auch als TEEE bezeichnet (thermoplastisches Polyester-Elastomer) und TPA (thermoplastisches Polyether-Polyamid).

TPU: Hart- und Weichsegmente



Phasenstruktur von segregierten Polyurethanen



Thermoplastische Elastomere

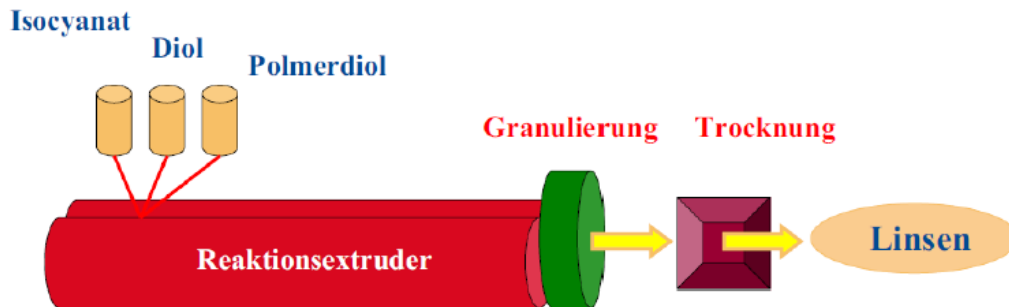
Hartsegment

- Meist kristalline Bereiche, die der thermoplastischen Verarbeitungstemperatur schmelzen
- Das Hartsegment ist bestimmend für:
 - Obere Gebrauchstemperatur,
 - Mechanische Eigenschaften
 - Thermische Beständigkeit
 - Wärmestandfestigkeit
 - Löslichkeit

Weichsegment

- Meist amorphe kristalline Bereiche, die die Hartsegmente verbinden.
- Das Weichsegment ist bestimmend für:
 - Tieftemperatureigenschaften
 - Dehnungsverhalten,
 - Reißfestigkeit
 - Steifigkeit
 - Phasenseparationsverhalten

TPU Herstellverfahren



Zusammenfassung/Übung 9.

- Ein Kautschuk ist ein unvernetztes, amorphes oder kristallines Polymer (natürlich oder synthetisch) mit einer Glasstemperatur der Hauptkette $<$ Gebrauchstemperatur. Elastomere sind vernetzte Kautschuke.
- Elastomere werden nach Hitze- und Ölbeständigkeit klassifiziert. Sie müssen auch bei tiefen Temperaturen noch elastisch sein.
- Die Eigenschaften eines Elastomeren werden auch durch verschiedene Zuschlagstoffe wie z.B. Vernetzungshilfsmitteln, Alterungsschutzmitteln, Füllstoffen und Weichmachern bestimmt.
- Die Verarbeitung von Kautschuken ist zweigeteilt: Herstellung einer Mischung z.B. auf einem Knetter und anschließende Formgebung unter Temperatureinwirkung.
- Eine wesentliche Charakteristik einer Kautschukmischung ist die Vulkanisationskurve, die mit einem Scherscheibenviskosimeter nach Mooney ermittelt wird.
- Thermoplastische Elastomere sind Werkstoffe, bei denen elastische Polymerketten in thermoplastisches Material eingebunden sind.

10. Elastomerverarbeitung II

Elastomerverarbeitung

Was ist Kautschuk?

Latex

Latex ist der milchige Saft, der direkt aus dem Kautschukbaum (*Hevea brasiliensis*) gewonnen wird (Caa-o-chu, „weinender Baum“). Es handelt sich um eine Emulsion von Kautschukteilchen in Wasser, ähnlich wie bei Milch (Fett in Wasser).

Was ist Kautschuk? - Naturkautschuk

Latex enthält etwa 30-35% Feststoffanteil (vergleichbar mit einer Milch mit 30-35% Fett). Gibt man Säure (Ameisensäure oder Essigsäure) in den Latex, flockt der feste Anteil, also der Kautschuk, aus. Dies bezeichnet man als koagulieren.

Kautschuk

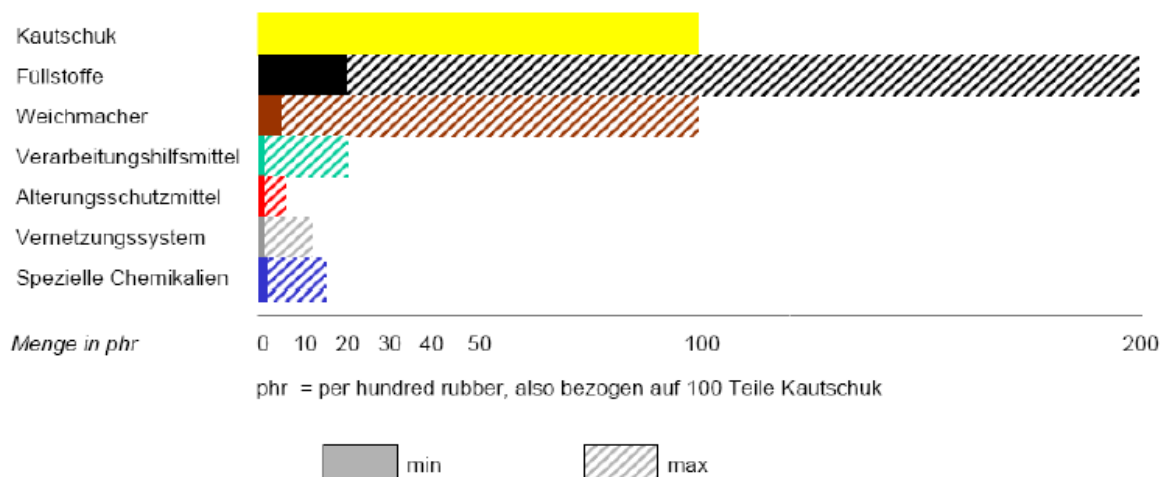
Kautschuk ist der feste Bestandteil des Latex. Nach dem Koagulieren wird der Kautschuk gewaschen, getrocknet und zu Ballen



Aufbereitung von Kautschuk

Mischen mit Kautschukchemikalien

Mischungsaufbau: Mengenverhältnis



Definition und Darstellung des Mischens

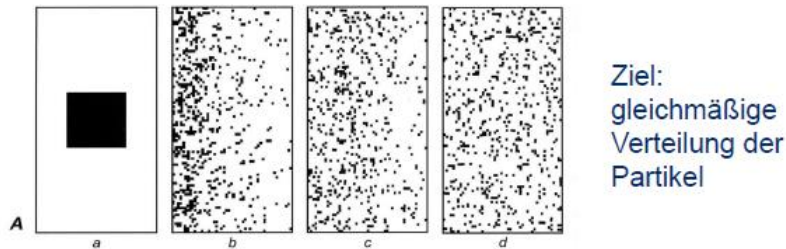
Mischen:

Verteilen / Zerteilen einer Komponente in einer anderen, wobei sich die Komponenten in ihren Eigenschaften (z.B. chem. Zusammensetzung, Aggregatzustand, Viskosität, Partikelgröße) unterscheiden.

Mischarten:

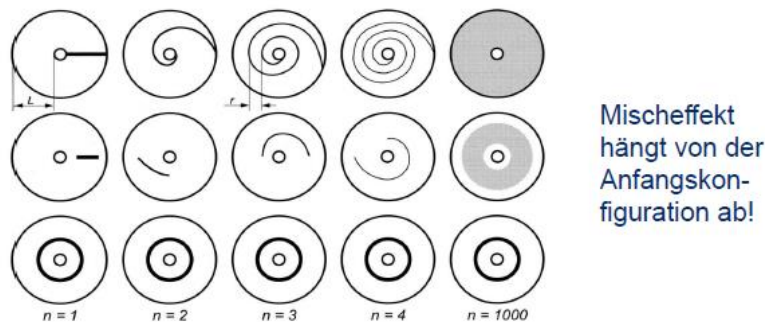
1. Distributives Mischen

- ineinander lösliche Flüssigkeiten oder Feststoff/Feststoffsysteme
- Kräfte bewegen Komponenten gegeneinander und vermischen diese
- statistischer Prozess, bei dem Partikel ihre Größe nicht ändern:



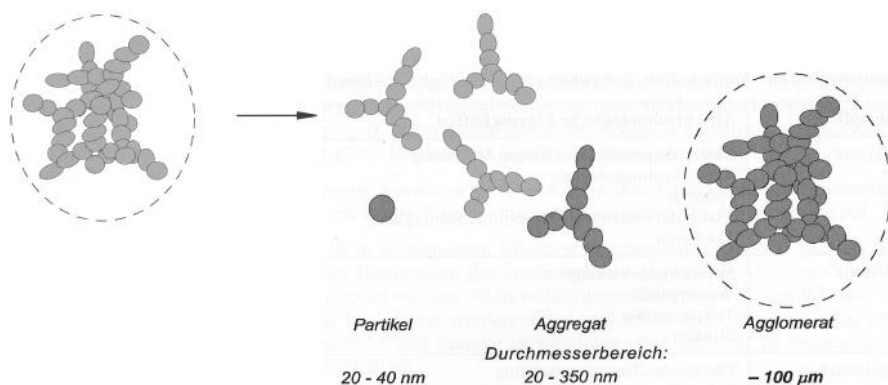
2. Laminares Mischen

- viskoelastische Flüssigkeiten
- Deformation der Komponenten im Strömungsfeld (Scherung/Dehnung)
- Dicke/Abstand der Schichten sinkt
- aber: gemeinsame Oberfläche vergrößert sich
- keine eigentliche Vermischung wie bei dem distributiven Mischen



3. Dispersives Mischen

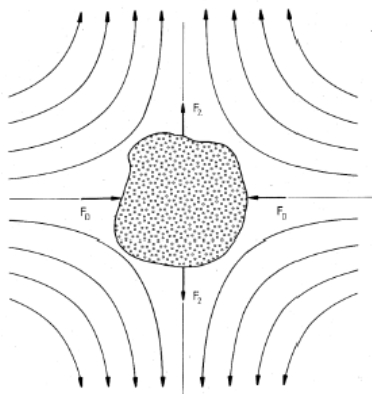
- Feststoffpartikel aufbrechen und in kleinste Einheiten zerbrechen
- z.B. Einmischen verstärkender Füllstoffe, insbesondere Ruße:
 1. Zerteilen durch dispersives Mischen
 2. Verteilen durch distributives Mischen



Darstellung des Mischens

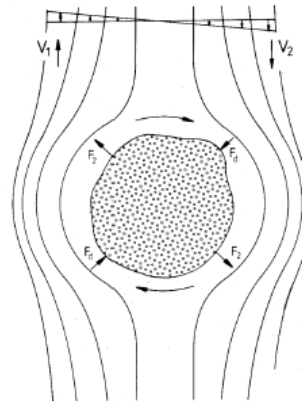
Scher- und Dehnströmungen

Dehnströmung:



- ⇒ Zerteilen des Agglomerates
- ⇒ i.a. weitaus effektiver für das Dispergieren!

Scherströmung:



- ⇒ Scherung des Agglomerates
- ⇒ Rotation: **Gefahr der Reagglomeration**
- ⇒ Strömungsumlenkung erforderlich

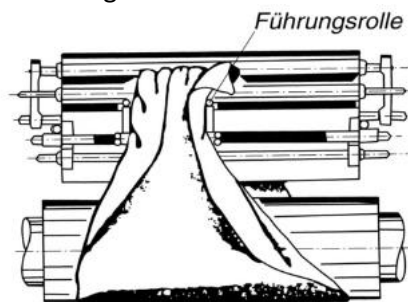
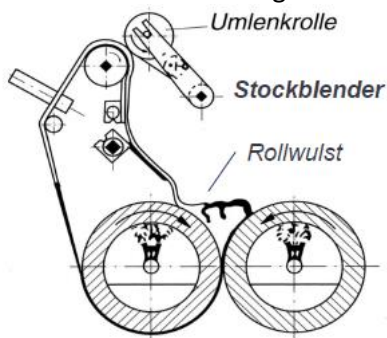
Produktionsmischmaschinen haben daher immer komplexe Strömungsfelder mit beiden Strömungsanteilen!

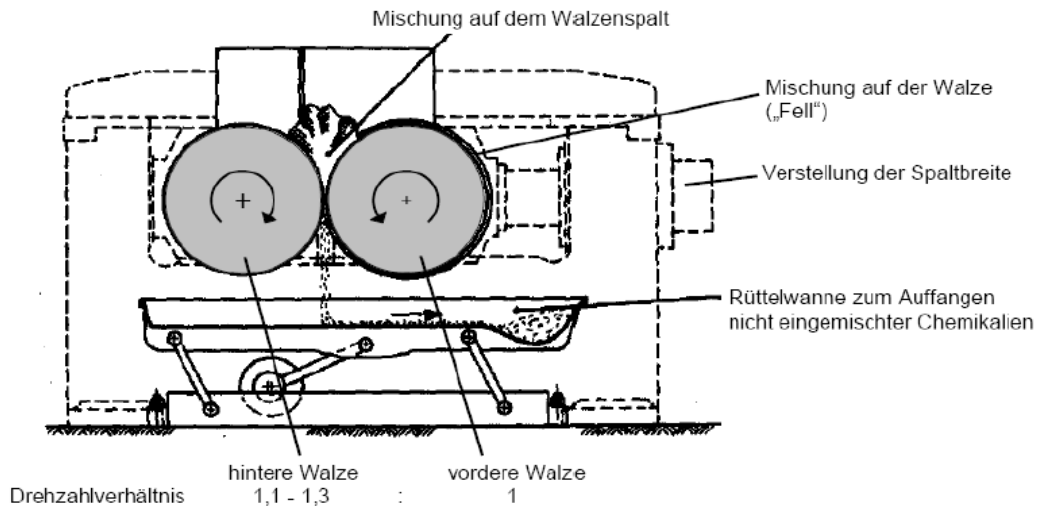
Die Verarbeitung von Kautschuk

Mischen

Mischwalzwerke:

- zwei hintereinander angeordnete temperierte Walzen
- Walzen laufen mit unterschiedlicher Drehzahl
- dispersives Mischen im Mischspalt und distributive Verteilwirkung im Rollwulst
- Mischungsfell läuft auf langsamer Walze (Vorderwalze)
- Stockblender zur Temperaturerniedrigung und Vergleichmäßigung
- Batchgewichte zwischen 10 kg und 100 kg je nach Walzwerkgröße
- Grund- und Fertigmischen oft in einem Arbeitsgang
- Mischprozess dauert i.a. zwischen 15 und 40 min. -> teuer -> Innenmischer
- Einsatz oftmals als Fertigmischer oder Homogenisierwalzwerk





Innenmischer (Kneteter):

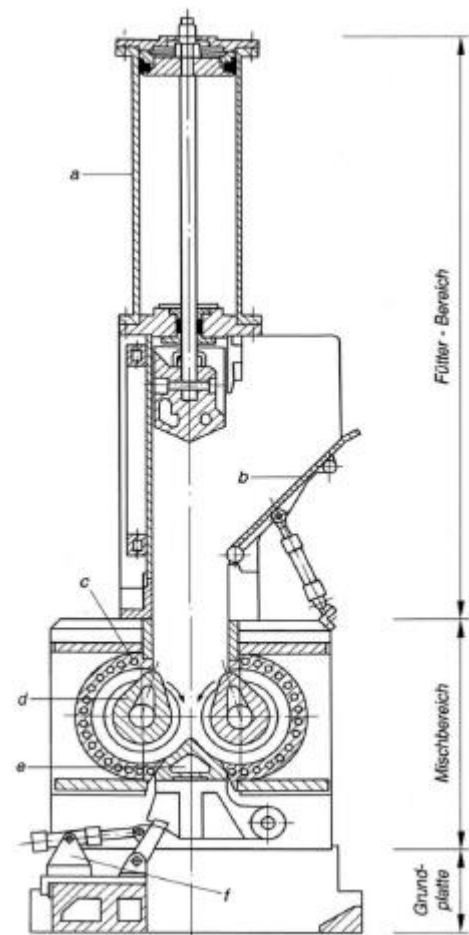
- Mischprozess in geschlossener, gekühlter Kammer (c)
- zwei gegenläufige Rotoren mit gekühlten Knetelementen (d)
- Druckzylinder / -stempel (a), der Drücke von 2 – 12 bar auf das Mischgut ausübt
- Einfüllschacht (b) mit Klappe
- Entleerungsöffnung (e) mit Schließmechanismus (f)
- Fassungsvermögen:
 - Laborkneteter: 1 – 6 l
 - Großkneteter bis 650 l

Vorteile

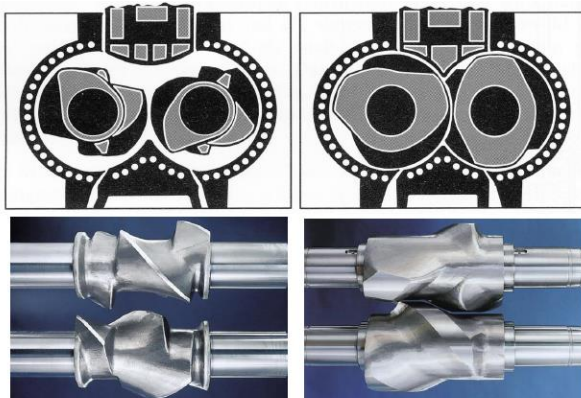
geschlossene Mischkammer -> geringere Staubbelastung

wesentlich kürzere Mischzeiten -> größerer Ausstoß

bessere Automatisierbarkeit -> bessere Reproduzierbarkeit



Rotorbauarten



Tangierende Rotoren

Kämmende Rotoren

Die Knetschaufeln erzeugen einen laminaren, dispersiven und distributiven Mischeffekt:

- Das Material wird durch die schraubenförmigen Rotoren in Längs- und Umfangsrichtung sowie durch den Walzenspalt transportiert
- dispersiv: Scherströmung beim Passieren des Walzenspaltes
- laminar, distributiv: Masseteilung und –umlegung in der Mischkammer



Tangierende Rotoren:

- Drehzahl unterschiedlich einstellbar
→ Friktion
- gut bei großer Mengenleistung:
 - schnelle Beschickung
 - schnelle Entleerung
 - Schnelle Füllstoffearbeitung



Kämmende Rotoren:

- Zwangsförderung des Mischgutes
- Größeres Oberflächen/Volumenverhältnis
→ besseres Temperaturverhalten
- gut bei problematischen Mischungen

Die Verarbeitung und Vulkanisation von Kautschuk

Formgebung und Vulkanisation

Die Kautschukmischung enthält alle Komponenten die erforderlich sind, um das Elastomer herzustellen.

Sie wird durch geeignete Verfahren verformt, wobei sie die Gestalt des Fertigartikels erhält.

Damit diese Form erhalten bleibt und aus der plastischen (verformbaren) Mischung das Elastomer (der „Gummi“) entsteht, muss der Kautschuk vernetzt werden.

Die Vernetzung findet in der Regel bei hoher Temperatur (140 bis über 200°C) statt und wird Vulkanisation genannt.

Herstellung von Elastomerformteilen

Diskontinuierliche Herstellverfahren von Elastomerformteilen

- Im Gegensatz zu extrudierten Profilen und kalandrierten Bahnen: dreidimensionale Teile
- Herstellung in einem Werkzeug mit negativer Teilekontur
- isotrope Formteile oder Verbunde mit Festigkeitsträgern (Stahl, Kunststoff)

Grundverfahren, abhängig von Komplexität, Anforderungsprofil, Werkstoff und Losgröße:

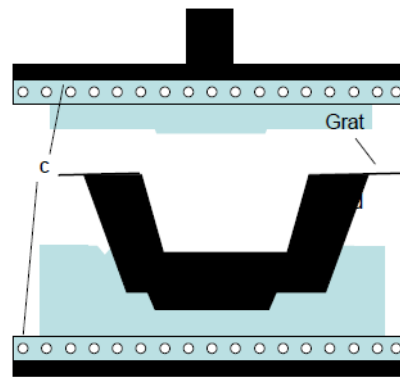
- Pressverfahren (CM = Compression Molding)
- Transferpressen (TM = Transfer Molding)
- Spritzgießverfahren (IM = Injection Molding)

Pressen von Kautschuk

Compression Molding:

Rohmaterial erwärmt sich und Vulkanisationsprozess startet

Ist die Vulkanisation abgeschlossen, kann die Form wieder geöffnet und das Formteil aus der Kavität herausgenommen werden.



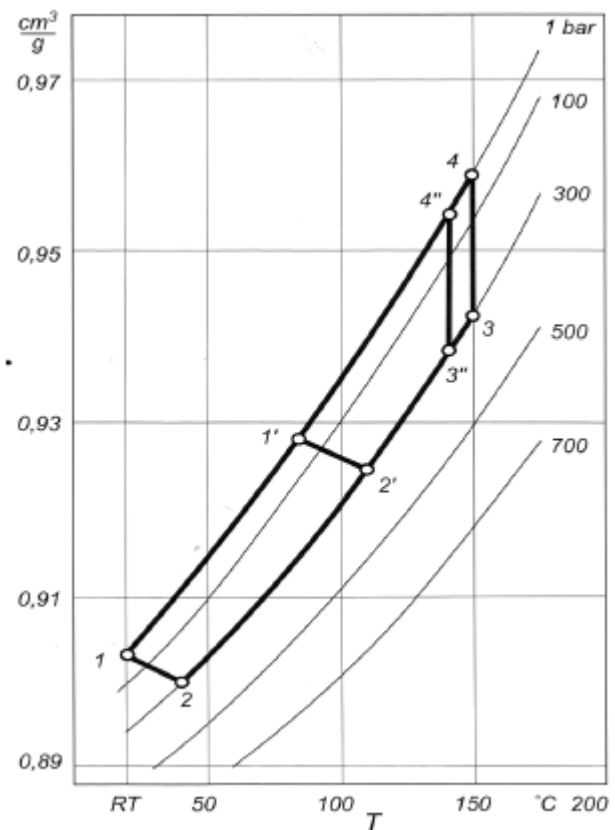
a = Rohling
b = Werkzeug
c = Heizplatten
d = Austriebsnut

Das überlaufende Material, welches den Grat bildet, ist notwendig! Es stellt den für den Prozess wichtigen Nachdruck sicher!

Compression Molding

pVT-Verhalten:

- 1: Start des Vorgangs
- 1-2: Erwärmung durch Druckerhöhung und Reduzierung der spez. Volumens
- 2: Erreichen des Schließdrucks
- 2-3: isobare Erwärmung, Volumenzunahmen durch Strömen in Austriebsnut ausgeglichen
- 3-4: Entformung (isotherme Expansion)
- 4-1: isobare Schwindung (inkl. Maßänderungen)
- 1', 2' durch Rohlingsvorwärmung zu erreichen
-> Verringerung der Zeit
- 3'', 4'' verringerte Werkzeugtemperatur führt zu geringerer Schwindung und gleichmäßigerer Vernetzung

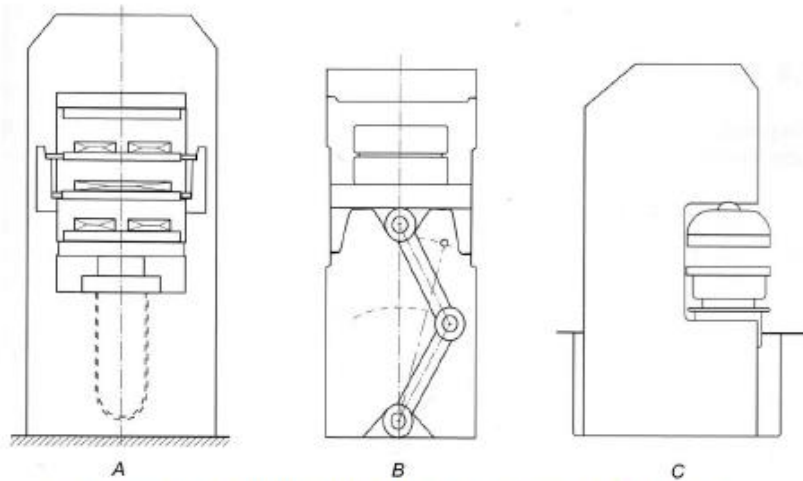


pVT-Diagramm einer Kautschukmischung für CM

Bauarten von Pressen

Heizenergie durch Dampf, Heißwasser, Thermoöl oder elektrischen Strom

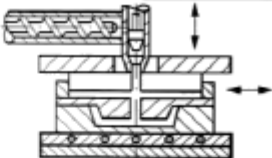
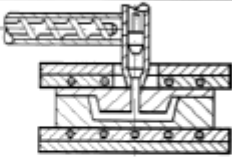
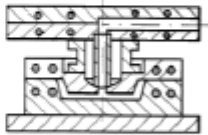
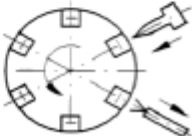
- zu A: 2 oder mehr Werkzeuge, i.d.R. nicht fest mit Presse verbunden
- zu B: schnelles Öffnen und Schließen, Werkzeug meist fest eingebaut (Einsatz bei Reifenvulkanisation)
- zu C: gute Zugänglichkeit, Einsatz bei aufwendiger Vor- und/oder Nachbearbeitung
- (Verbindung/Endprofilierung von Dichtungsprofilen)



A hydraulische Etagenpresse, B Kniehebelpresse, C Maulpresse

Übersicht über Herstellverfahren

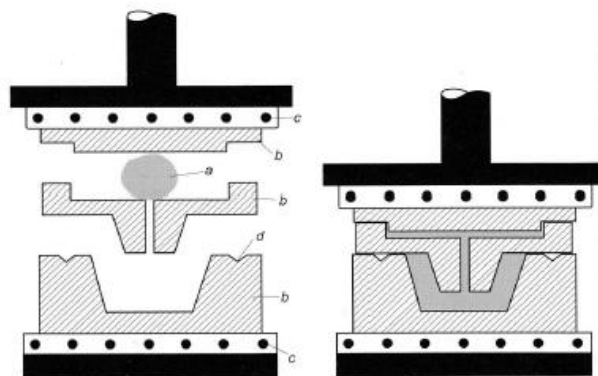
	Verfahren	Symbol	Hauptmerkmale	Hauptanwendungen
Preßverfahren (CM)	Pressen (CM)		- o Verpressen eines vorgeformten Rohlings im Werkzeug + Investitionskosten - Fertigungskosten	- o Kleine Serien, große Teile - o Probekörper - o Muster
	Spritzprägen (ICM)		- o Verpressen der vorplastifizierten Mischung + Mischungsverteilung ohne Kanäle - Werkzeug-Know-How	- o Flächige Membranen und Dichtungen - o kleine Präzisionsformteile - o hohe Werkzeugteiligkeiten
Transferpreßverfahren (TM)	Transferpressen (TM)		- o Transferieren der dosierten Mischung in den Formhohlraum + Maßgenauigkeit - Mischungsabfall	- o Komplizierte Präzisionsformteile - o nacharbeitfreie Teile, wenn Flashless-Ausführung
	Transferpressen mit Kaltkanal (TM-K)		- o Transferieren der vorgewärmten Mischung + geringer Mischungsabfall - Verfahrenssicherheit	- o Komplizierte Präzisionsformteile - o nacharbeitfreie Teile, wenn Flashless-Ausführung
	Transferspritzpressen (ITM / ITM-K)		- o Transferieren der vorplastifizierten Mischung + gleiche Fließgeschichte - Investitionskosten	- o Große Serien kleiner Formteile, auch Gummi-Metall - o nacharbeitfreie Teile, wenn Flashless-Ausführung

Transfer	Transferspritzpressen (ITM / ITM-K)		○ Transferieren der vorplastifizierten Mischung + gleiche Fließgeschichte - Investitionskosten	○ Große Serien kleiner Formteile, auch Gummi-Metall ○ nacharbeitfreie Teile, wenn Flashless-Ausführung
	Spritzgießen (IM)		○ Einspritzen der vorplastifizierten Mischung + Fertigungskosten - Werkzeugkosten	○ je nach Teilgebiet mittlere bis große Serien normaler Formteile ○ Gummi-Metall-Teile ○ automatisierte Fertigungen
Spritzgießverfahren (IM)	Spritzgießen mit Kaltkanal (IM-K)		○ Einspritzen der vorplastifizierten Mischung durch temperierte Verteilerkanäle + Materialabfall - Werkzeugkosten	○ große Serien normaler Formteile ○ hohe Werkzeugteiligkeiten ○ hoher Werkstoffpreis
	Spritzgießen mit Mehrstationen (IM-M)		○ Trennen von Einspritz- und Vulkanisierstationen + Fertigungskosten bei Großserien - Investitionskosten	○ sehr große Serien ○ automatisierte Fertigungen ○ nacharbeitfreie Teile wenn Einnest-Werkzeuge

Transferpressverfahren

Entscheidende Prozessparameter:

- Druck
- Temperatur (über Heizplatten voreingestellt)
- Reaktionsführung (abhängig von Temperatur)
- Werkzeuggestaltung



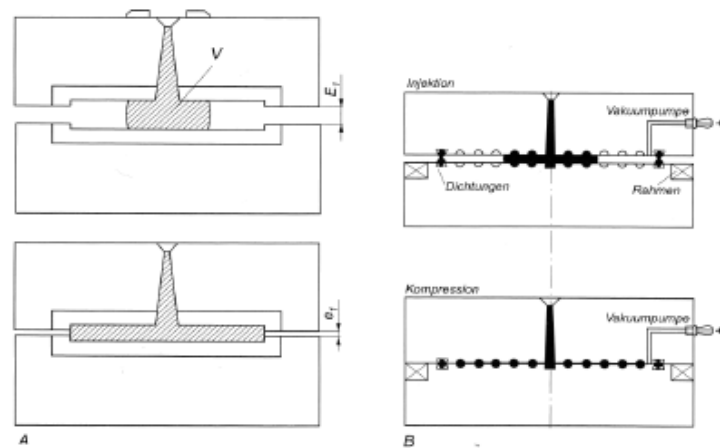
A Prinzipdarstellung, B Spritzprägewerkzeug mit Vakuumanschluss

Spritzprägeverfahren

Wesentlich höhere Genauigkeit bzgl. Einhaltung der Formteiltoleranzen

Herstellung flächiger Präzisionsformteile wie z.B.:

- Flachdichtungen
- Membranen
- Teile für pharmazeutische Industrie



A Prinzipdarstellung, B Spritzprägewerkzeug mit Vakuumanschluss

Vorteile Spritzgießverfahren

Vorteile des IM- gegenüber TM- / CM-Verfahren:

- Wesentlich kürzere Vulkanisations- und Zykluszeiten
 - Bessere Automatisierungsmöglichkeiten
 - Wärmeeinbringung durch Wärmeleitung und Dissipation während Förderung durch Schnecke
 - Wesentlich höhere Drücke möglich (bis 2000 bar)
- > Höhere Einspritztemperaturen

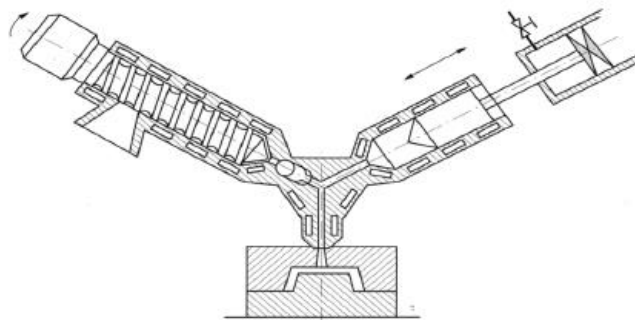
Spritzgießen mit Schneckenvorplastifizierung

Vorteile

- Getrennte Einstellung und Optimierung von Plastifizieren und Einspritzen
- Größere Volumina möglich

Nachteile

- Rheologisch problematischer Übergangsbereich von Schnecken und Kolbenzylinder
 - Umkehrung der Fließrichtung (first in – last out)
- > Ungünstige Temperatur-Zeit-Geschichte
- > Temperaturinhomogenitäten (zuletzt plastifizierte Mischung mit deutlich höherer Temperatur eingespritzt)



Extruder

Anwendung, Aufbau und Historie

Schneckenmaschinen zur kontinuierlichen Herstellung von Halbzeugen und Fertigprodukten

- Materialvorbereitung (Mastizieren, Nachmischen, Ausformen)
- Halbzeugherstellung (Aufbauteile für Konfektion von Reifen, Transportbändern, etc.)
- unmittelbare Formgebung (Ummantelung für Kabel und Schläuche, technische Profile)

Teile einer Extrusionsanlage:

- Extruder mit Füttervorrichtung
- Extrusionswerkzeug mit Mundstück
- Abzugseinrichtung
- Kühleinrichtung
- Konfektionier- und / oder Abläng- und / oder Wickelienrichtung
- Mess-, Steuer-, Regeleinrichtung

Beginn Mitte 19. Jhdt:

Ummantelung von Seekabeln (Warmextruder)

Stärker werdend ab 1930er:

Auftreten thermoplastischer Kunststoffe, positive Auswirkungen auf Kautschukextruder (zunehmend Kaltextruder)

Warmextruder

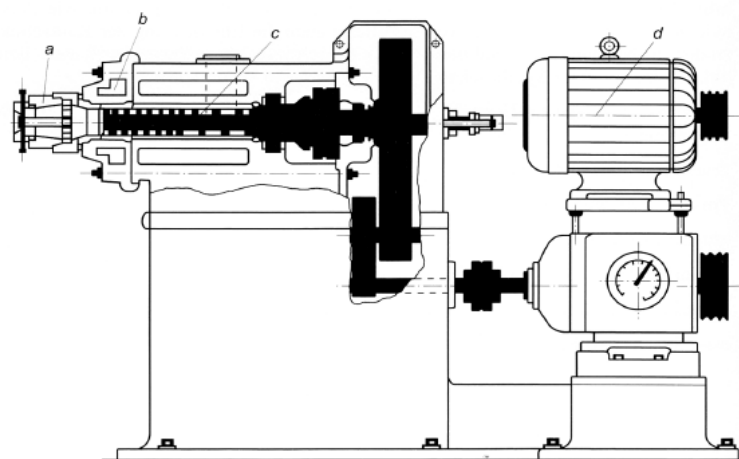
Vorgewärmte Puppe oder Band

- Einziehen, Verdichten und Fördern
- Ausformen gegen Werkzeugwiderstand am Mundstück
- kurze, tiefgeschnittene Schnecken

Nachteile

Gleichmäßigkeit der Produktqualität begrenzt

- bei erhöhtem Extrusionsdruck
- durch schwer zu kontrollierende Aufwärm- und Plastifizierungsvorgänge
- durch Abbauvorgänge der Mischungen (je nach Mischungstyp 5 - 30 %)
- durch Viskositäts- und Elastizitätssteigerung aufgrund beginnender Anvulkanisation



a Extrusionswerkzeug, b Temperierkanäle, c Schnecke, d Antriebsmotor

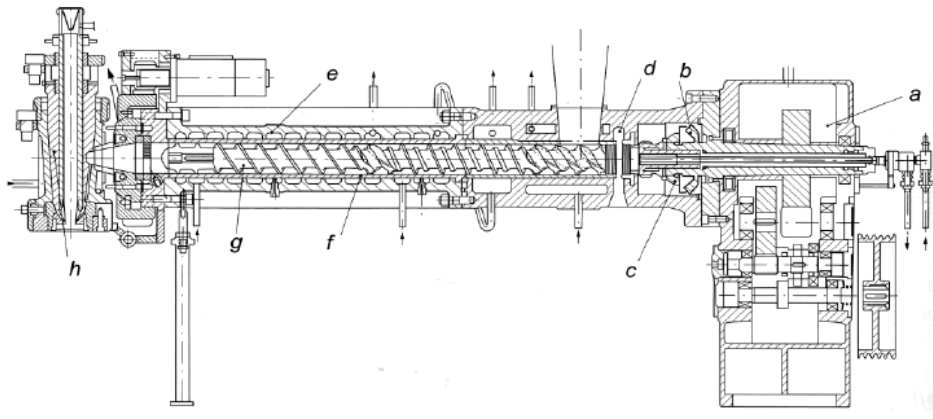
Schneckenlänge: 3 – 6 D

Kaltextruder

- Einziehen, Fördern und Verdichten
- Erwärmen und Plastifizieren
- Homogenisieren, Mischen
- Druckaufbauen
- Ausformen

Vorteile

- Verkürzte Wege von Mischungsherstellung zum Endprodukt
-> kontinuierlicher und gleichmäßiger



a Getriebe, b Drucklager, c Kupplungsglocke, d Trichterstück, e Zylinder, f Temperierbuchse, g Schnecke, h Querspritzkopf

Extrusionswerkzeuge

Grundlagen

Überführen von plastifizierter und homogenisierter Mischung in Strömungskanäle und Mundstück
-> Formen des Profils

Bauarten:

- Geradeaus-Spritzkopf
- Umlenk-Spritzkopf
- Mehrfachspritzköpfe

Einbindung von Strainersieben zw. Schneckenende und Spritzkopf zum Herausfiltern von Verunreinigungen.

Zu beachten ist dabei:

Erhöhung des Extrusionsdruckes (im Mittel: 100 bar)

- Erhöhung der Mischungstemperatur
- Durchsatzminderung

Kompensation durch Drehzahlerhöhung

- Weitere Temperaturerhöhung, kann zu erheblichen Problemen führen (besonders bei kontinuierlicher Vulkanisation)

Zusetzen des Siebes möglich

- Stillstandszeiten für Siebwechsellvorgänge

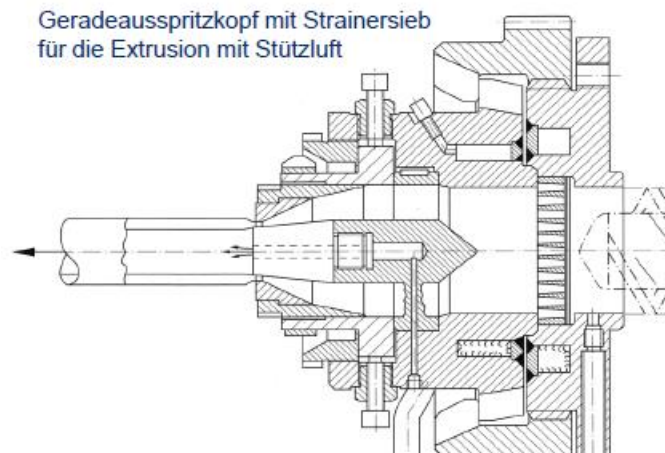
Geradeaus-Spritzkopf

Herstellung von Voll- und Hohlprofilen:

Konstruktion:

- Vermeidung „toter“ Ecken
- gleichmäßige Temperierung
- kleines Kautschuk-Volumen
-> bessere thermische Beeinflussung
-> Begrenzung durch Fließwiderstand
- Kanalquerschnitte so, dass optimaler Gegendruck entsteht
- Beschleunigung der Strömung zum Austritt hin

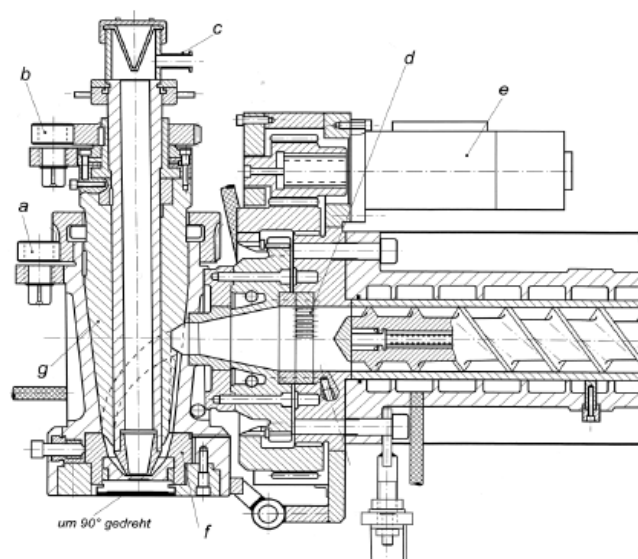
- durch Kanalverengung
- kont. Verformung der Mischung zur Austrittsgeometrie hin
-> Reduktion viskoelastischer Effekte
- strömungstechn. optimierte Stege
- keine großen Temperaturunterschiede zwischen Stegen und Mischung
-> Reduktion von Fließmarkierungen
- hoher Extrusionsdruck hinter Stegen



Umlenk- Spritzkopf

Ummantelung eines Festigkeitsträgers, vorgefertigten Profils oder Schlauches

- Konstruktion: Neben den Aspekten der Geradeaus-Spritzköpfe kommt hier hinzu:
- Erzielung einer gleichmäßigen Austrittsgeschwindigkeit → strömungstechn. Auslegung
- Optimierung der Ummantelungsstrecke hinsichtlich ausreich. Verschweißung der einzelnen Schichten
- Pinolengeometrie so, dass kein Rückströmen auftritt
- Mundstückkontur und Bügellänge so gestalten, dass Abzugskräfte gering werden
- ggf. Vakuumanschluss am Pinoleneinlauf zur Verbesserung der Bindung zwischen den Schichten



Querextrusionskopf für die Schlauchextrusion

a Verteilerbajonett, b Wanddickenverstellung, c Anschluss für Vakuumpumpe, d Strainer, e Drehkolbenzylinder, f Werkzeugträger, g Massestromverteiler

Vulkanisation

Rotationsverfahren:

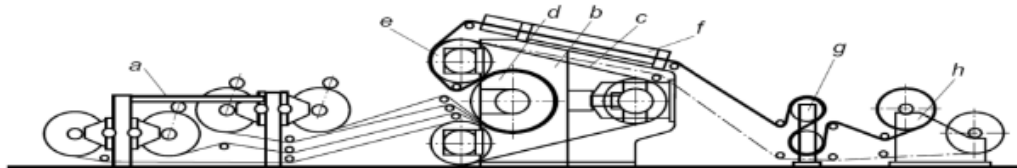
- Endlose Produkte unter 10 mm Dicke (Dachfolien, Bodenbeläge, Keilriemen, Förderbänder etc.) mit und ohne Verstärkung
- Anpressdruck bis 6 bar, Arbeitsbreite 1500 mm
- Strukturierte Trommeloberflächen erzeugen direkt Oberflächenstrukturen

Vorteil

- keine Überlappbereich (kein Doppelheizen)

Nachteile

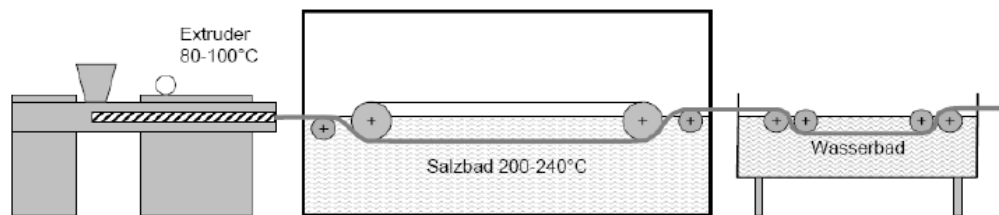
- Dicken > 10 mm nicht rationell herstellbar
- bei bestimmten Mischungen zu geringer Anpressdruck
- Produktdicke in Randbereichen außer Toleranz → Abschneiden notwendig



a Abwickleinrichtung, b Vulkanisiermaschine, c Druckband, d Heiztrommel
e Umlenkwalze, f Nachheizkanal, g Kühlvorrichtung, h Aufwickleinrichtung

Die Verarbeitung und Vulkanisation von Kautschuk

Vulkanisation von Extrudaten im Salzbad



Die Vulkanisation von Extrudaten ist immer ein nachfolgender Schritt und erfolgt meistens in einem speziellen Salzbad...

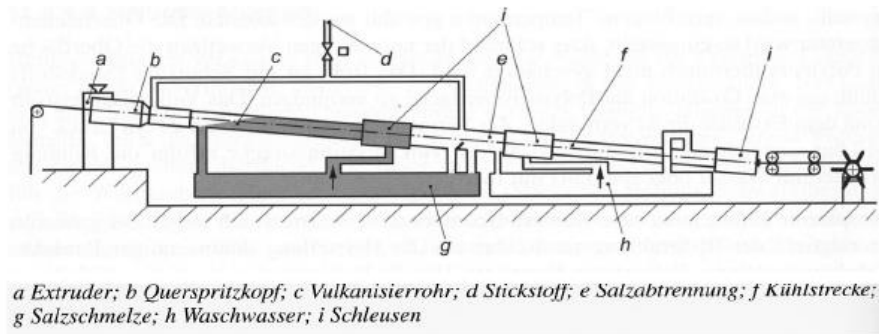
Salzbadanlage unter Druck (PLCV):

Vorteile der Salzbadanlage

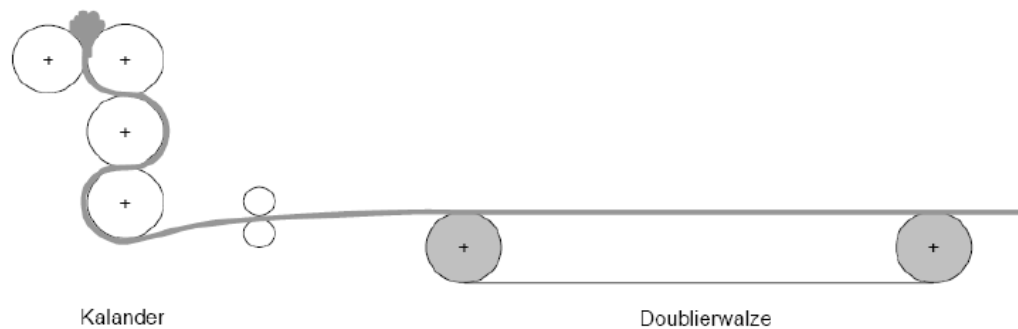
- Dichteunterschied Salz zu Extrudat gering → Durchhang minimal
- Salzschmelze reicht nicht bis an den Extruderkopf (Isolation über Stickstoffpolster)
- glatte, dichte Extrudatoberfläche
- Bessere mechan. Eigenschaften und Gummihaftung an Leitern etc.

Nachteile

- Reinigung des Extrudates von Salzresten
- Aufwändige Aufbereitung des Waschwassers

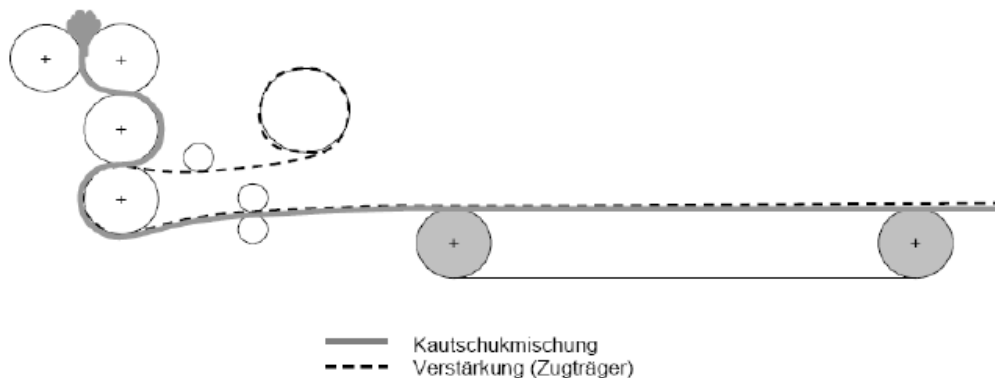


Kalandrierte Artikel (Bahnen, Matten, Riemen)



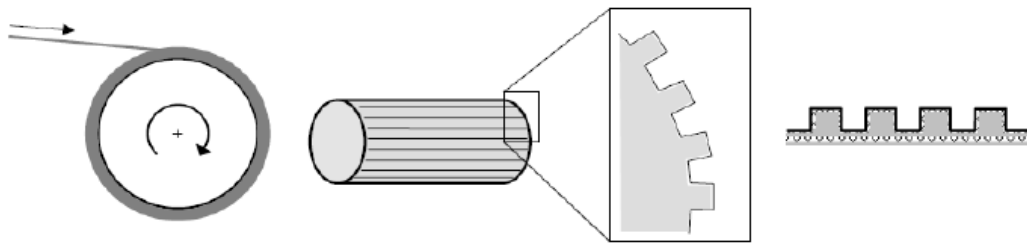
Grossflächige Artikel werden auf einem speziellen Walzwerk (**Kalander**) mit meistens 3 oder 4 Walzen stufenweise auf die gewünschte Dicke kalandriert. Die Vulkanisation erfolgt in speziellen Heizpressen, wo jeweils mehrere Quadratmeter nacheinander vulkanisiert werden.

Kalander: Herstellen verstärker Bahnen



Bei verstärkten Artikeln wie Antriebsriemen oder Transportbändern wird der Zugträger auf dem Kalander mit der Kautschukmischung belegt.

Kalanderfolien als Basis zur Herstellung von Riemen:



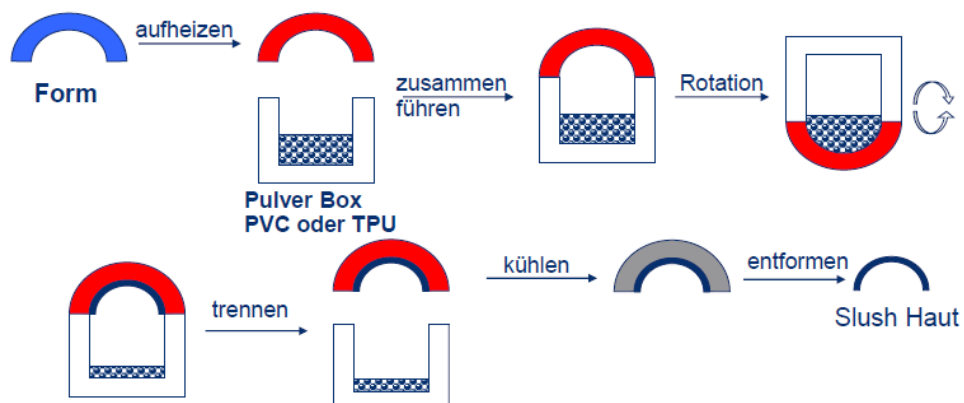
Keilriemen und Zahnriemen werden durch Aufwickeln von Kalanderfolien auf eine spezielle Trommel mit Rillen hergestellt, die vor der Vulkanisation mit Gewebe umwickelt wird. Nach der Vulkanisation werden die Riemen in der gewünschten Breite geschnitten.

Autoklav (Freiheizung)



Grossvolumige Artikel und Riemen mit ihrer Aufbautrommel werden in einem Vulkanisationskessel (Autoklav) vulkanisiert.

Thermoplastische Elastomere: TPU - Powder-Slush Technologie



- leichtes Aufschmelzen
- gutes Verlaufen der Schmelze
- gute Pulverfließigenschaften

TPU-Gewebebeschichtung durch Sinterverfahren
Gute Hydrolyse-Beständigkeit

Überblick über die Herstellung von Elastomeren



Qualitätssicherung

Prüfung des Kautschuks

Viskosität

Viskosität ist ein Maß für die Zähigkeit, also der Kraft, die Kautschuk seiner Verformung entgegensetzt.

Je höher die Viskosität, desto höher ist die Kraft, die man aufwenden muss, um den Kautschuk zu verformen. Die Viskosität beeinflusst sehr stark die Verarbeitung von Kautschuk und Kautschukmischungen.

Naturkautschuk entsteht in einem biologischen Prozess als wässrige Emulsion von Kautschukteilchen in Wasser. Dieser Latex wird koaguliert und zum Festkautschuk getrocknet.

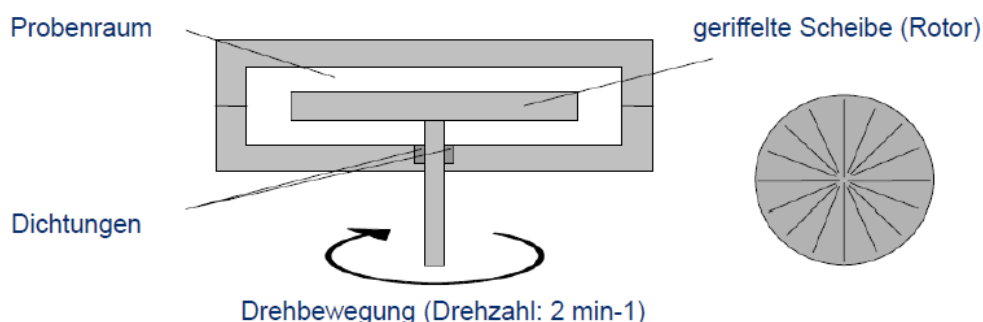
Die Länge der Polymerketten und damit die Viskosität von Naturkautschuk bewegt sich also von vornherein in einem bestimmten Bereich.

Bei Synthesekautschuk kann der Hersteller die Polymerisation gezielt steuern, um die gewünschte durchschnittliche Kettenlänge und Viskosität zu erreichen.

-> Daher gibt es von den meisten Synthesekautschuken mehrere Typen mit unterschiedlichen Viskositätsbereichen. Die Viskosität wird durch die durchschnittliche Länge der Polymerketten bestimmt.

Die Viskosität wird bestimmt, indem man eine beheizbare Kammer mit Kautschuk oder einer Kautschukmischung füllt und das Drehmoment für die Bewegung einer geriffelten Scheibe (Rotor) misst. Die Prüfung erfolgt meist bei 100°C.

Scherscheibenviskosimeter nach Mooney:



Die Messung der Viskosität hängt stark von den Prüfbedingungen ab, deshalb müssen diese immer angegeben werden,

z.B. ML (1+4) 100°C:

ML = Mooney, large rotor (grosser Rotor; MS = small rotor)

1+4 = 1 Minute vorwärmen, 4 Minuten messen

100°C = Prüftemperatur

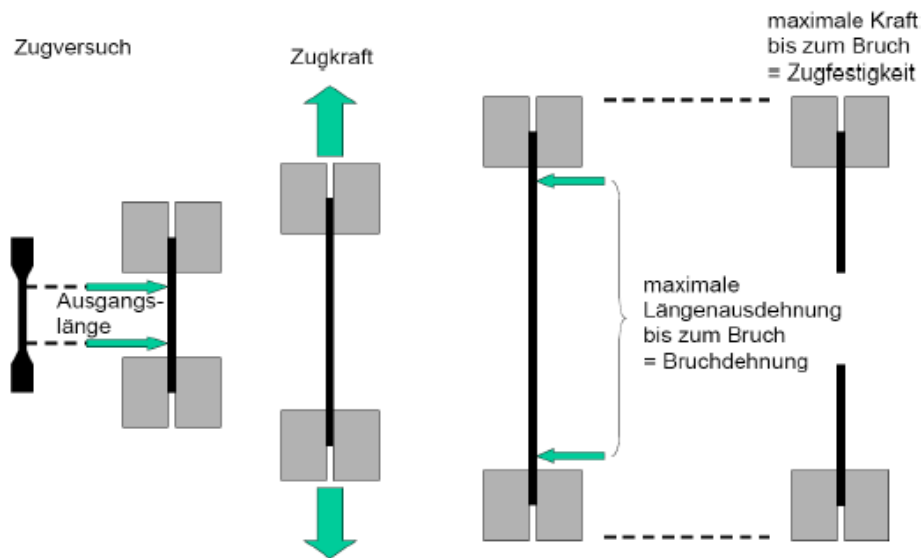
Bei hochviskosen Polymeren werden oft höhere Temperaturen gewählt, manchmal kombiniert mit längeren Vorwärmzeiten.

Synthesekautschuke haben Viskositäten von etwa 20-30 Pas (Levapren®) bis weit über 100 (Perbunan® NT, Buna® EP).

Elastomerprüfung

Zugversuch

Im Zugversuch werden genormte Proben in eine Zugprüfmaschine gespannt und bis zum Bruch auseinandergezogen. Die Maschine misst die Kraft bis zum Bruch sowie die Längenausdehnung. Die zum Zerreißen erforderliche Kraft ist die Zugfestigkeit und wird in MPa angegeben. Übliche Werte liegen zwischen 10 und 20 MPa. Die maximale Längenausdehnung bis zum Zerreißen der Probe ist die Bruchdehnung. Sie wird auf die Ausgangslänge bezogen. Übliche Werte liegen zwischen 250 und 450%.



Härte

Bei der Härteprüfung wird der Widerstand gegen das Eindringen mit einer genormten Spitze gemessen. Die Härte wird in Shore A angegeben. Dies ist eine spezielle Größe zur Charakterisierung von Weichgummi.

Übliche Werte liegen zwischen 40 und 80 Shore A.

Für noch härtere Elastomerartikel, wie zum Beispiel für Druckwalzen, wird eine andere Spitze verwendet; die Härte wird dann in Shore D angegeben.

Bei Elastomeren wird die Eindringtiefe während der Krafteinwirkung gemessen.

Verfahren:

1. IHRD, ISO 48

- konstante Kraft auf kugelförmigen Indentor
- Messung der Eindringtiefe nach festgelegter Zeit (30 sec.)
- Eindringtiefe ist proportional zum E-Modul: 50 Skalenteile = 2,31 MPa

2. Shore, ISO 868 u.a.

- definierte Federkraft auf Kegelstumpf (Shore A) bzw. abgerundete Kegelspitze (Shore D)
- Härte H entspricht dem Eindringwiderstand $F = 0,07515H + 0,55$ [N]
- Messdauer zwischen 1 und 15 sec. (je nach Norm)

Anforderung:

- Prüfkörper müssen glatte, parallele Oberflächen haben
- Dicke mindestens 6 mm, Durchmesser größer 35 mm

Shore-Messung:

- Wiederholgenauigkeit bei ca. 3%
- Vergleichbarkeit bei 4 – 6 %

IHRD-Messung:

- Wiederholgenauigkeit bei ca. 2,7%
- Vergleichbarkeit bei 6 %

Technischer Sprachgebrauch:

100 – 92	sehr hart
92 – 80	hart
78 – 68	mittelhart
66 – 52	mittelweich
50 – 40	weich
38 – 28	sehr weich

Umrechnung der Shore- in die IHRD-Härte ist nicht möglich. Bei hochelastischen Werkstoffen im Bereich von 30 – 60 Shore A sind die Werte jedoch ungefähr gleich groß.

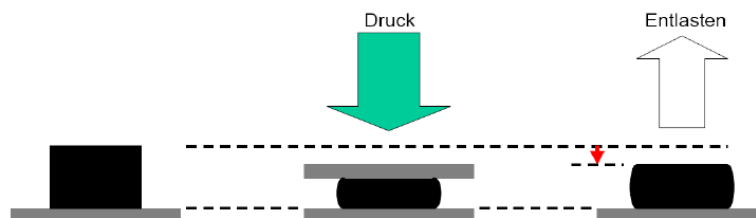
Druckverformungsrest

Compression Set, ISO 815

Bei dieser Prüfung wird eine zylinderförmige Probe zwischen zwei Platten eingespannt und zusammengedrückt. Nach der Prüfung verbleibt eine restliche Verformung.

Die Prüfung wird meist bei höherer Temperatur durchgeführt. Übliche Bedingungen sind zum Beispiel 70 Stunden bei 100°C.

Der Druckverformungsrest wird auf die Ausgangshöhe bezogen. Gute Werte liegen unter 15-20 %. Der Druckverformungsrest ist eine wichtige Kenngröße für Dichtungen.

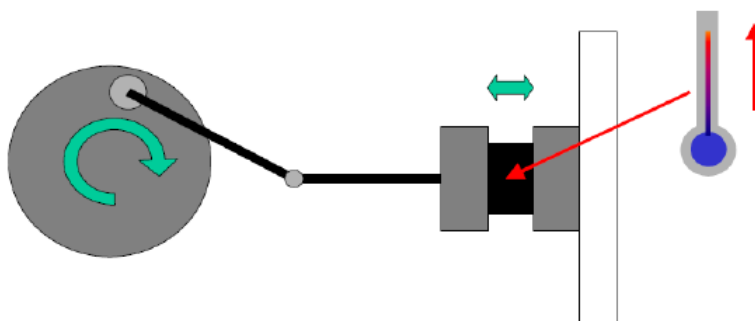


Dynamische Prüfung

Im Gegensatz zu statischen Prüfungen wie Zugversuch, Härte und Druckverformungsrest wird die Probe bei dynamischen Prüfungen zyklisch belastet und entlastet.

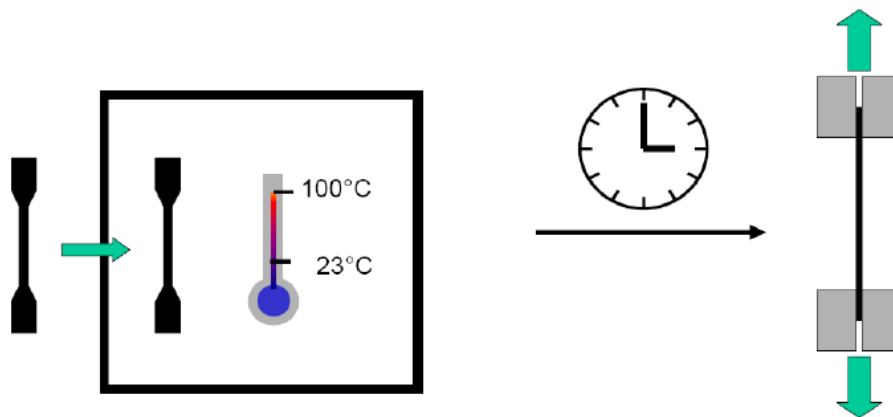
Dadurch erwärmt sich die Probe und wird nach einer gewissen Zeit zerstört.

Bewertet wird die Wärmeentwicklung oder der Zeitpunkt bis zur Zerstörung der Probe.



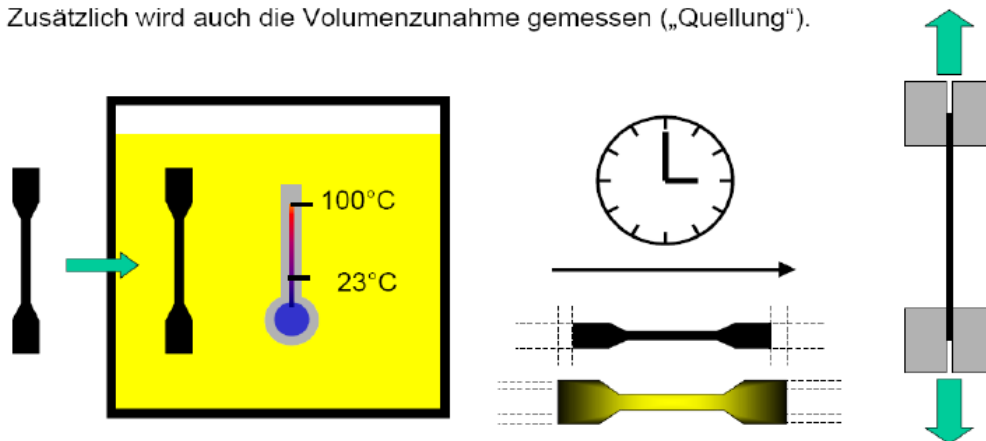
Alterungsbeständigkeit

Die Alterungsbeständigkeit von Elastomeren wird in einem Heissluftofen mit Umluft geprüft. Dabei werden zum Beispiel Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Härte vor und nach der Lagerung im Ofen verglichen. Übliche Bedingungen sind zum Beispiel 7 Tage bei 100°C.



Medienbeständigkeit

Bei dieser Prüfung wird die Probe bei Raumtemperatur oder höherer Temperatur im Prüfmedium (Wasser, Öle, Kraftstoffe, Chemikalien usw.) gelagert. Nach der Lagerung (zum Beispiel 7 Tage bei 50°C) werden zum Beispiel Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Härte vor und nach der Lagerung verglichen. Zusätzlich wird auch die Volumenzunahme gemessen („Quellung“).

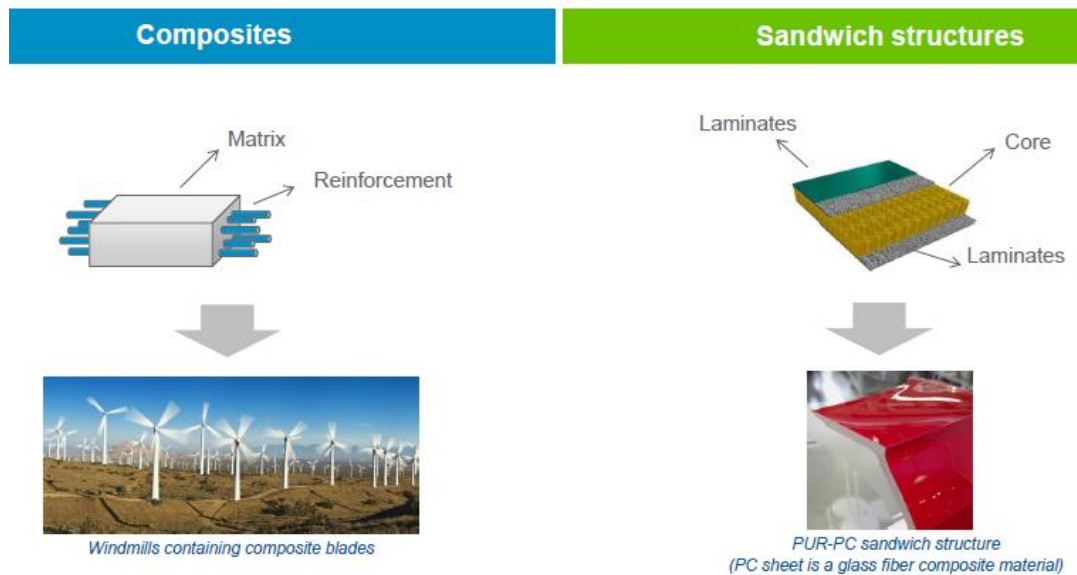


Zusammenfassung/Übung 10.

- Ein Kautschuk ist ein unvernetztes, amorphes oder kristallines Polymer (natürlich oder synthetisch) mit einer Glasatemperatur der Hauptkette < Gebrauchstemperatur. Elastomere sind vernetzte Kautschuke.
- Die Verarbeitung von Kautschuken ist dreigeteilt: Herstellung einer Mischung z.B. auf einem Kneiter, anschließende Formgebung unter Temperatureinwirkung und finale Vulkanisation.
- Man unterscheidet kontinuierliche Verarbeitungsverfahren (z.B. (Kalt-) Extrusion und diskontinuierliche Verfahren (z.B. Compression Molding).
- Die Vulkanisation erfolgt im Werkzeug beim Spritzgießen, bei den kontinuierlichen Verfahren in einem nachgelagerten Verarbeitungsschritt (z.B. Salzbad, Heißluft).
- Eine wesentliche Charakteristik einer Kautschukmischung ist die Vulkanisationskurve, die mit einem Scherscheibenviskosimeter nach Mooney ermittelt wird.
- Eine einfache und daher weit verbreitete Elastomerprüfung ist die Bestimmung der (Shore-) Härte.

11. Faserverbundkunststoffe I

Anwendung und Definition



Definition

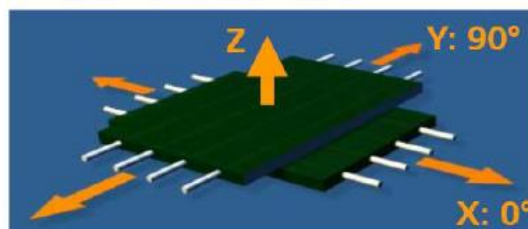
Kombination von zwei oder mehr Materialien ...

- Unterschiedlich in Form und Zusammensetzung
- Unlöslich in einander (Mehrphasen-System)
- Die Kombination ermöglicht eine Verbesserung der individuellen Eigenschaften (häufig mechanische Eigenschaften)
- Typische Komponenten: Matrix und (Verstärkungs-) Füllstoff (unterschiedliche Konzentrationen möglich)
- Ein Sandwich ist nicht zwingend ein Composite im Sinne dieser Definition, kann aber aus Composites bestehen.
- Polymerblends und Verbundelemente (Hybrid-Verbunde) fallen nicht unter diese Definition.

Kombination von zwei oder mehr Werkstoffen, die sich in Form oder Zusammensetzung unterscheiden, um gegenüber den Einzelwerkstoffen verbesserte Eigenschaften zu erzielen.

Verbundwerkstoffe verhalten sich nicht isotrop.

Wesentlicher Vorteil ist es, dass die Faserorientierungen für die technische Anwendung maßgeschneidert werden können.



- Innerhalb des Werkstoffes können die Eigenschaften durch Faserorientierung und -position stark variieren.

Begriffsdefinition

FVW: Faserverbundwerkstoffe
(fibre reinforced composites)

FKV: Faser-Kunststoffverbunde
 FVK: Faserverbundkunststoffe
 (FRP: fibre reinforced plastics)

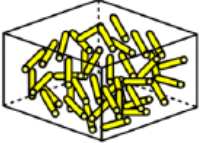
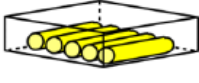
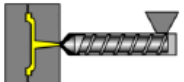
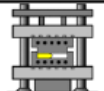
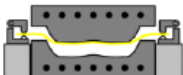
GFK: Glasfaserverstärkte Kunststoffe
 (GFRP: glasfibre reinforced plastics)

CFK: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
 (CFRP: carbonfibre reinforced plastics)

Komponenten für Faserverbundwerkstoffe

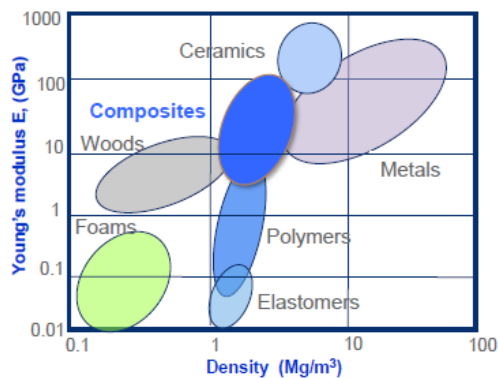


Abgrenzung faserverstärkter Kunststoffe

	Kurzfaserverstärkte Kunststoffe	Langfaserverstärkte Kunststoffe	Endlosfaserverstärkte Kunststoffe
Faserlänge	<< 4,5 mm	4,5 - 50 mm	Bauteillänge
Faserorientierung im Bauteil	3-D 	2-D 	1-D 
Halbzeug	Granulat	SMC/BMC GMT Langfasergranulat	Gewebe, Gelege Wirrfasermatte
Verarbeitungsverfahren (z.B.)			

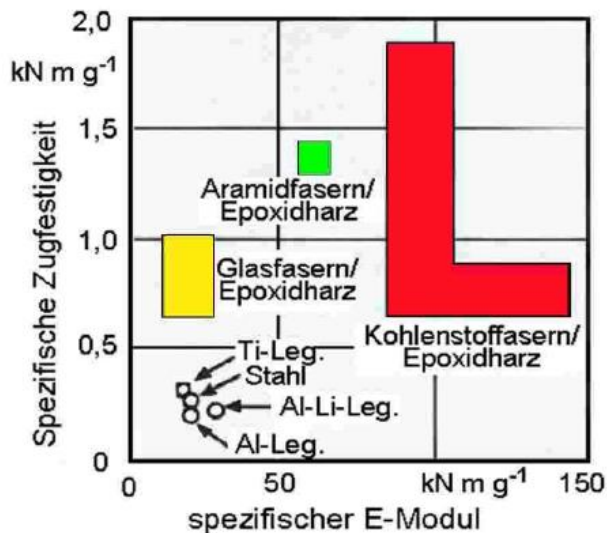
Vorteile der Composites

Mechanische Stärke in Kombination mit geringem Gewicht



Composites können auch Eigenschaftskombinationen realisieren, die für Metalle, Keramiken und Polymere alleine nicht erreichbar sind.

Spezifische Werkstoffeigenschaften



Vorteile von faserverstärkten Kunststoffen

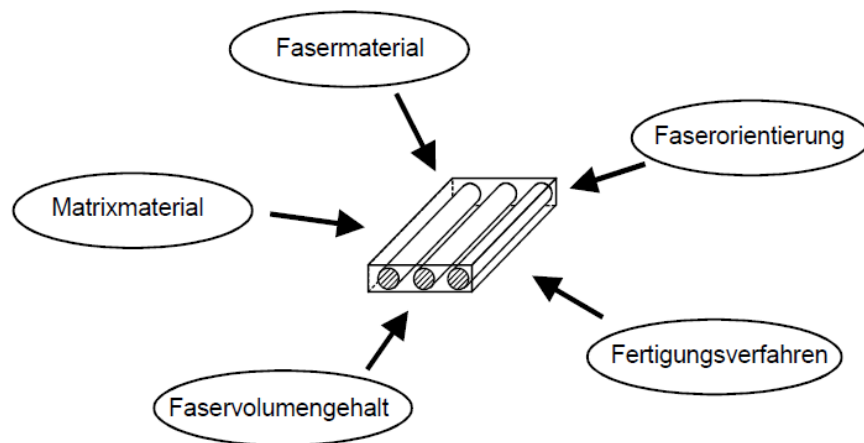
Leichtbauwerkstoffe:

- hohe gewichtsbezogene Steifigkeit und Festigkeit

Funktionswerkstoffe:

- gutmütiges Versagensverhalten
- hohe Energieabsorption (Sandwichverbund)
- hohe mechanische Dämpfung
- sehr geringe (und einstellbare) Wärmedehnung
- chemische Beständigkeit (Korrosion)
- wahlweise elektrisch isolierend oder elektrisch leitend
- Integration von Inserts in der Fertigung möglich

Materialien und Eigenschaften



Faser

- Aufnahme aller Zug-/Druckkräfte
- Bestimmend für Steifig-/Festigkeit

Matrix

- Fixierung der Faser in der gewünschten Geometrie
- Übertragung der Kräfte
- Stützung bei Druckbelastung
- Schutz vor Umgebungsmedien



Starke Vergrößerung des Querschnitts eines einlagigen Gewebeprepreps

Ein Verbund aus zwei Werkstoffen entsteht erst bei der Verarbeitung.

Faserwerkstoffe

Aus synthetischen Polymeren

- Aramidfasern
- Kohlenstofffasern
- Polyamidfasern
- Polyacrylfasern
- Polyesterfasern
- Polyethylenfasern

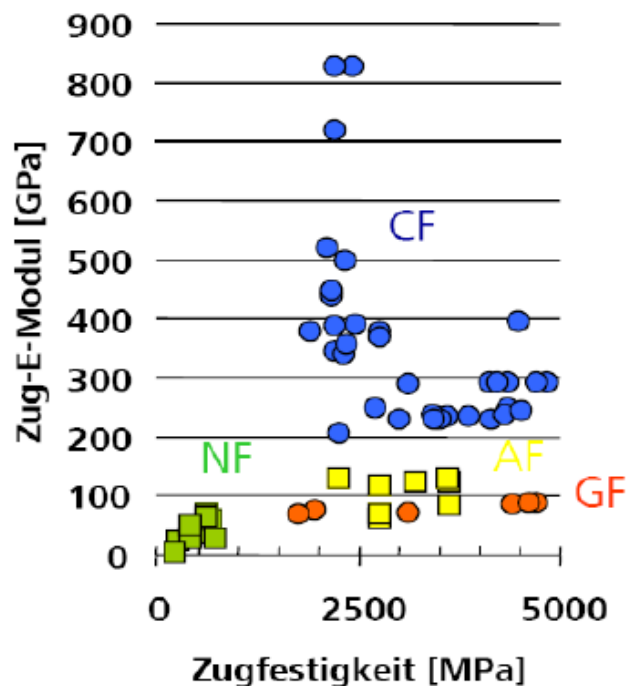
Aus anorganischen Rohstoffen

- Glasfasern
- Metallfasern
- Polykristalline keramische Fasern
- Einkristalline keramische Fasern (Whisker)
- Borfasern

Aus organischen Rohstoffen /

Pflanzenfasern:

- Holzfasern
- Cellulosefasern
- Sisal



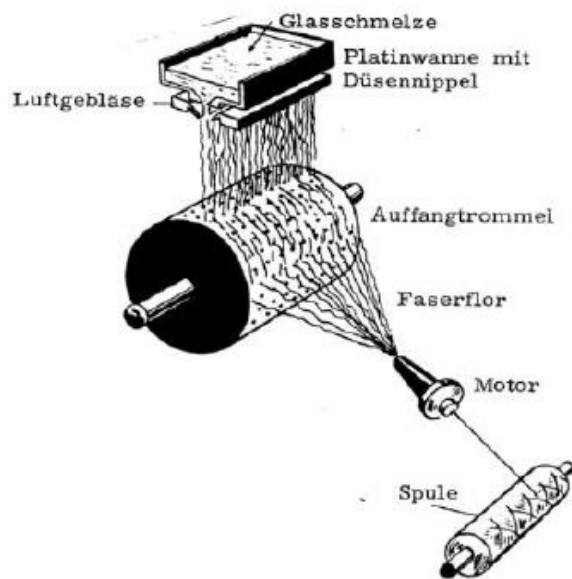
Verschiedene Faserhalbzeuge

- Kurzfasern (unter 3 mm)
- Langfasern (unter 5 cm)
- Endlosfasern (Roving)
- Matte
- Gewebe
- Gelege

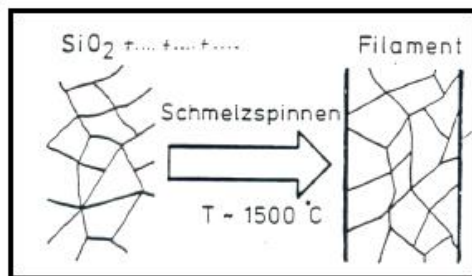
Herstellung von Faser

z.B. Glasfaser

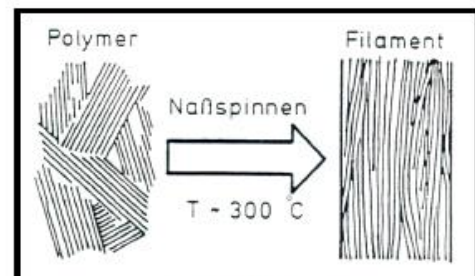
Düsenblasverfahren



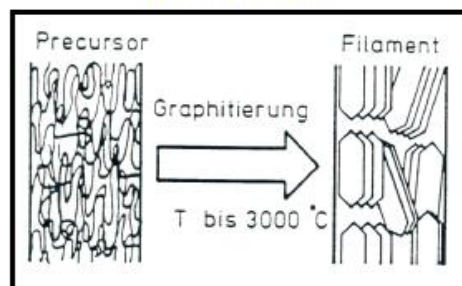
Herstellung üblicher Verstärkungsfasern



Glasfaser

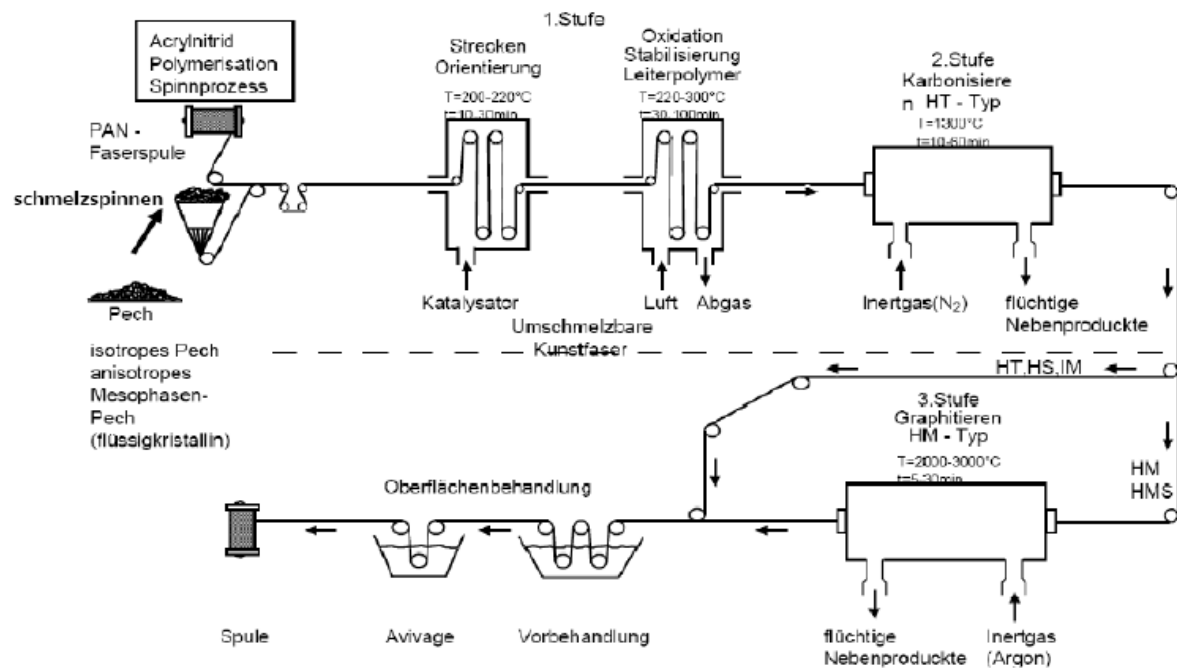


Aramidfaser



Kohlenstofffaser

Herstellung von Kohlenstofffasern



Kohlenstofffasern

Fasertypen

HT – Faser:	hochfest
IM – Faser:	intermediate
HM – Faser:	hochsteif
HMS – Faser:	hochsteif/hochfest



Kohlenstofffasern

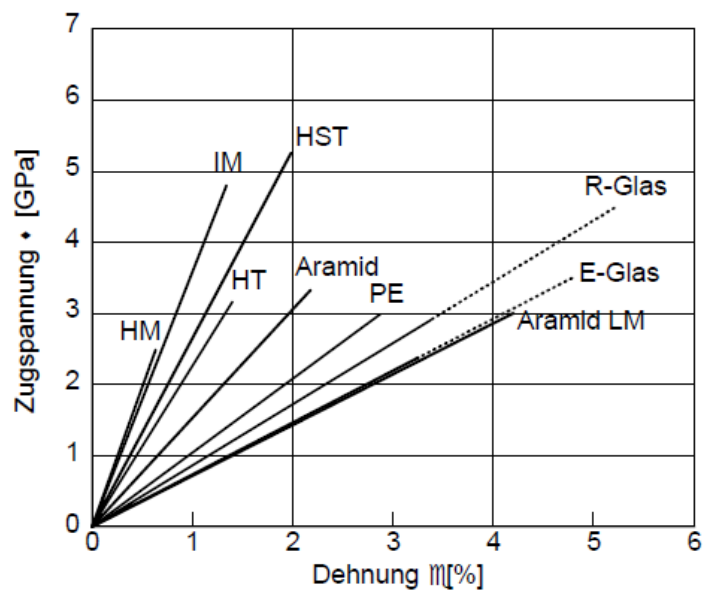
Eigenschaften

- › hohe Festigkeit
- › Steifigkeit dreimal so hoch wie bei Glasfasern
- › Dichte zwischen Aramid- und Glasfaser
- › geringe Zähigkeit
- › hoher Preis (50 €/kg)

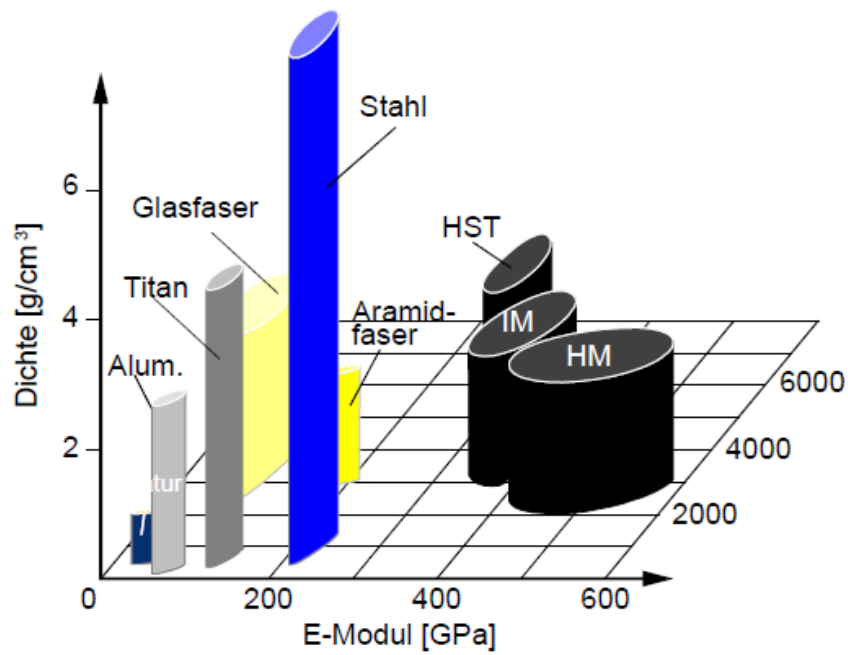
Handelsnamen

Torayca (Toray)
 Sigrafil (SGL)
 Tenax (Toho Tenax)
 Grafil (Mitsubishi)

Charakteristische Spannungs-/Dehnungs-Diagramme von Hochleistungsfasern



Mechanische Eigenschaften von Verstärkungsfasern und Metallen



Zusammenfassung Faserwerkstoffe

Glasfaser

- hohe Festigkeit
- Steifigkeit 20 mal so hoch wie bei unverstärkten Kunststoffen
- Dichte etwa doppelt so hoch wie bei unverstärkten Kunststoffen
- gute Zähigkeit
- niedriger Preis (2 bis 3 €/kg)

Aramidfaser

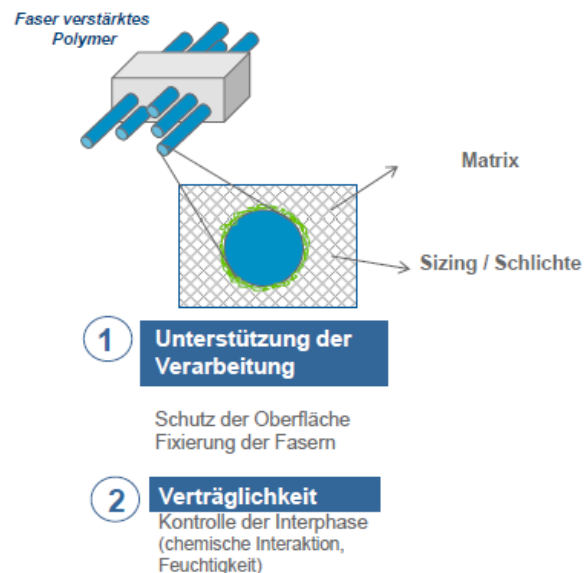
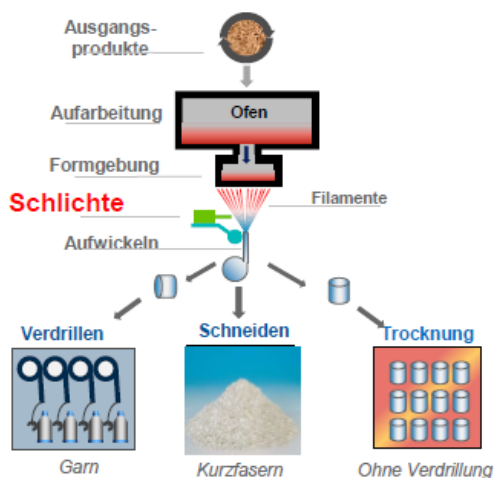
- hohe Festigkeit
- Steifigkeit doppelt so hoch wie bei Glasfaser
- Dichte etwa doppelt so hoch wie bei Glasfaser
- ausgezeichnete Zähigkeit
- niedrige Druck- und Schubfestigkeit
- Preis um Faktor 10-20 über dem der Glasfaser (30 €/kg)

Kohlenstofffaser

- hohe Festigkeit
- Steifigkeit dreimal so hoch wie bei Glasfasern
- Dichte zwischen Aramid- und Glasfaser
- geringe Zähigkeit
- hoher Preis (50 €/kg)

Faser-Schlichte

-> maßgeblich für die Composite-Eigenschaften



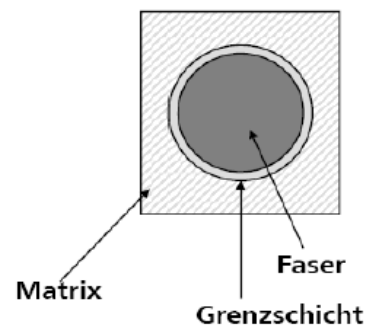
Aufgaben der Fasern, Matrix und der Grenzschicht

Die Faser dominiert:

- Festigkeit
- Steifigkeit
- Bruchdehnung
- Thermische Ausdehnung
- richtungsabhängige Eigenschaften

Die Grenzschicht sorgt für:

- Schutz der Faser während der Herstellung
- Positionierung der Faser
- Verbesserung (Ermöglichung) der Faser-Matrix-Haftung



Die Matrix bestimmt:

- Formgebung
- Druckstabilität des Werkstoffes

Faserstrukturen

Parameter:

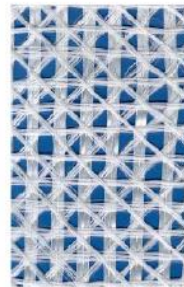
- Flächengewicht
- Garnart (gedreht, nicht gedreht)
- Garnfeinheit

Bindungstyp beeinflusst:

- Drapierbarkeit
- Schiebefestigkeit
- in-plane Eigenschaften
- Anisotropie



1D-Struktur
Garn, Roving,
Filament



2D-Struktur
Gelege, Gewirke,
Gewebe

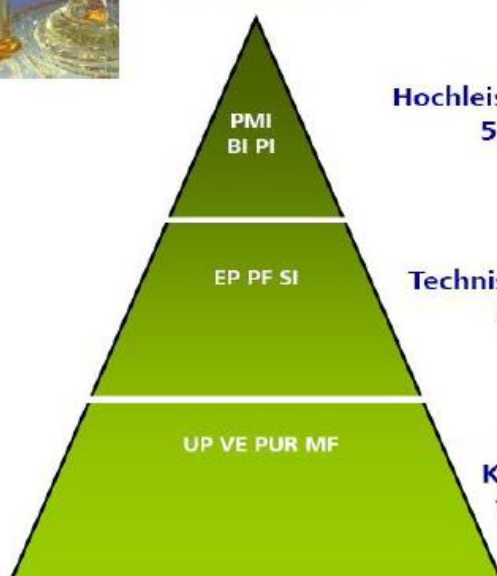


3D-Struktur
Abstandsgewirke, -gewebe

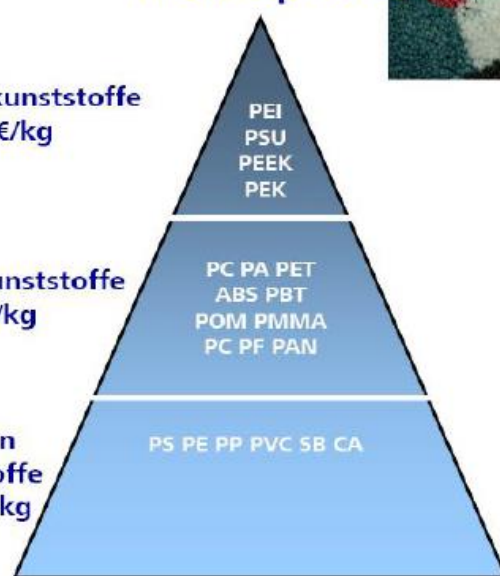
Matrixwerkstoffe



Duromere



Thermoplaste



Vergleich Matrixwerkstoffe

Eigenschaften von **duromeren** Matrixsystemen

- chemische Veränderung bei der Aushärtung
- geringe Bruchdehnung
- niedrige Bruchenergie
- sehr geringe Verarbeitungsviskosität möglich
- hohe Feuchtaufnahme (bis 5%)
- hoch beständig gegen Lösungsmittel



Eigenschaften von **thermoplastischen** Matrixsystemen

- nicht reagierend, keine Aushärtung nötig
- hohe Bruchdehnung
- hohe Bruchenergie
- sehr hohe Verarbeitungsviskosität
- Verarbeitungsprozess ist reversibel
- geringe Feuchtaufnahme (typisch 0,2%)
- i.A. hervorragende chemische beständigkeit

Reaktionsharze

Reaktionsharze bilden diejenige Gruppe der Duromere, die zum ganz überwiegenden Teil in der Faserverbundtechnologie eingesetzt wird.

Laut DIN 16945 gibt es dabei folgende Definitionen:

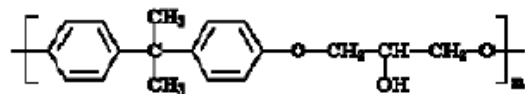
Reaktionsharze sind flüssige oder schmelzbare Harze, die für sich oder mit Reaktionsmitteln (Härter, Beschleuniger u.a.) ohne Abspaltung flüchtiger Komponenten durch Polyaddition bzw. Polymerisation härten.

Man nennt Reaktionsharze auch Gießharze, Laminierharze, Imprägnierharze, Tränkharze oder Träufelharze.

Epoxidharze

Eigenschaften (Richtwerte)

Dichte:	1,1 bis 1,4 g/cm ³
E-Modul:	3 bis 6 GPa
Festigkeit:	35 bis 100 MPa
Bruchdehnung:	1 bis 10 %
Dauergebrauchstemp.:	130 °C



Vorteile

- Geringe Schwindung
- außerordentliche Haftung auf fast allen Werkstoffen
- hohe mechanische Festigkeit, hohe Härte, hohe Abriebfestigkeit

Nachteile

- hoher Preis
- Hohe Viskosität (Verarbeitung)
- die Verarbeitung ist nur bei Temperaturen über 10 °C möglich

Reaktion

APS

Komponenten eines Harzsystems

Harz:	Polymerkettensegmente
Härter:	niedermolekular (kleine Moleküle)
Beschleuniger:	Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit
Inhibitor:	Erniedrigung der Reaktionsgeschwindigkeit

Härtung duroplastischer Matrixwerkstoffe

Warmhärtung

- Harz + Härter
- Auslösung durch Wärme

Kalthärtung

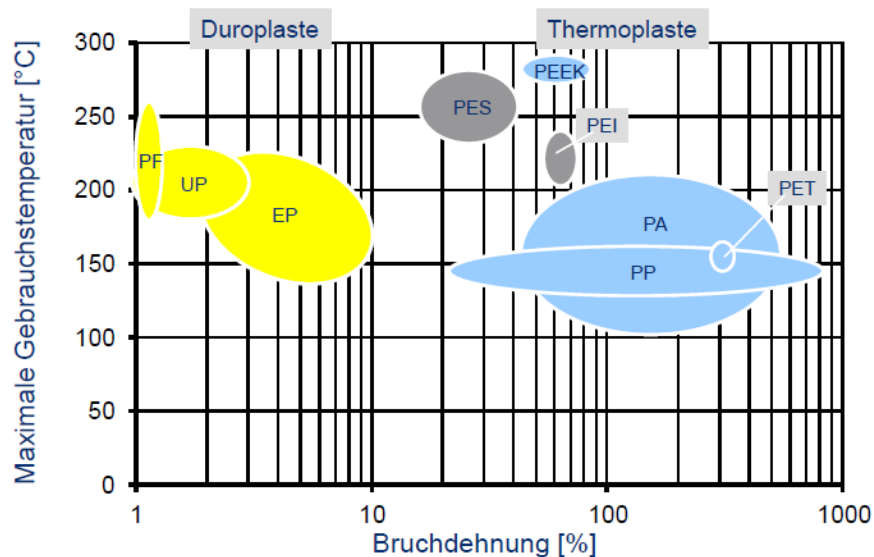
- Harz + Härter + Beschleuniger
- Auslösung durch Beschleunigerzerfall (Zeit)

Lichthärtung

- Harz + Härter + Beschleuniger
- Auslösung durch Beschleunigerzerfall (UV-Licht)

Polymere Matrixsysteme

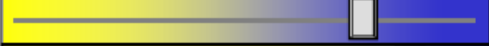
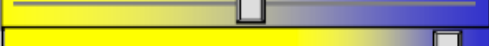
Gebrauchstemperatur vs. Dehnfähigkeit



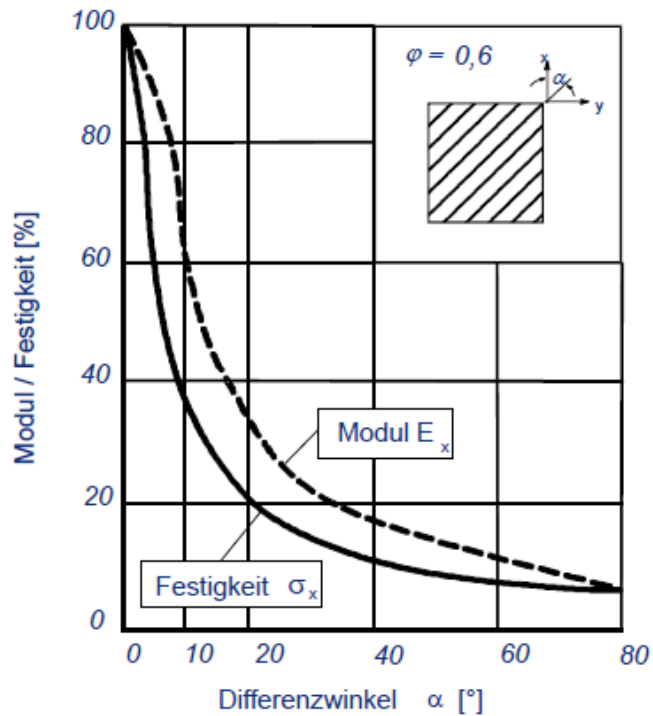
Vergleich Thermoplaste und Duromere

	Thermoplaste	Duroplaste
Matrix	polymersiert, hochviskose Schmelze, schlecht klebbar	nicht gehärtet, niedrigviskos, gut kleb- und lackierbar
Matrixkosten	niedrig/hoch	niedrig
Herstellung von Prepregs	schwierige Benetzung und Tränkung	einfach
Prepregkosten	hoch	niedrig
Lagerung	unbegrenzt lagerfähig	begrenzt lagerfähig (Kühlagerung), langsam fortschreitende Reaktion
Halbzeug	GMT, Tapes	SMC
Direktverarbeitung	Granulat (Kurzfaser) D-LFT = direktverarbeitbares Langfaser-Extrudat	Verstärkung und Reaktionsharz
Halbzeugtemperatur	Schmelztemperatur	Raumtemperatur
Umformen	großserientauglich	nicht üblich
Handverfahren	nicht üblich	großflächige Formteile

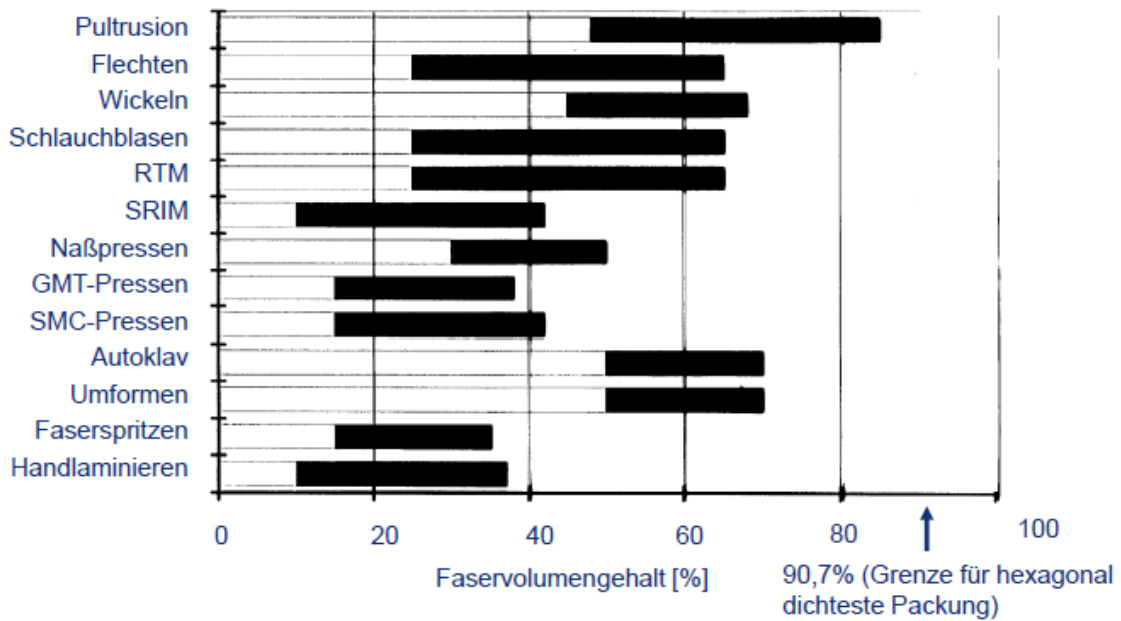
Bedeutung von Matrix und Faser im Vergleich

Eigenschaft	Matrix	Faser
• Steifigkeit		
• Festigkeit		
• Zähigkeit		
• Schadenstoleranz		
• Ermüdung		
• Impact Verhalten		
• Korrosion		
• Temperaturbeständigkeit		
• chemische Beständigkeit		
• elektrische Eigenschaften		
• Herstellung		

Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften



Möglicher Faservolumengehalt bei verschiedenen Fertigungsverfahren



Eigenschaften und Anwendungen von Verbundwerkstoffen

Eigenschaft	Ursache/Auswirkung	Anwendung
Geringe Wärmedehnung $\alpha_{ll} = -4 \dots 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ $\alpha_{LL} = 5 \dots 15 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \text{ (CFK)}$	geringe, bzw. negative Wärmedehnung	Satellitenbau, Antennenbau
Anisotropie	ingeniöse Konstruktionswerkstoffe	Behälter, Implantate $\sigma_t = 2 \times \sigma_x$
Medienbeständigkeit	Matrixmaterial	Anlagenbau, Rauchgaswäscher
Integrationstiefe/ Multifunktionsbauweise	Bauteil entsteht in situ, Umformverhalten	Sportgeräte, Automobilbau
Hohe Steifigkeit bei geringen Gewicht	geringe Dichte, ideale Leichtbauwerkstoffe	Maschinenbau, Luftfahrt, Transporttechnik,

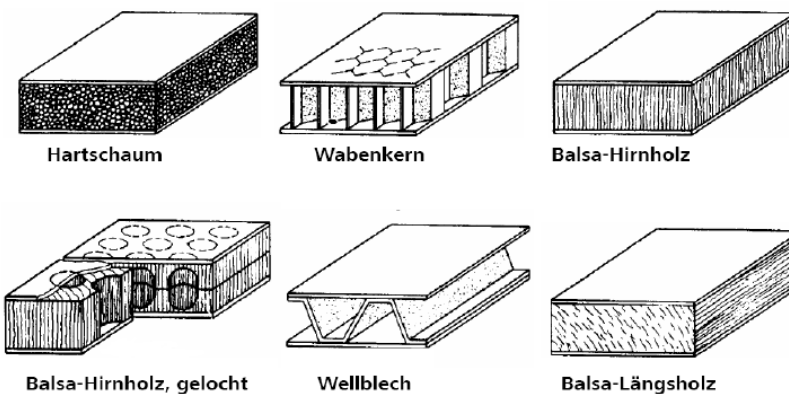
Sandwichstrukturen

Vorteile

- Herausragende Leichtbaugüter
- Kontinuierliches Verhalten im Vergleich zu verrippten Scheiben, Platten oder Schalen
- Hohe Biege- und Torsionssteifigkeit bei geringem Gewicht
- Hoher Ermüdungswiderstand
- Hoher Widerstand gegen Stoßbelastungen
- Gutes Fail-Safe-Verhalten
- Gute Oberflächenqualität
- Freie Formgestaltung
- Wirtschaftliche Fertigung (z. B. LCM)



Sandwichkerne

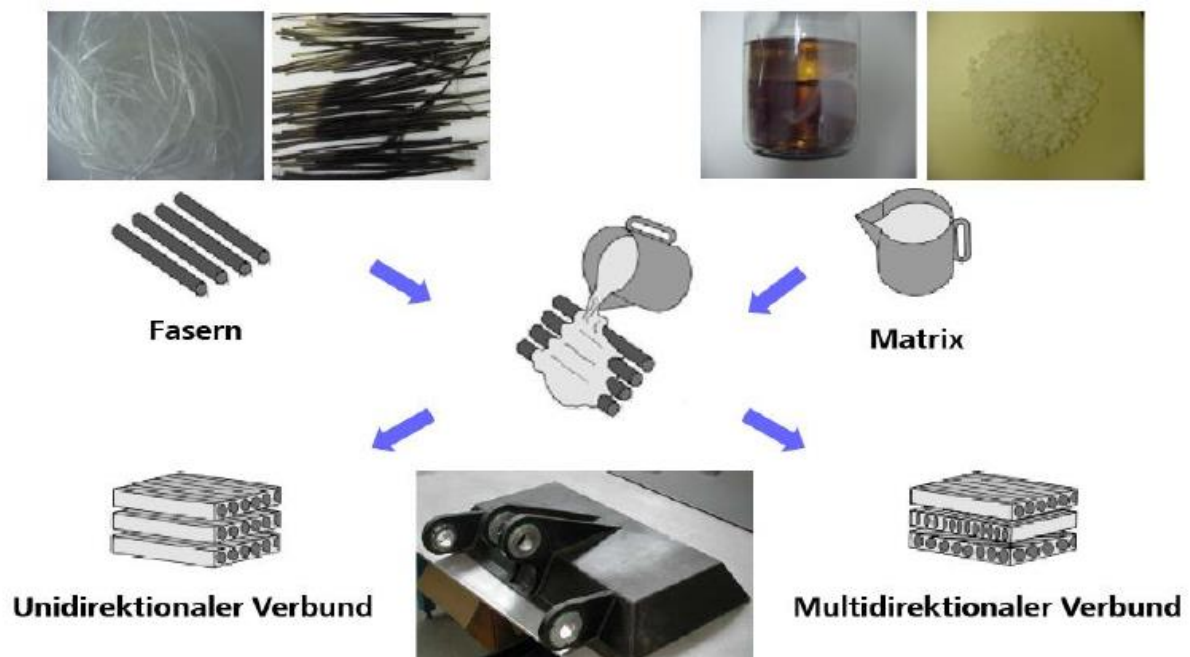


Zusammenfassung/Übung 11.
Siehe Kapitel 12.

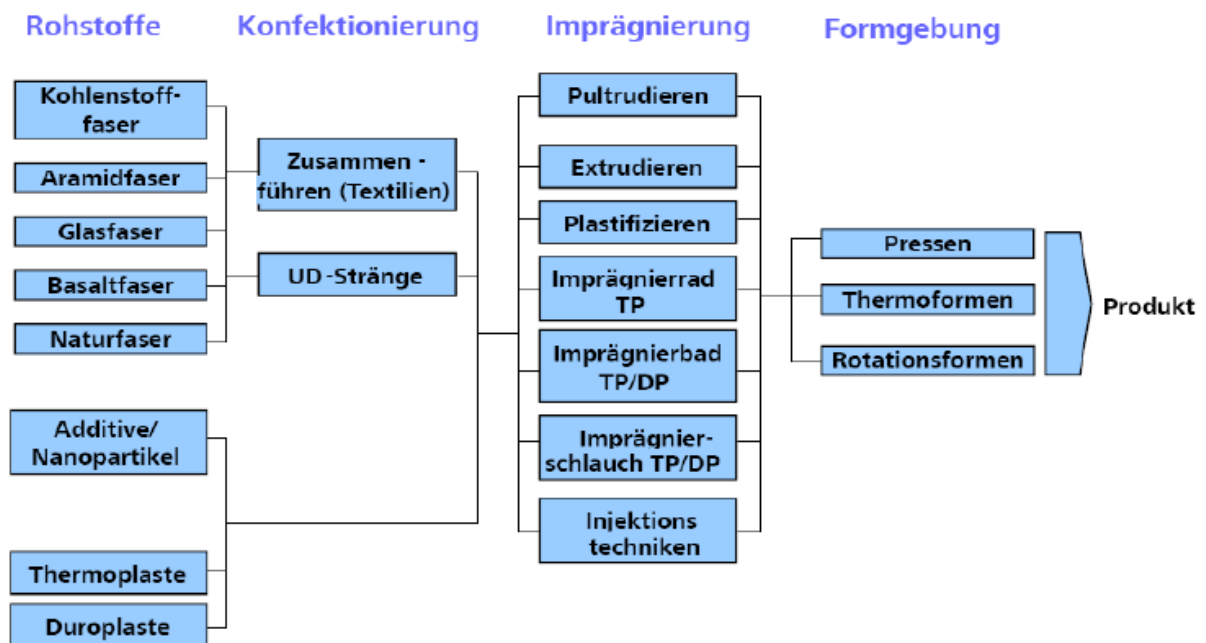
12. Faserverbundkunststoffe II

Verarbeitungsverfahren

Herstellung von Faserverbundkunststoffe



Stufen des Herstellungsprozesses

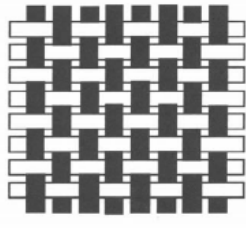


Konfektionierung

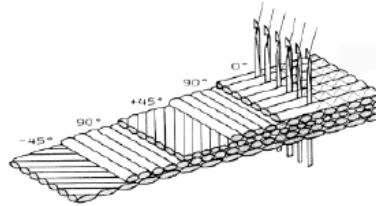
Ausgangswerkstoff Faser



Matten



Gewebe



Gelege

Bindungstyp beeinflusst:

- Drapierbarkeit
- Schiebefestigkeit
- in-plane Eigenschaften
- Anisotropie

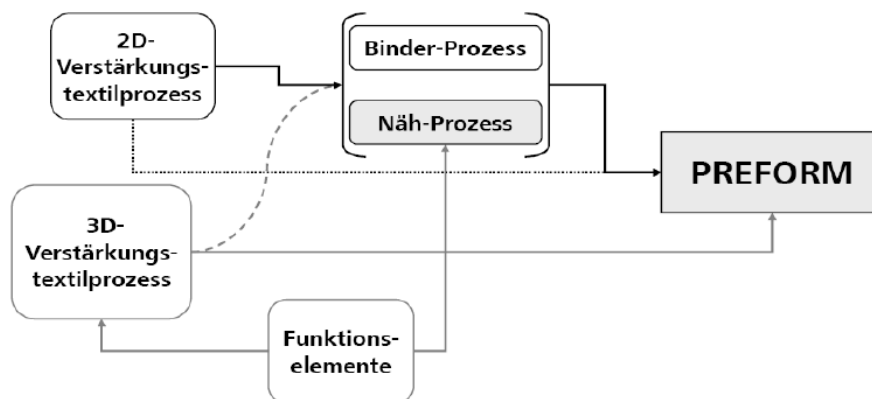
Weitere **wichtige Parameter**:

- Flächengewicht
- Garnart (gedreht, nicht gedreht)
- Garnfeinheit

Preform

Eine Preform oder Vorform ist ein der Bauteilgeometrie entsprechendes Verstärkungsgebilde vor der Imprägnierung/Konsolidierung.

Preformtechnik



Preform-Fertigung

Fromträger (Presse)
Oberwerkzeug
Halte Rahmen
Faser-Transportsystem (Greifer)
Unterwerkzeug



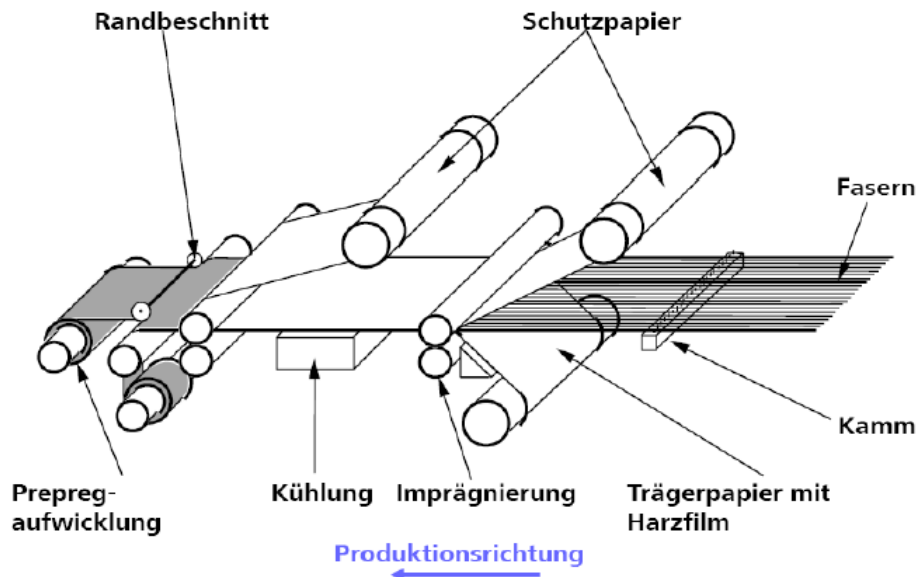
Anforderung an Greifervorrichtung:

- gleichmäßige Glasverteilung
- keine Falten

-> Greifer und Klemmen unterstützen Preformprozess

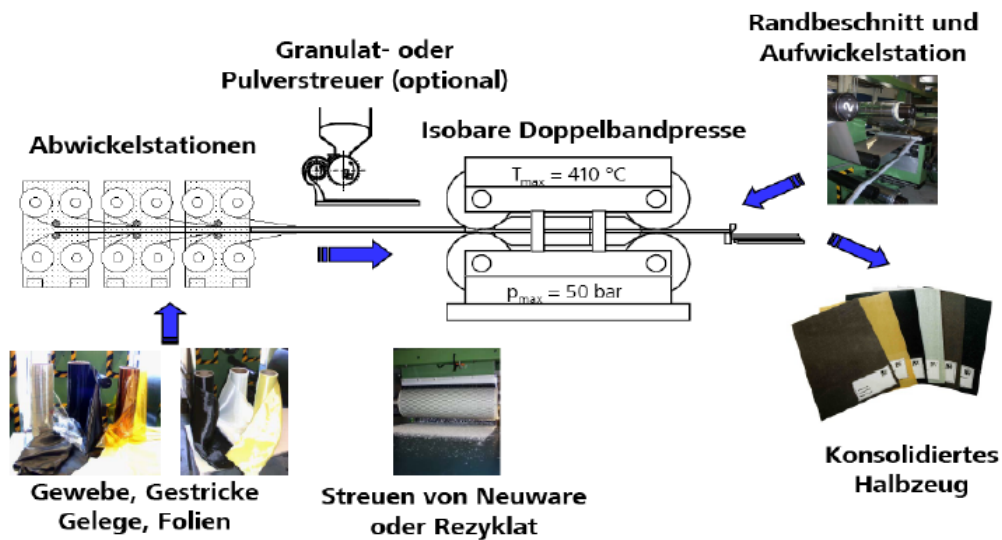
Imprägnierung – Halbzeug-Herstellung

Gewebe-Prepreg-Herstellung (DU)

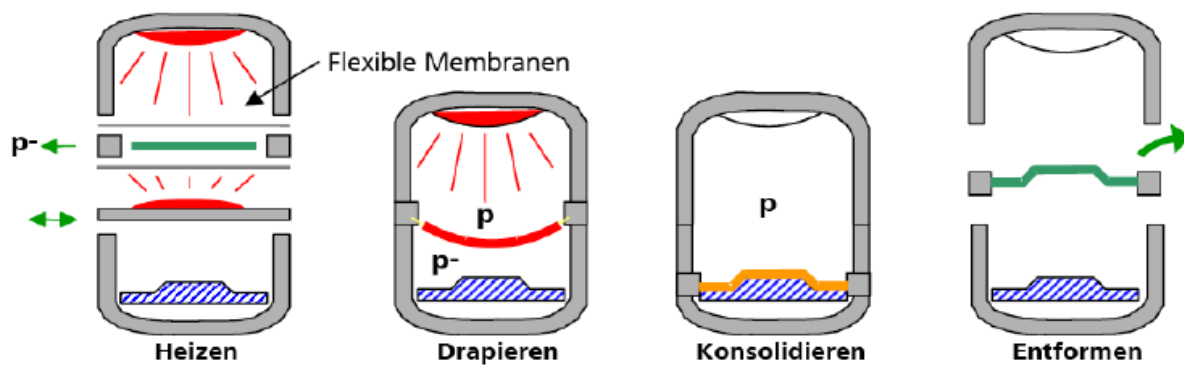


Thermoplast-Prepregs

Prozesskette zur Halbzeugherstellung:



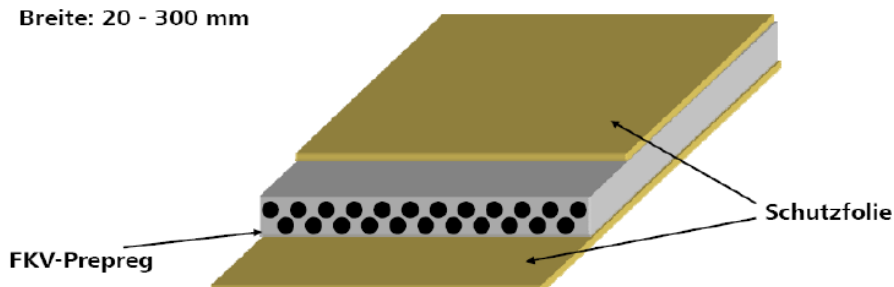
Nicht-isothermes Diaphragmaverfahren



Vorteile	Nachteile
■ Auch Prepregs verarbeitbar ■ Leichte Hinterschneidungen möglich ■ Geringe Matrixoxidation ■ Geringe Faltenbildung ■ Nur eine Werkzeughälfte notwendig ■ Unterschiedliche Laminatdicken	■ Lange Zykluszeiten ■ Hoher Wartungsaufwand und Kosten für das Diaphragma ■ Eigenspannungen und Bauteilverzug durch ungleichmäßiges Abkühlen

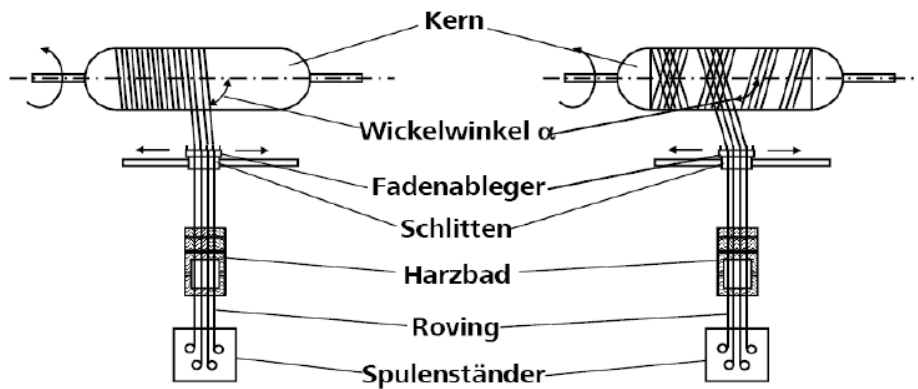
Halbzeuge für Fibre-Placement

FKV-Prepreg-Bändchen mit Schutzfolien
Lieferung auf Trägerspule (Rolle)
Kühlung des Bändchens bis zum Ablegen
Dicke: 0,2 - 0,5 mm
Breite: 20 - 300 mm



Imprägnierung – Direkt-Verarbeitung

Nass-Wickeln (mit Reaktivharzen)



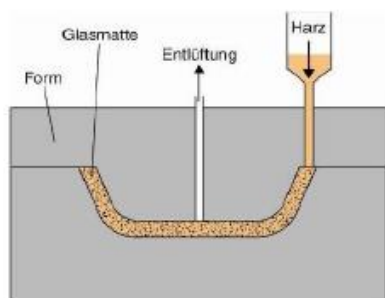
Umfangswickeln

Kreuzwickeln

Harz-Injektionsverfahren

RTM versus Harz-Infusion:

RTM Verfahren



Fülldruck:

- Abhängig von Werkzeugsteifigkeit

Vorteile:

- Gute Bauteiloberfläche
- Gute Reproduzierbarkeit

Nachteil:

- Hoher Investitionsbedarf, insbesondere bei großen Bauteilen

Harzinfusion



Fülldruck:

- < Luftdruck

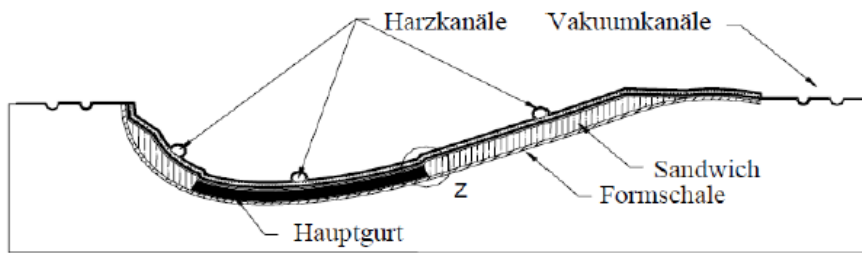
Vorteil:

- Geringeres Investment

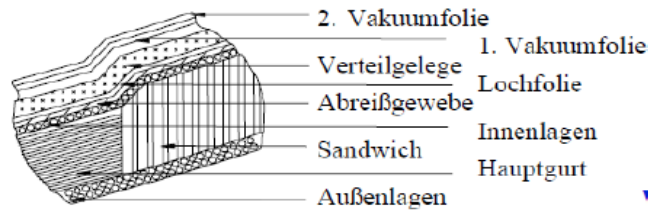
Nachteil:

- Nur eine Bauteilseite konturgenau
- Mehr Materialverbrauch/Abfall

Faserstruktur eines Harzinfusions-Bauteils



Einzelheit Z

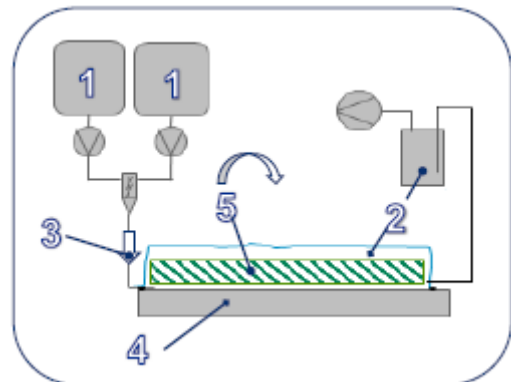


Vakuum-Infusions-Prozess

Produktions-Sequenz:

0. Ablage der Verstärkungsstruktur (manuell)
1. Evakuierung des Harzes (< 1mbar)
2. Evakuierung und Trocknung des Faseraufbaus (10 mbar / 80 °C)
3. Infusion
4. Heizen
5. Entformen nach Durchhärtung

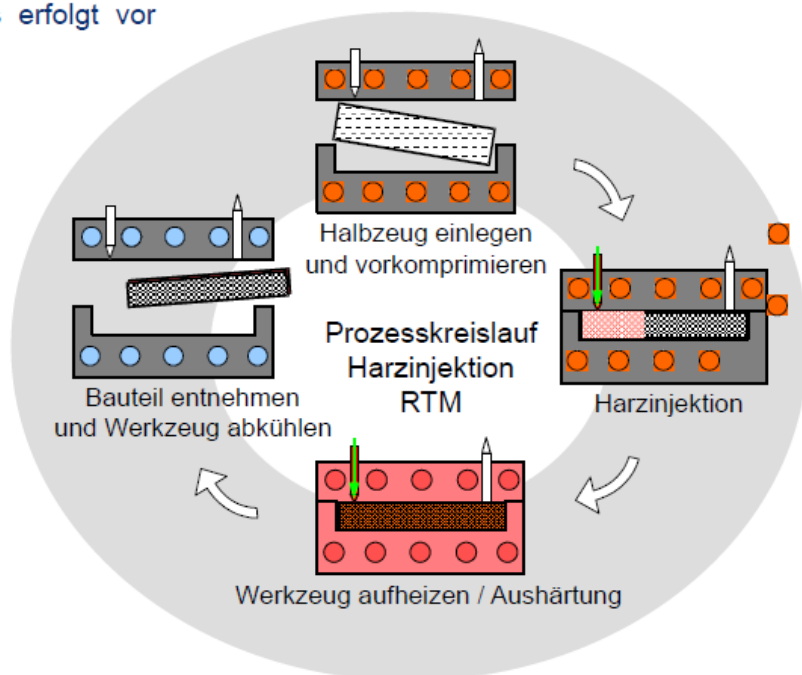
Zyklus: ca. 24 h



Resin Transfer Moulding (RTM)

Komprimierung des Preforms erfolgt vor der Imprägnierung.

Aushärtung des Harzes im Werkzeug.



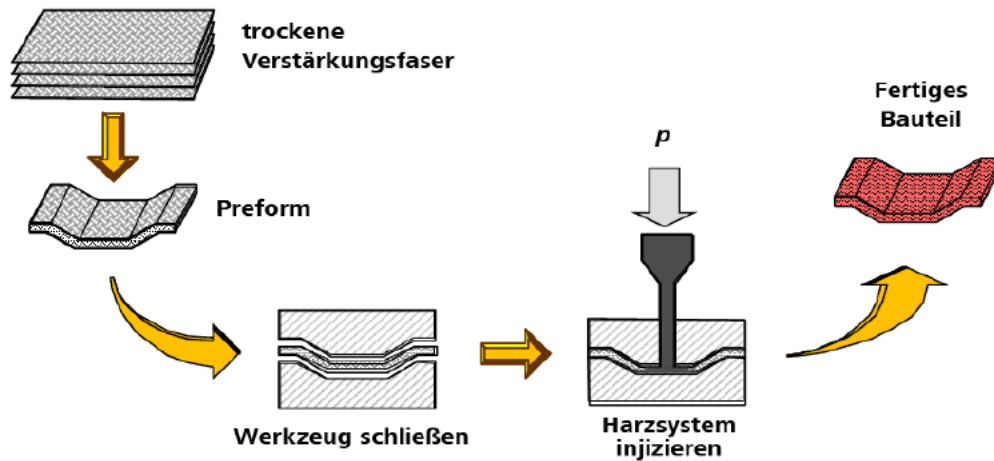
Vorteile

- geeignet für kleine und mittlere Serien
- Realisierung von Bauteilen mit hohen Faservolumengehalten (bis 65 %)
- geschlossener Prozess, daher minimale Emissionen am Arbeitsplatz
- beidseitig gute Oberflächenqualität
- reproduzierbare Qualität:
 - Faservolumengehalt
 - Wanddicke
 - Bauteilgewicht und Abmaße
- konstante, hohe Laminatqualität

Nachteile

- zweiteilige Werkzeuge und Schließmechanismus notwendig
- Zykluszeiten ab ca. 20 Minuten (-> hohe Kosten!)
- Sehr begrenzte Gestaltungsfreiheit

Druck-Injektionsverfahren (RTM)



Compression RTM Technology

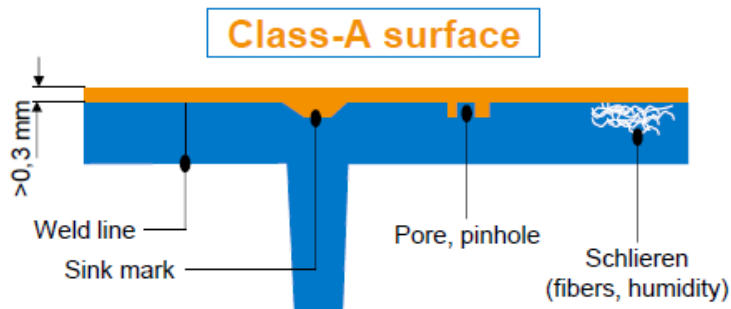
Hochdruck-Imprägnierung und Nachdruck



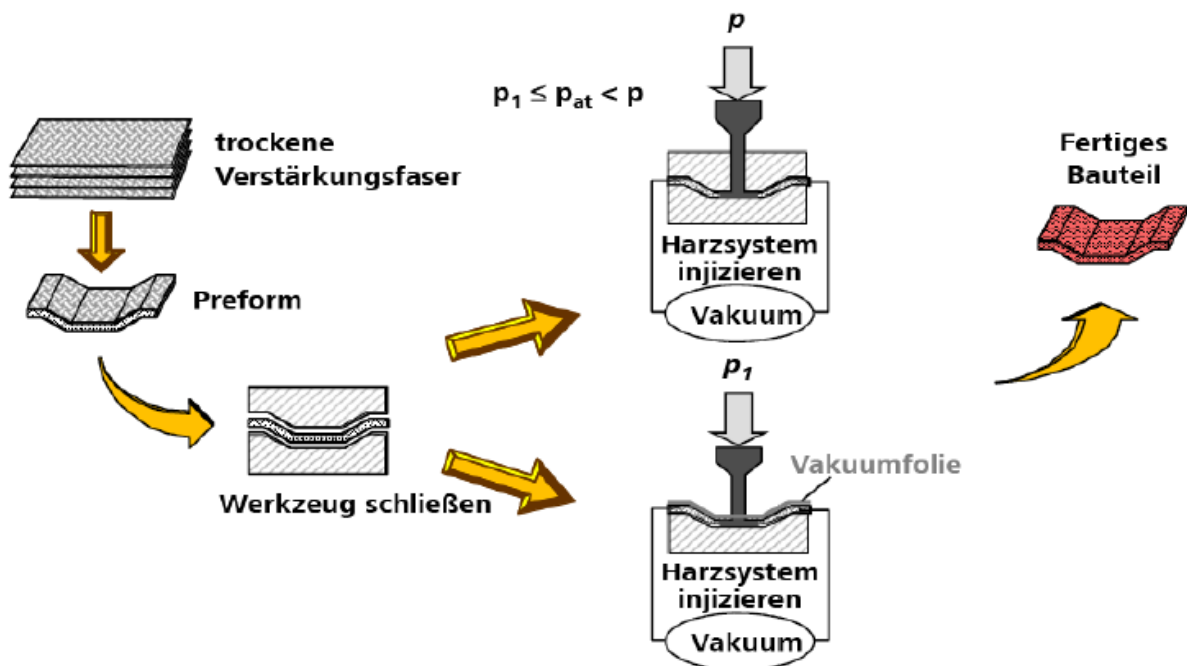
Herausforderung

Oberflächenqualität:

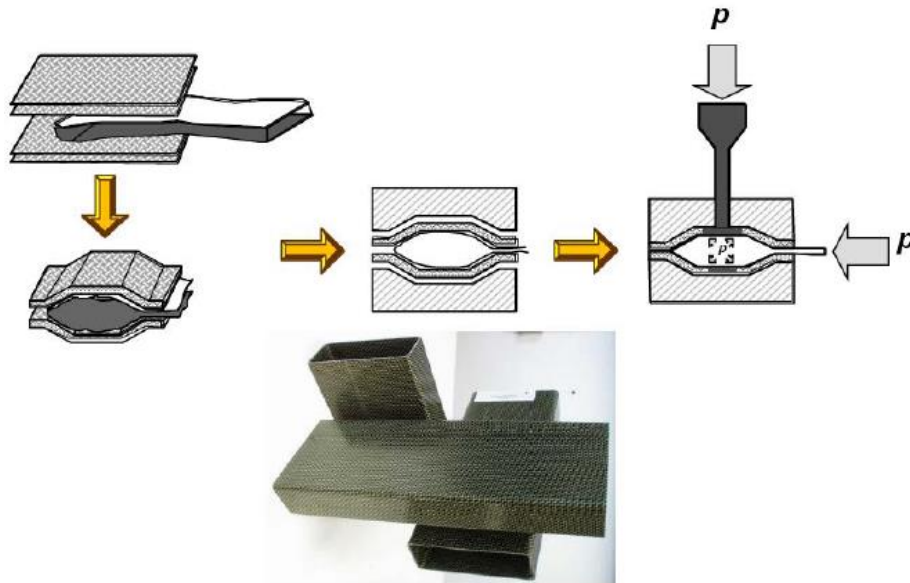
- Sink marks durch unterschiedlichen Schrumpf von Verstärkung und Matrix
- Direkte Sprühlackierung ist nicht möglich
- Sink marks und andere Oberflächendefekte können durch ein In-Mold Coating abgedeckt werden
- Nachschwindung muss kontrolliert werden



Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM)



Schlauchblas-RTM-Verfahren



Fasersprühverfahren – LFI (Produktname KM)

Fasersprühen mit Langfasern (5-15 cm):

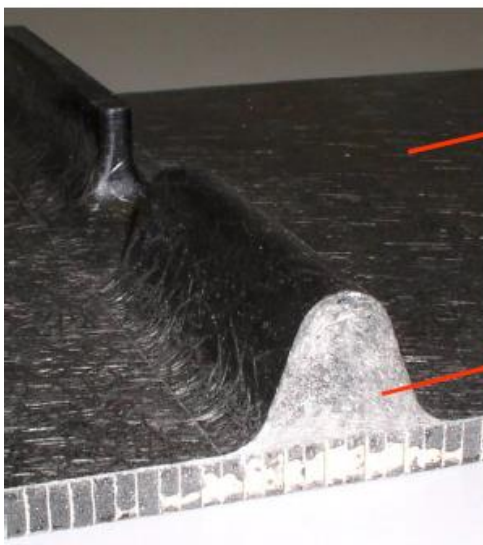
Im LFI (Long Fiber Injection) Prozess werden Glasfaser-Rovings gehäckselt, durch oder neben dem PUR-Mischkopf mit einem Reaktivsystem benetzt und in das Werkzeug eingebracht. Anschließend schließt die Form und das Reaktivsystem härtet aus.

Manuelles Einbringen von Fasermatten entfällt. Fasergehalt und Faserlänge können lokal eingestellt werden.

Maschinenhersteller und ihre Verfahrensnamen:

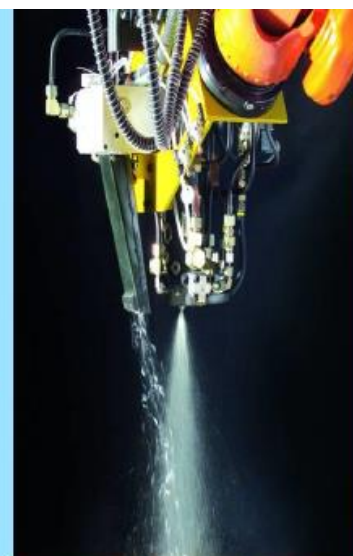
- Cannon InterWet
- Hennecke CSM
- Krauss Maffei LFI

Baypreg CO₂-Schaum & verstärkt mit LGF



Fertigung

1. Besprühen des Laminats aus Glas und Papierwabe mit Baypreg
2. Sprüheintrag in bestimmten Bereichen mit CO₂-beladenem Baypreg und Langfaser-verstärkung (Rippen, Befestigungsstellen)



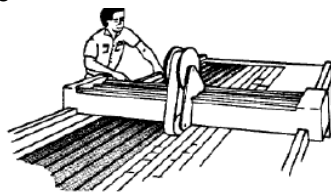
Hennecke CSM mixing head

Formgebung

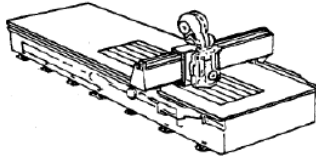
Laminierverfahren für Prepregs



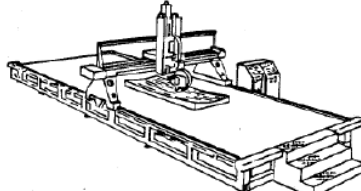
Handlaminieren



Maschinenunterstütztes
Handlaminieren



CNC - Laminatleger



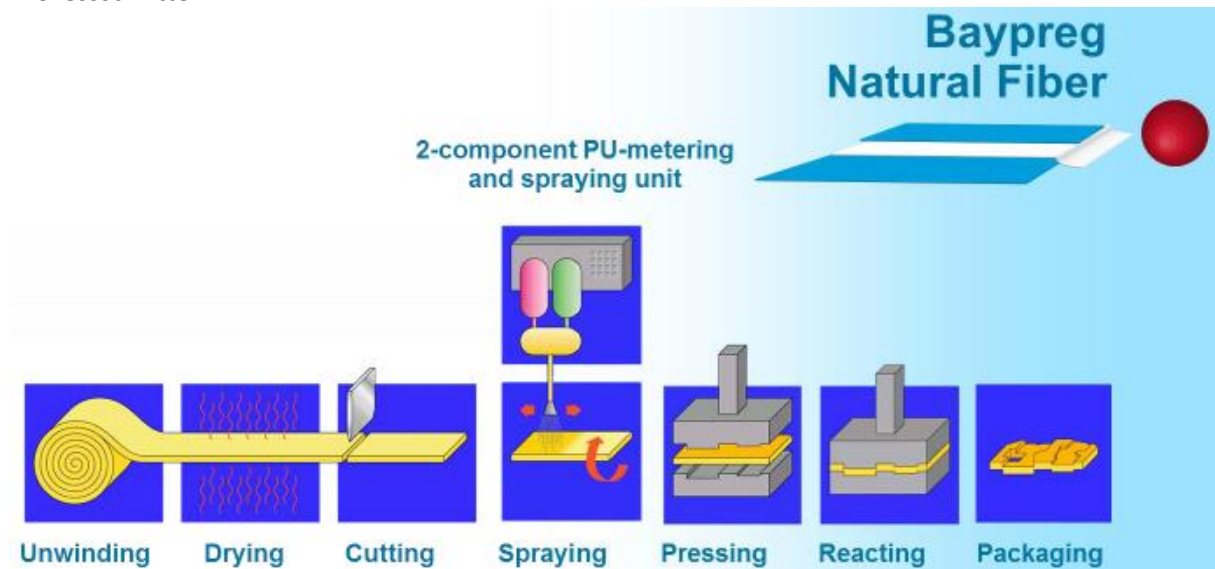
CNC - Bauteilleger

Vorteile und Nachteile des Autoklavprozesses

Vorteile	Nachteile
geringe Werkzeugkosten	lange Zykluszeiten
hohe Gestaltungsfreiheit	hohe Anlagenkosten
einfache Teileintegration (Inserts)	teure Fertigungshilfsmittel (Folien, Dichtungen)
kontrollierte Druck- und Temperaturführung möglich	begrenzte Automatisierbarkeit
nahezu beliebige Halbzeugformen verwendbar	sehr personalintensiv
kontrolliert einstellbare Faserorientierung möglich	Maßhaltigkeit gegenüberliegender Oberflächen schwierig

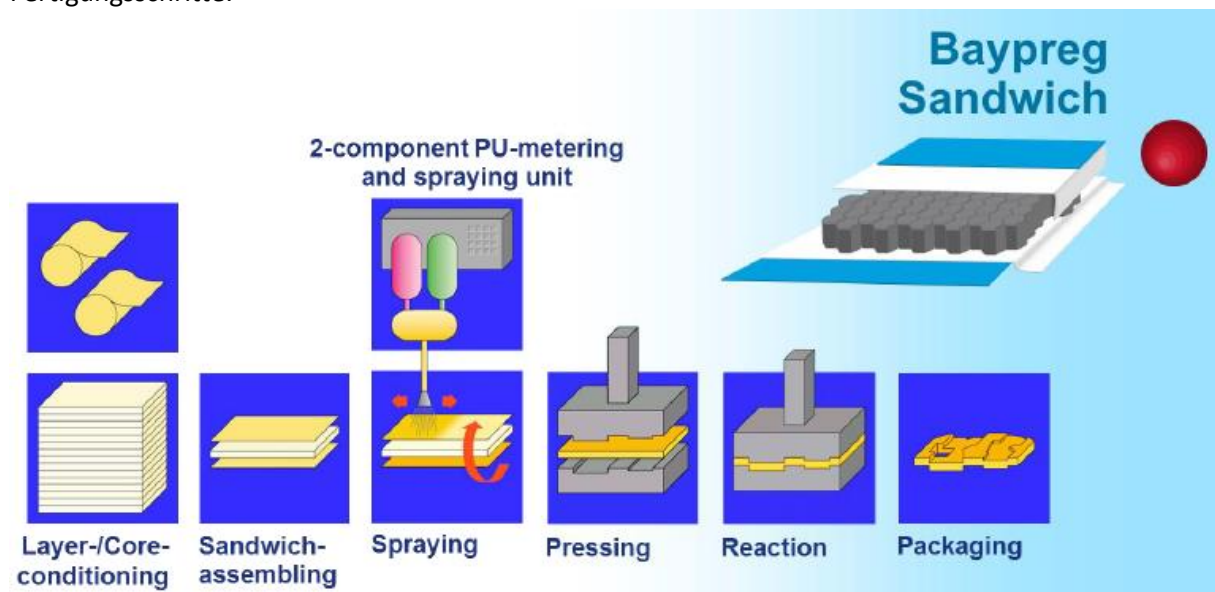
Baypreg (Imprägnier-Pressverfahren)

Prozessschritte:



Baypreg Sandwich

Fertigungsschritte:



Composite Sandwichstrukturen in der Serie

Fahrzeugindustrie:

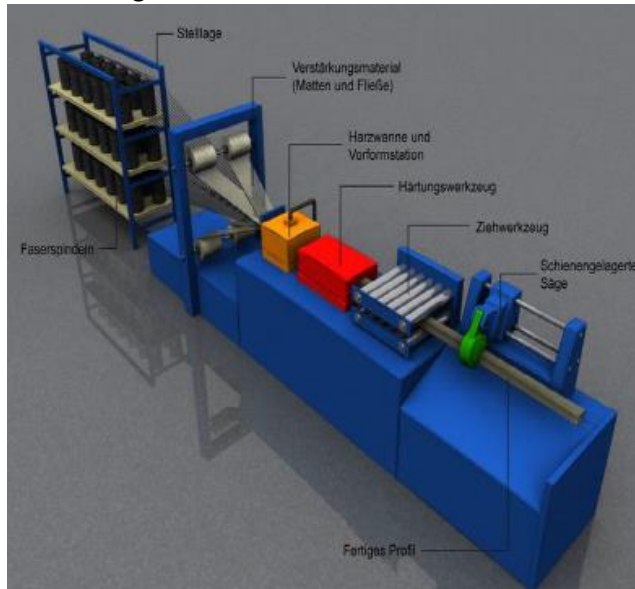
Vorteile

- Deutliche Gewichtsreduzierung bei hoher Steifigkeit
- Effizienter Prozess
 - Prozessintegration
 - Funktionsintegration
- Geringe Emissionen
- Variables Oberflächendesign
- Thermische und akustische Isolation

Strangziehverfahren - Pultrusion

- Das Strangziehverfahren ist eine Methode zur Herstellung faserverstärkter Kunststoffprofile in einem kontinuierlichen Ablauf.

- Die Verstärkungsfasern werden über eine Tauchwalze von ihren Stelllagen in eine Tränkwanne mit Harz geführt und mit dem Harz getränkt. Alternativ kann auch eine Injektionsbox eingesetzt werden.
- Danach wird die imprägnierte Faserstruktur durch das formgebende Werkzeug gezogen.
- Einmal im Werkzeug angelangt, wird der Duroplast bei entsprechender Temperatur kontinuierlich gehärtet.
- Das so ausgehärtete Profil wird anschließend in beliebig lange Teile konfektioniert.

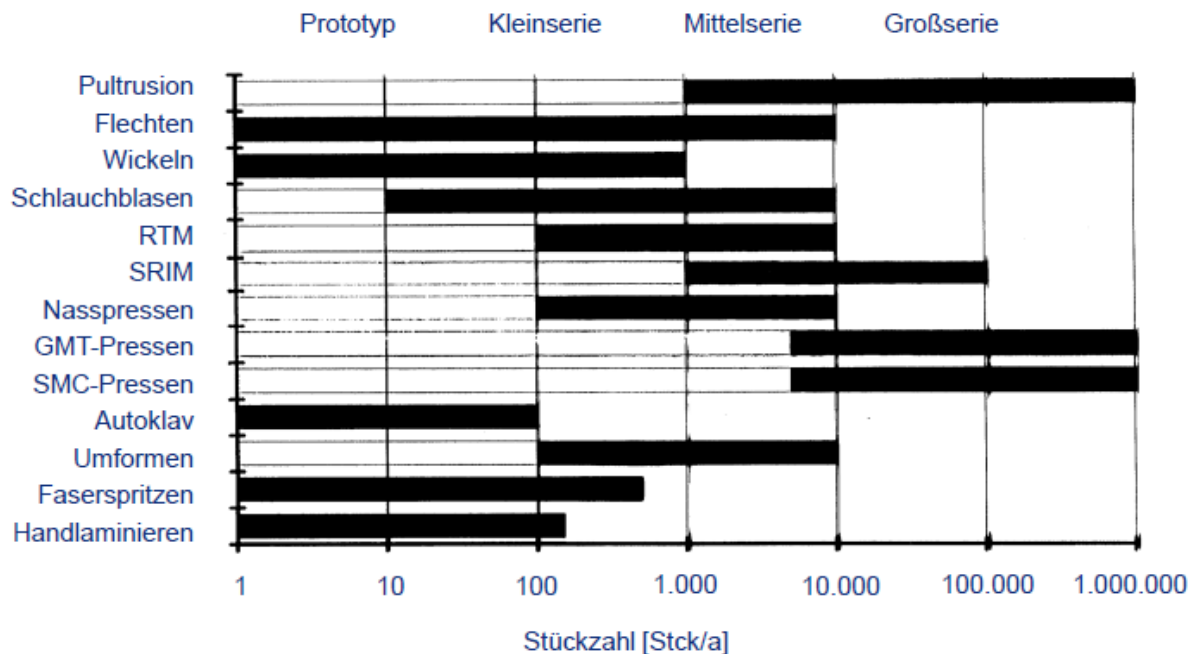


Vorteile von Pultrudaten

- Geringe Wärmedehnung
- Sehr geringe Wärmeleitung
- Geringe Wandstärken, möglich
- Sehr gute mechanische Eigenschaften: höhere Schadenstoleranz
- Sehr gute Korrosions - und Abrasionsbeständigkeit
- Design-Freiheit

Herausforderung Industrialisierung

Wirtschaftliche Stückzahlen für verschiedene FVK-Fertigungsverfahren



Zusammenfassung/Übung 11. und 12.

- Verbundwerkstoffe sind die Kombination von zwei oder mehr Werkstoffen, die sich in Form und/oder Zusammensetzung unterscheiden, um gegenüber den Einzelwerkstoffen verbesserte Eigenschaften zu erzielen.
- Verbundwerkstoffe verhalten sich nicht isotrop. Wesentlicher Vorteil ist, dass die Faserorientierung auf die technische Anwendung zugeschnitten ist.
- Faserwerkstoffe unterscheiden sich hinsichtlich Festigkeit, Wärmeausdehnung und Zähigkeit und ermöglichen Verbundwerkstoffe mit angepassten Eigenschaften. Die Faserarchitektur ermöglicht zudem eine belastungsoptimierte Werkstoffgestaltung.
- Die Matrix des Verbundwerkstoffs bestimmt maßgeblich die Formgebung und die Druckfestigkeit. Thermoplastische wie duromere Matrixwerkstoffe sind verbreitet und bedingen unterschiedlichste Formgebungsverfahren.
- Der Verbundwerkstoff-Herstellungsprozess umfasst das Konfektionieren, die Imprägnierung und die eigentliche Formgebung.