

## Inhalt

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 1. Einführung in die Einschneckenextrusion .....               | 4  |
| Lernziele .....                                                | 4  |
| Allgemeines .....                                              | 4  |
| Extrusion .....                                                | 4  |
| Rohrextrusion .....                                            | 5  |
| Ader und Kabelummantelung .....                                | 5  |
| Profilextrusion .....                                          | 6  |
| Flachfolienextrusion .....                                     | 7  |
| Herstellung der Folienblase .....                              | 8  |
| Extrusionsblasformen .....                                     | 8  |
| Co-Extrusionswerkzeuge .....                                   | 9  |
| 2. Schnecken und Zylindertypen .....                           | 10 |
| Lernziele .....                                                | 10 |
| Schneckentypen .....                                           | 10 |
| Glatte und genutete Buchsen .....                              | 12 |
| Neuartige Extruderkonzepte .....                               | 14 |
| Anlagen- und Messtechnik .....                                 | 16 |
| Wrap-Up - 1 und 2 .....                                        | 19 |
| 3. Einzugzone .....                                            | 20 |
| Lernziele .....                                                | 20 |
| Grundlagen der Schneckenförderung .....                        | 20 |
| Die Berechnung des Durchsatzes in freien Einzugszonen .....    | 21 |
| Die Berechnung des Durchsatzes in genuteten Einzugszonen ..... | 24 |
| 4. Aufschmelzzone .....                                        | 26 |
| Lernziele .....                                                | 26 |
| Zustandsbereiche von Kunststoffen .....                        | 26 |
| Der Aufschmelzvorgang im Schneckengang .....                   | 27 |
| Mathematische Beschreibung des Aufschmelzens .....             | 29 |
| Übertragung auf andere Schnecken und Zylinder .....            | 30 |
| Wrap-up – 3 und 4 .....                                        | 32 |
| 5. Mischzone und Meteringzone .....                            | 33 |
| Lernziele .....                                                | 33 |
| Die Metering-/Mischzone von Einschneckenextrudern .....        | 33 |
| Klassische Meteringzone vs. Mischelemente .....                | 33 |
| Schmelzhomogenität .....                                       | 34 |
| Auslegung der Meteringzone .....                               | 35 |
| Auslegung von Mischelementen .....                             | 36 |

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 6. Prozesspraxis .....                                              | 39  |
| Lernziele .....                                                     | 39  |
| Extruderbedienung.....                                              | 39  |
| Extruder- und Werkzeugennlinien .....                               | 40  |
| Produktwechsel auf Extrudern .....                                  | 41  |
| Troubleshooting .....                                               | 42  |
| 7. Prozesssimulation in der Extrusion .....                         | 45  |
| Lernziele .....                                                     | 45  |
| Modellierung .....                                                  | 45  |
| Durchströmung von Extrusionswerkzeugen .....                        | 47  |
| Numerische Berechnung von Mischprozessen .....                      | 48  |
| 8. Thermoformen .....                                               | 50  |
| Thermoformen .....                                                  | 50  |
| Halbzeuge – Herstellung und Eigenschaften.....                      | 53  |
| Halbzeugerwärmung – Methoden und Berechnung.....                    | 55  |
| Zusammenfassung.....                                                | 68  |
| Formgebung – Verfahrensvarianten und Simulation.....                | 68  |
| Einige Sonderverfahren .....                                        | 79  |
| Zusammenfassung.....                                                | 80  |
| 9. Einführung Spritzgießen .....                                    | 82  |
| Lernziele .....                                                     | 82  |
| Allgemein.....                                                      | 82  |
| Aufbau und Komponenten einer Spritzgießmaschine .....               | 82  |
| Zyklusablauf.....                                                   | 84  |
| Plastifizier- und Einspritzeinheit.....                             | 85  |
| Schließereinheit.....                                               | 96  |
| Steuerung und Peripherie .....                                      | 99  |
| 10. Spritzgießprozess Parameter.....                                | 101 |
| Lernziele .....                                                     | 101 |
| Einspritzvorgang und Nachdruckphase.....                            | 101 |
| Hubvolumen von Plastifizieraggregaten .....                         | 104 |
| Prozessparameter Spritzgießen .....                                 | 105 |
| Lunkerentstehung und -vermeidung.....                               | 109 |
| 11. Spritzgießwerkzeuge I .....                                     | 113 |
| Lernziele .....                                                     | 113 |
| Aufbau von Spritzgießwerkzeugen und Anforderungen.....              | 113 |
| Unterscheidung von Spritzgießwerkzeugen nach Entformungssystem..... | 115 |
| Rheologische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen .....               | 118 |
| Thermische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen.....                  | 126 |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12. Spritzgießwerkzeuge II .....                                           | 133 |
| Lernziele .....                                                            | 133 |
| Mechanische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen .....                       | 133 |
| Füllbildermittlung .....                                                   | 137 |
| Entlüftung von Werkzeugen .....                                            | 139 |
| Entwicklungsschritte bei der Konstruktion von Spritzgießwerkzeugen .....   | 142 |
| Zusammenfassung .....                                                      | 146 |
| 13. Konstruktion Prozesssimulation Spritzgießen .....                      | 147 |
| Lernziele .....                                                            | 147 |
| Konstruktionsrichtlinien .....                                             | 147 |
| Kunststoff-Formteile – Toleranzen und Abnahmebedingungen (DIN 16742) ..... | 149 |
| Nutzen der Prozesssimulation und Beispiele .....                           | 153 |
| Modellierung .....                                                         | 160 |
| Fehler an Spritzgießbauteilen, Fehlerkategorien → Spritzgießfehler .....   | 165 |
| 14. Sonderverfahren Spritzgießen .....                                     | 171 |
| Lernziele .....                                                            | 171 |
| Bedarf an Sonderverfahren .....                                            | 171 |
| Unterteilung ausgewählter Sonderverfahren .....                            | 171 |
| Ein-Komponenten-Verfahren .....                                            | 172 |
| Varietherme Werkzeugtemperierung .....                                     | 172 |
| Spritzprägen .....                                                         | 174 |
| Thermoplast-Schaum-Spritzgießen .....                                      | 176 |
| Kaskaden-Spritzgießen .....                                                | 178 |
| Direktverarbeitungsverfahren .....                                         | 178 |
| Mehr-Komponenten-Verfahren .....                                           | 180 |
| Montage- und Verbundspritzgießen .....                                     | 180 |
| Sandwich- Spritzgießen .....                                               | 182 |
| Fluidinjektionstechnik (GIT&WIT) .....                                     | 184 |
| Verfahren mit Einlegeteilen .....                                          | 186 |
| Hinterspritztechnik .....                                                  | 187 |
| Spritzgießen mit Organoblechen .....                                       | 188 |
| Schmelz-/Lösekernverfahren .....                                           | 189 |
| Zusammenfassung .....                                                      | 189 |

# 1. Einführung in die Einschneckenextrusion

## Lernziele

Nach dieser Veranstaltung sollten Sie...

- die wichtigsten Anwendungsfelder und typische Produkte für Einschneckenextruder kennengelernt,
- einen Überblick über typische Extrusionswerkstoffe erlangt,
- den typischen Aufbau einer Extrusionslinie verstanden und
- Kenntnis über die verschiedenen Prozessvarianten verinnerlicht haben.

## Allgemeines



Extrusion nach der Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN8580:

Schaffen der Form -> Zusammenhalt schaffen -> Hauptgruppe 1 - Urformen

Typische Extrusionsprodukte:

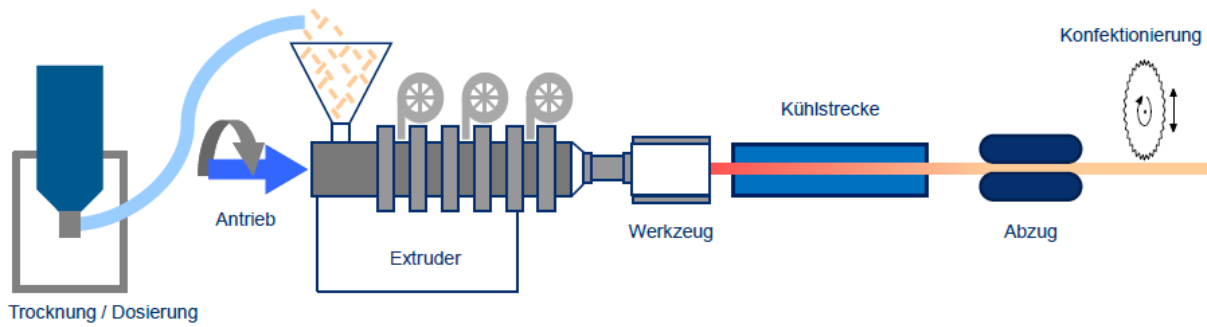
- Rohre
- Profile
- Schläuche
- Co-Extrudate
- Platten und Stegplatten
- Folien
- Kabelummantelungen
- Netze

## Extrusion

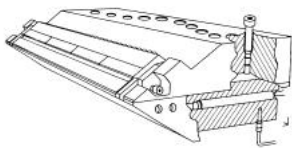
„extrudere“ = [lat.] hinausstoßen, hinausdrücken

- Aufgaben des Extruders: Fördern, Verdichten, Aufschmelzen, Homogenisieren, Ausstoßen
- Aufgabe des Werkzeuges: Formgebung
- Aufgabe der Kühlstrecke: Kalibrierung
- Weitere Peripherieaufgaben: Trocknung, Abziehen, Konfektionierung

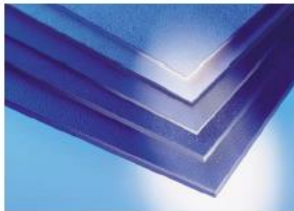




### Platten- und Flachfolienextrusion

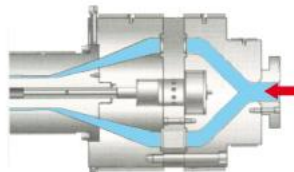


Extrusionswkz. für Platten + Flachfolie



Platten

### Rohr- und Profilextrusion

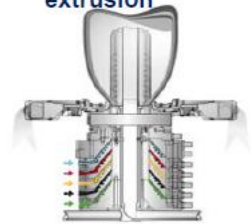


Extrusionswerkzeug für Rohre



Rohre

### Schlauch- und Blasfolienextrusion



Extrusionsdüse für Blasfolien



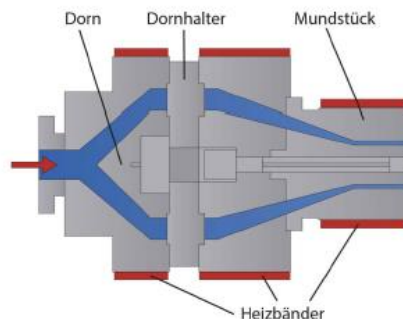
z. B. Müllsäcke und Einkaufsbeutel

### Rohrextrusion

- Rohrdurchmesser mit PE-HD bis zu 2.600 mm
- Rohrdurchmesser mit PVC bis zu 1.600 mm
- Einsatz meist als erdverlegte Ver- und Entsorgungsrohre im Städte-sowie im Bergbau
- Aufwändige Nachfolgeeinheiten wie Vakuumtank, Kühltank, Abzug und Trennvorrichtung erforderlich

### Werkzeuge zur Rohrextrusion

In Stegdornhalterwerkzeugen fließt die Schmelze um einen Verdrängerkörper („Dorn“) herum und wird so ringförmig ausgeformt. Die Befestigung des Dorns am Werkzeug erfolgt über radiale Stege.



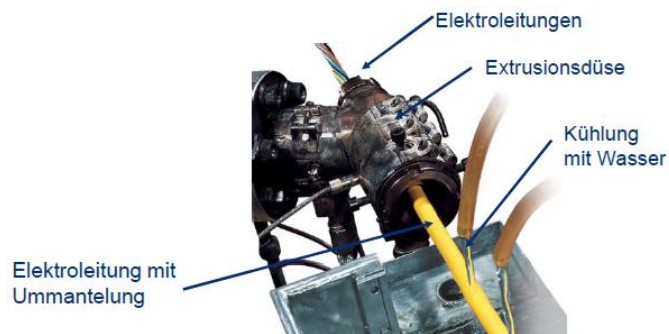
**Vorteil:** einfache Bauweise

**Nachteil:** Schmelzeaufteilung durch Stege -> Fließmarkierungen/Bindenähte

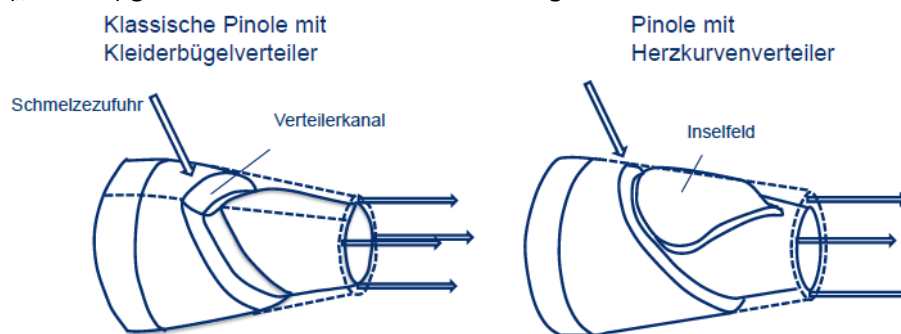
### Ader und Kabelummantelung

Werkzeug mit kreisförmigem Austritt

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



Bei Pinolenwerkzeugen wird die Schmelze nicht frontal, sondern quer an einen Verdrängerkörper („Pinole“) geleitet und umfließt diesen entlang eines Verteilerkanals.



**Vorteil:** Zuführung von zu ummantelnden Halbzeugen (z.B. Kabel) durch die Pinole möglich

**Nachteil:** Bindaht auf der Rückseite der Pinole und ggf. hinter der Herzkurve

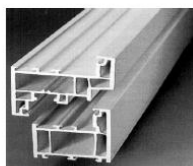
## Profilextrusion



Extrudierte Profile (Beispiele)



Bauprofil mit Naturfaser

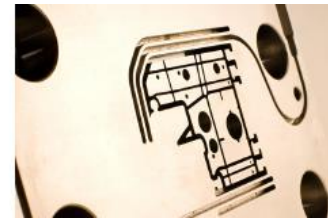
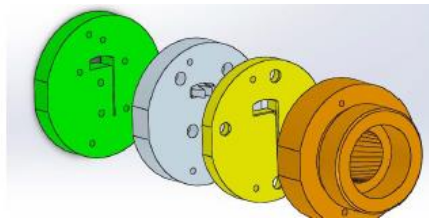
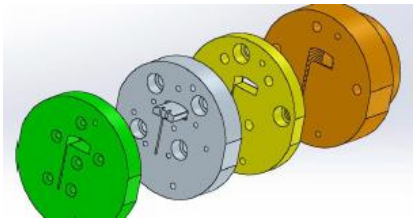


Fensterprofil



Profil mit Dekor

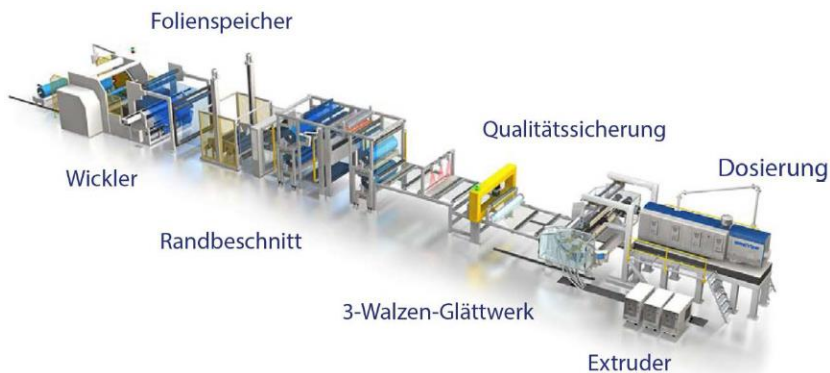
- Profilwerkzeuge formen die Schmelze zu komplexen Querschnitten aus, welche auch Kammern, Stege und andere Strukturen enthalten können.
- Profilwerkzeuge sind üblicherweise modular aufgebaut. Der Fließkanal ändert sich stetig vom zylindrischen Kanaleinlauf zu einer gewünschten Profilgeometrie.
- Werkzeuge für Profile mit Hohlkörpern/Kammern sind mit Verdrängerkörpern ausgestattet.
- Der Werkzeugaustritt hat in der Regel nicht exakt die gleiche Form und die gleichen Maße wie das spätere Produkt.



**Vorteile:** keine scharfkantigen Querschnittsveränderungen; hohe Maßhaltigkeit

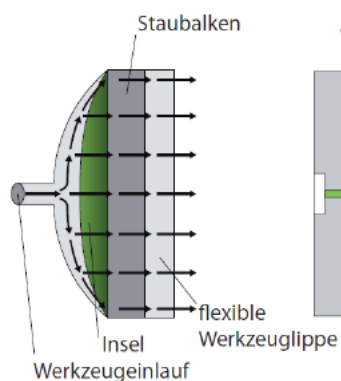
**Nachteile:** komplexe Auslegung und Fertigung; Einfallstellen wegen schwieriger Innenkühlung

## Flachfolienextrusion

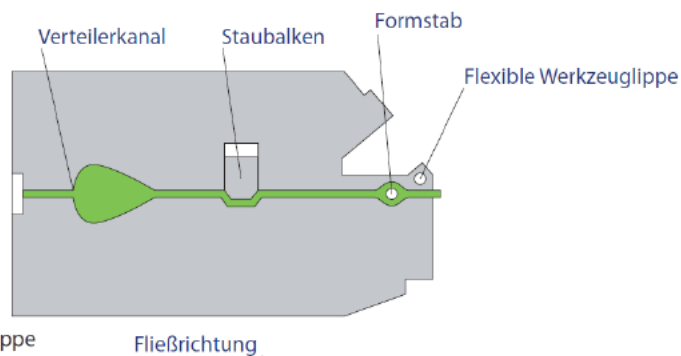


- Breitschlitzdüsen verteilen die Schmelze flächig zur Herstellung von Halbzeugen mit großen Breiten-/Dicken-Verhältnissen (Flachfolien, Platten, Beschichtung von z.B. Papier).
- Das Werkzeug besteht aus Verteilerkanal, Inselfläche, verstellbarer Parallelzone und einer Werkzeuglippe.

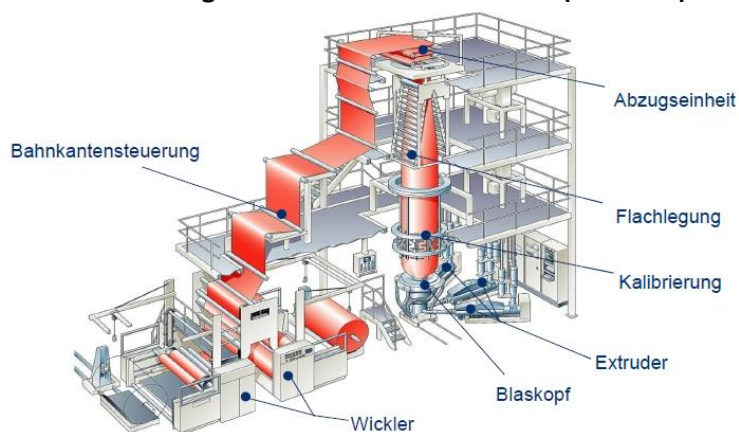
**Draufsicht**



**Seitenansicht**

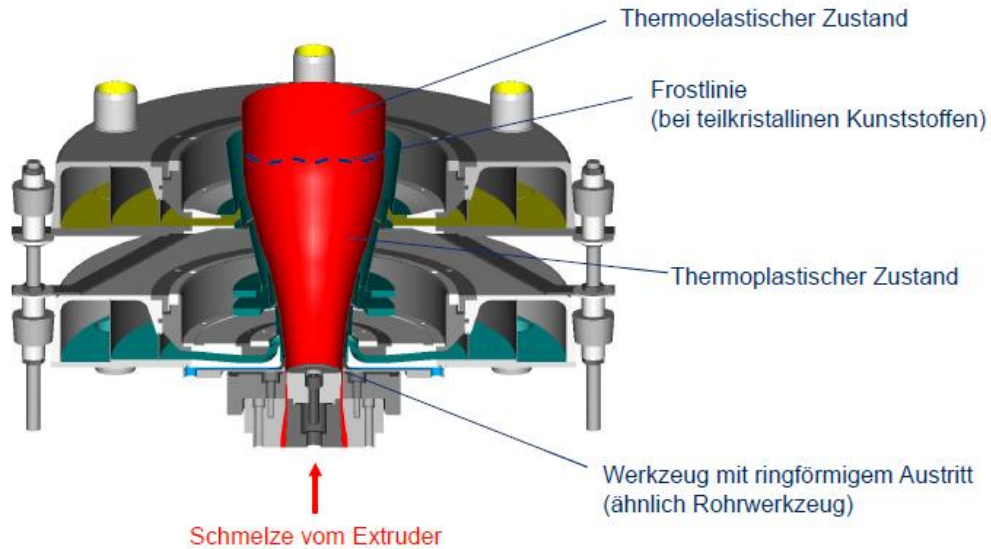


## Produktionsanlage für Drei-Schicht-Blasfolien (Schlauch)

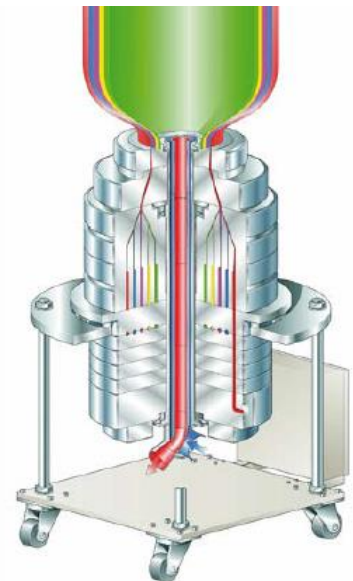
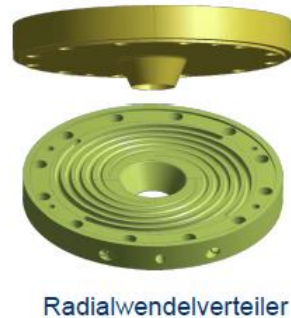


## Herstellung der Folienblase

In der Blasfolienextrusion lassen sich Folien von 0,02 bis ca. 1 mm Dicke herstellen.



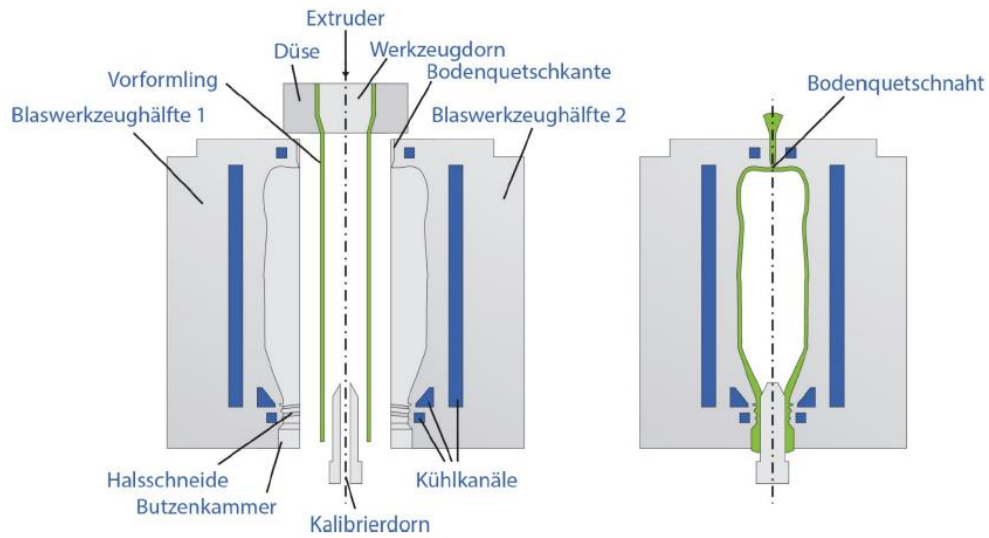
## Extrusionswerkzeuge für die Blasfolienextrusion



## Extrusionsblasformen

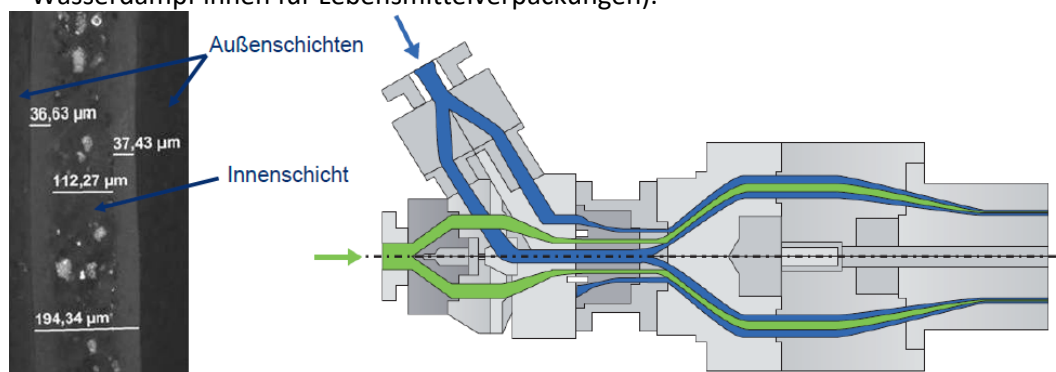
- Verfahren zur Herstellung von Hohlkörpern und behälterartigen Produkten
- Dies umfasst Verpackungsartikel wie Flaschen, Kanister oder Fässer, aber auch technische Teile wie Lüftungskanäle, Surfbretter, Kraftstoffbehälter oder Kofferhalbschalen.

## Blasformwerkzeug / Schema des Verfahrens



## Co-Extrusionswerkzeuge

- Co-Extrusion ermöglicht die Verbindung verschiedener Kunststoffe zu einem Produkt.
- Die verschiedenen Kunststoffe übernehmen dann jeweils unterschiedliche Funktionen (z. B. Mehrschichtverbund mit bedruckbarem Kunststoff außen und Sperrschicht gegen Wasserdampf innen für Lebensmittelverpackungen).





## 2. Schnecken und Zylindertypen

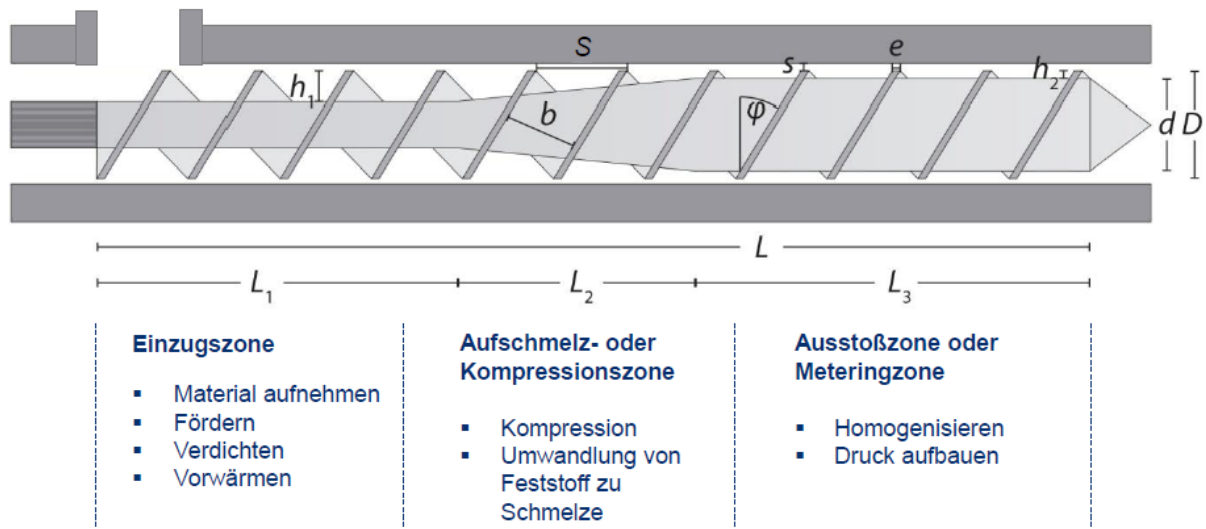
### Lernziele

Nach dieser Veranstaltung sollten Sie...

- die gängigsten Bauformen für Extrusionsschnecken unterscheiden gelernt,
- Kenntnis über die verschiedenen Funktionszonen eines Extruders und deren Aufgaben erlangt,
- Die verfahrenstechnischen Unterschiede von genuteten und glatten Extrusionszylindern verstanden und
- Die üblichen Komponenten der Anlagen und Messtechnik kennengelernt haben.

### Schneckentypen

#### Konventionelle Drei-Zonen-Schnecke



Verhältnis von Länge  $L$  zu Durchmesser  $D$  eines Extruders ist ein charakteristisches Unterscheidungsmerkmal.

Beispiel: 90-25D oder 90/25D

Bedeutet: Schneckendurchmesser  $D = 90$  mm

Schneckenlänge =  $25 \times 90 = 2250$  mm

#### Legende

$D$  = Schneckendurchmesser  
 $d$  = Kerndurchmesser  
 $h$  = Gangtiefe  
 $e$  = Stegbreite  
 $s$  = Schneckenspiel  
 $S$  = Gangsteigung  
 $\varphi$  = Gangsteigungswinkel  
 $b$  = Gangbreite  
 $L$  = Länge

## Weiterentwicklungen der Drei-Zonen-Schnecke



Drei-Zonen-Schnecke

→ Einfachster Schneckentyp



Entgasungsschnecke

→ Kunststoffe mit flüchtigen Bestandteilen



Kurzkompressions-Schnecke

→ vorwiegend teilkristalline TP



Langkompressions-Schnecke

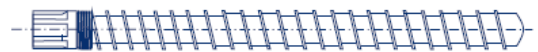
→ PVC



Barrierschnecke (mit Mischteil)

→ „Allrounder“ / „State of the Art“

(Scherempfindlichkeit beachten!)

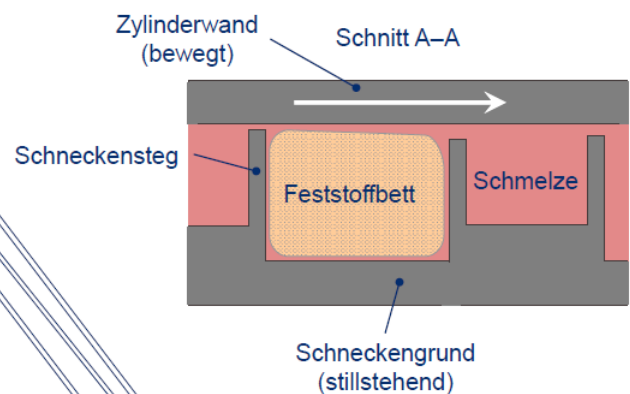
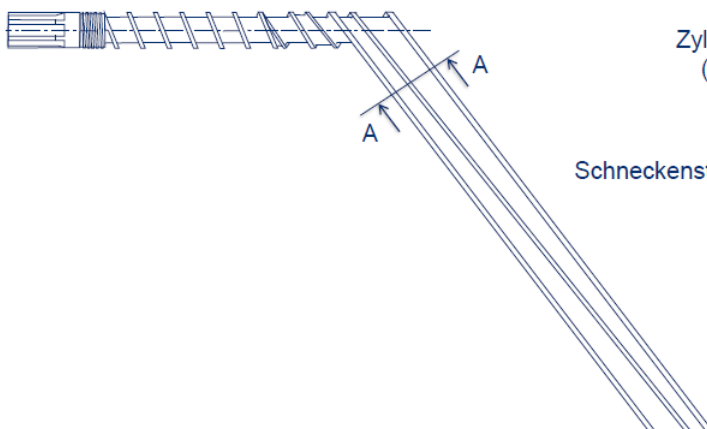


Wellenschnecke

→ schwer schmelzbare TP

## Schneckenabwicklung und Zwei-Platten-Modell

- Vereinfachte Betrachtung des Schneckenkanals als abgewinkelte, rechteckige Rinne
- Zwei-Platten-Modell mit kinematischer Umkehr -> bewegte Zylinderwand, feststehende Schnecke

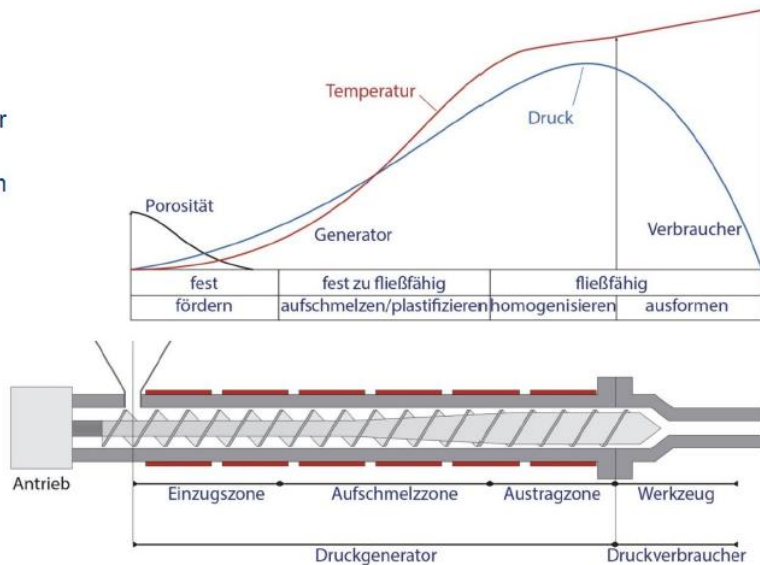
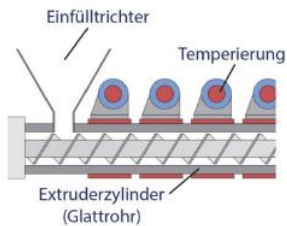


## Glatte und genutete Buchsen

### Druckaufbau in Glattrohretruder

#### Glattrohretruder

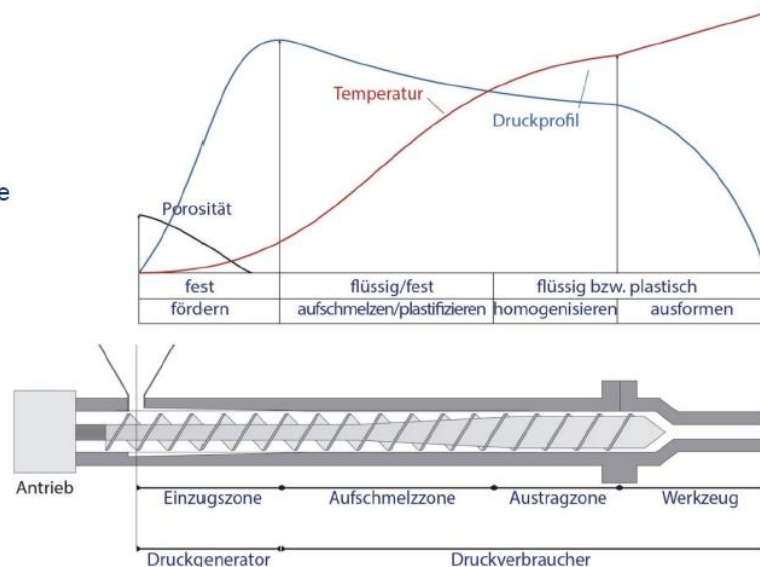
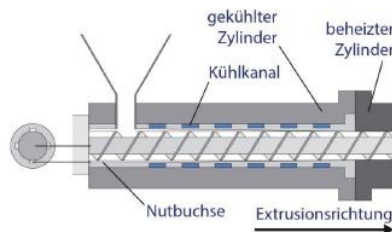
- Zylinderbohrung durchgehend glatt
- Kontinuierlicher Druckaufbau über gesamte Schneckenlänge
- Mischwirkung mittels Gegendruck am Werkzeug steuerbar
- Durchsatz gedrucktabhängig



### Druckaufbau in Nutbuchsenextrudern

#### Nutbuchsenextruder

- Einzugszone mit Nuten versehen
- Zwangsförderung
- Druckaufbau in Einzugszone
- Weitere Extruderzonen sowie Werkzeug als Druckverbraucher
- Durchsatz gedrucktunabhängig



### Überlagerung von Schlepp- und Druckströmung

#### Glattrohretruder

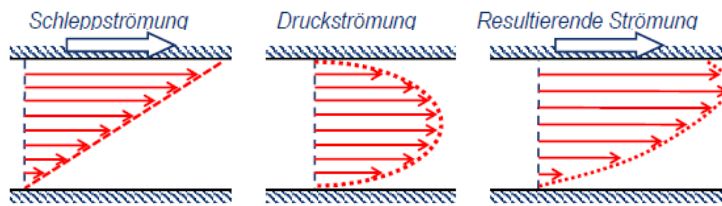
- Druckaufbau entlang des Extruders -> Druckströmung wirkt Schleppströmung entgegen.
- Höhere Verweilzeit, gedrucktabhängiger Durchsatz



#### Nutbuchsenextruder

- Druckaufbau in der Einzugszone -> Druckströmung wirkt in gleiche Richtung wie Schleppströmung
- Extruder wird „überfahren“.
- Geringere Verweilzeit, gedrucktunabhängiger Durchsatz





## Förderleistung in Abhängigkeit der Schlepp- und Druckströmung

Schleppströmung

$$\dot{V}_s = K_s \cdot h \cdot n \quad \text{mit } K_s = \frac{1}{2} \cdot D^2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi$$

Druckströmung

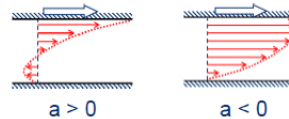
$$\dot{V}_p = K_p \cdot \frac{-\Delta p \cdot h^3}{\eta \cdot L} \quad \text{mit } K_p = \frac{1}{2} \cdot D \cdot \sin^2 \varphi$$

Resultierende Förderleistung

$$\dot{V} = \dot{V}_s + \dot{V}_p \quad (\dot{V}_p < 0 \text{ für glatte und } \dot{V}_p > 0 \text{ für genutete Zylinder})$$

Drosselfaktor

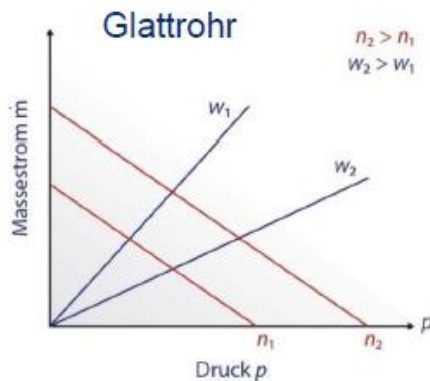
$$a = 1 - \frac{\dot{V}}{\dot{V}_s}$$



## Vergleich der beiden Extruderkonzepte

### Glattrohrextruder

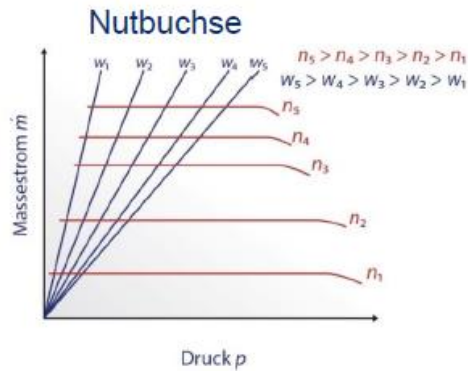
- Bei konstanter Schneckendrehzahl und steigendem Werkzeugwiderstand sinkt der Massendurchsatz



n: Schneckendrehzahl  
w: Werkzeugwiderstand  
p: Werkzeugdruck  
m: Massedurchsatz

### Nutbuchsentruder

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



### Durchsatzbestimmende Zonen

Grundsätze (unabhängig vom Zylindertyp)

- Die Einzugszone bestimmt den maximal möglichen Durchsatz (Förderkapazität).
- Die Aufschmelzzone bestimmt die Aufschmelzkapazität.

→ Förder- und Aufschmelzkapazität müssen aufeinander abgestimmt sein!

Glattrohrenextruder mit Drei-Zonen-Schnecke

- Das Druckaufbauvermögen der Ausstoßzone ist durchsatzbestimmend.
- Die Einzugszone muss diesen Durchsatz bereitstellen.



Nutbuchsensextruder (unabhängig vom Schneckentyp)

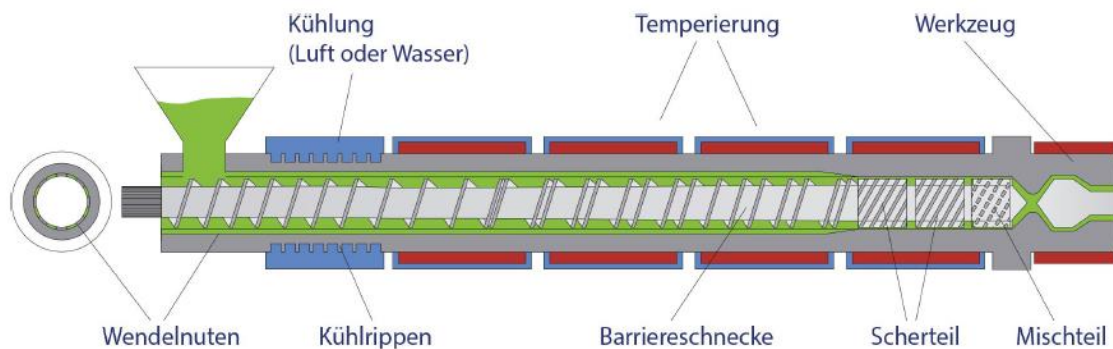
- Die Einzugszone ist durchsatzbestimmend (Zwangsförderung).
- Die übrigen Zonen limitieren ggf. die Aufschmelzkapazität.

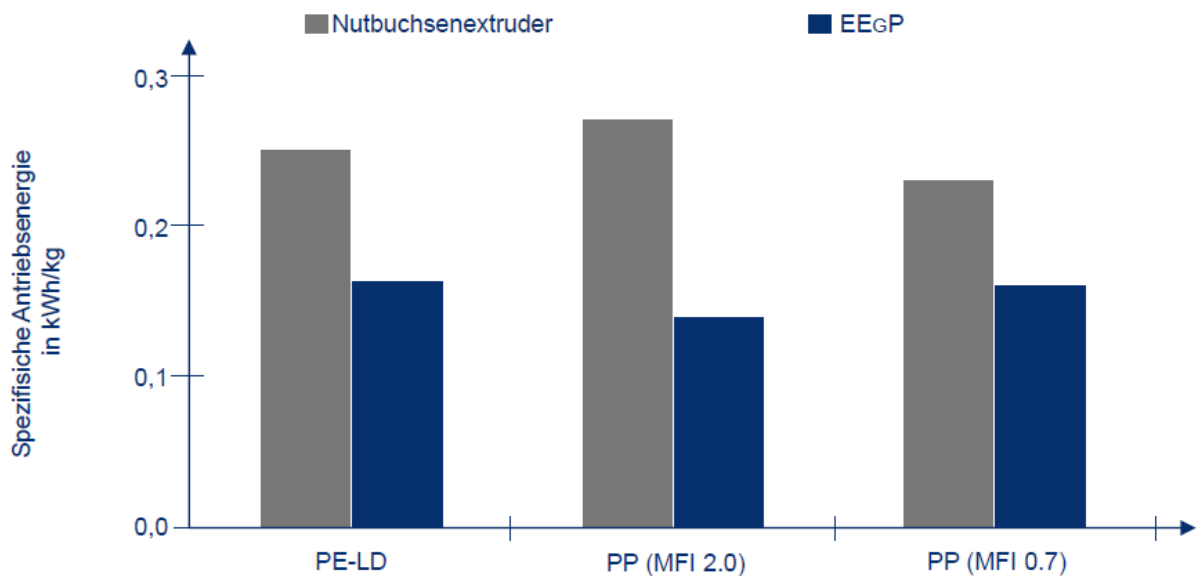
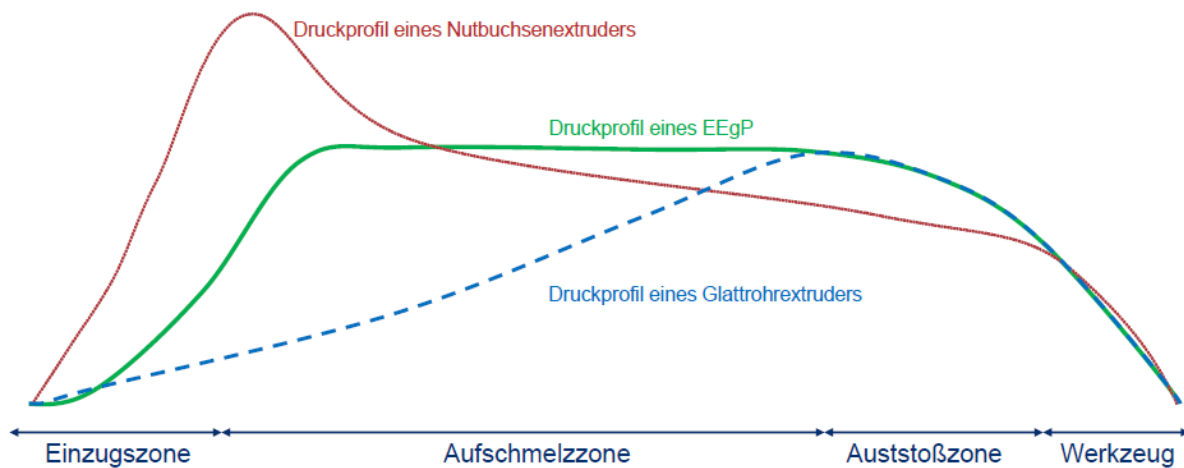


### Neuartige Extruderkonzepte

#### Einschneckenextruder mit genuteter Plastifizierzone (EEgP)

- Durchgehend genuteter Zylinder (Axial- oder Wendelnut)
- Barrierschnecke mit Scher- oder Mischelementen





## Wellenschnecken

### Funktionsprinzip von Wellenschnecken

- Kanaltiefe steigt wellenförmig an und ab
- Wellenberge brechen Feststoffbett auf  
→ Dispersives Aufschmelzen  
→ Zerteilen von Agglomeraten
- Wiederholung von Kompression und Dekompression  
→ Niedrigere Schmelzetemperaturen
- Pumpen bei Schnecken > 90 mm Durchmesser

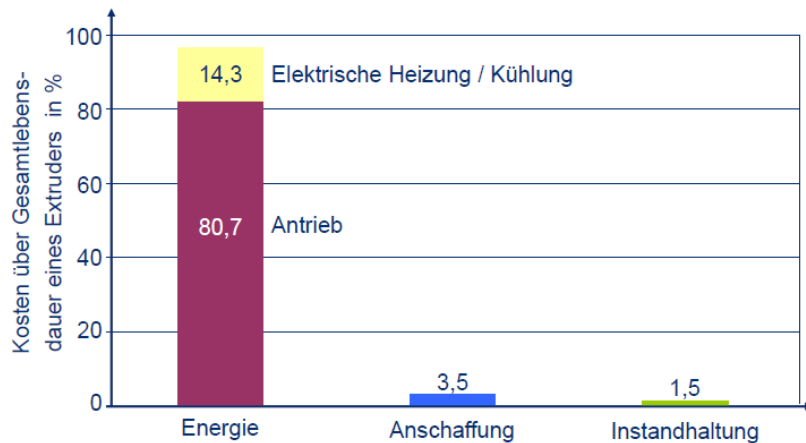


### Zweigängige Wellenschnecke

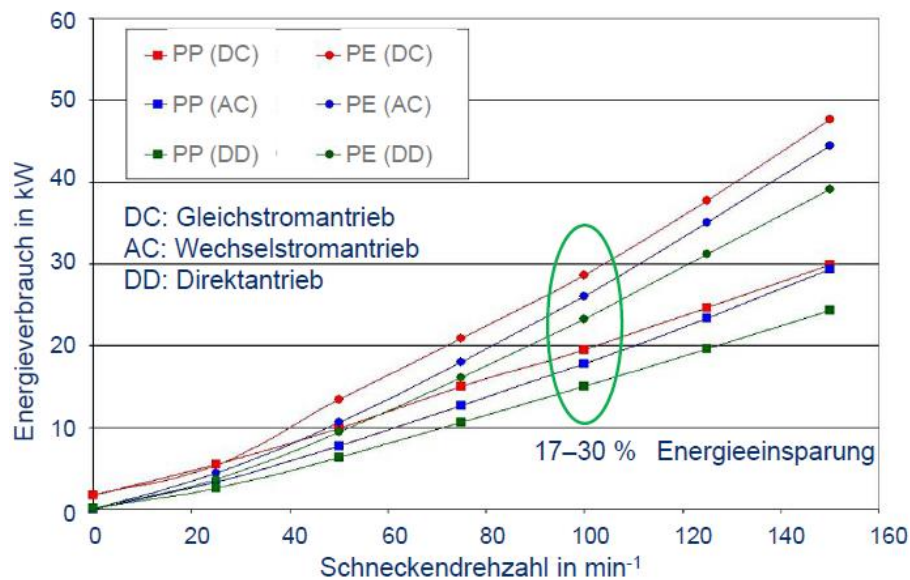
- Double Wave Screw
- Wellenberg ↔ Wellental
- Feststoff wird über die Wellenberge gedrückt.
- Schmelze fließt über einen abgesetzten Nebesteg.  
→ Gute Aufschmelzleistung  
→ Gute Schmelzehomogenität



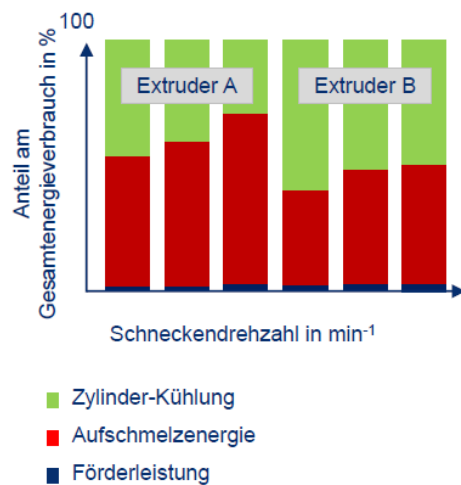
## Kostenfaktoren



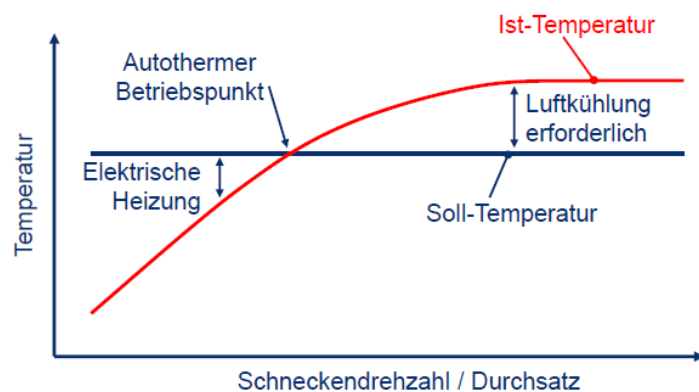
## Effizienz verschiedener Antriebsarten



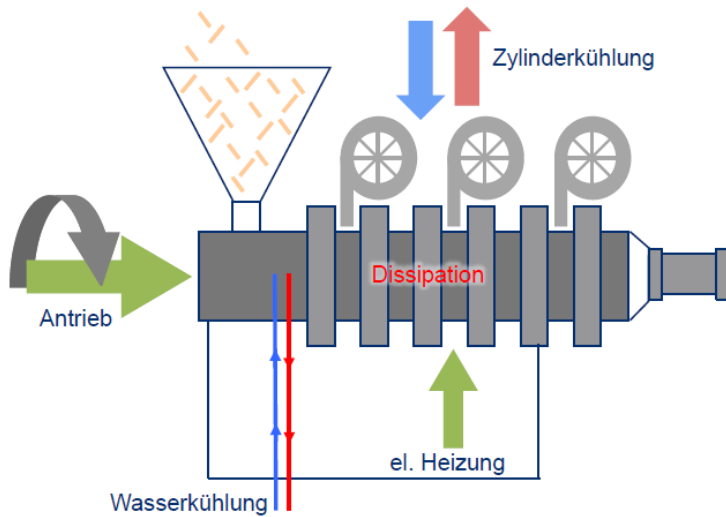
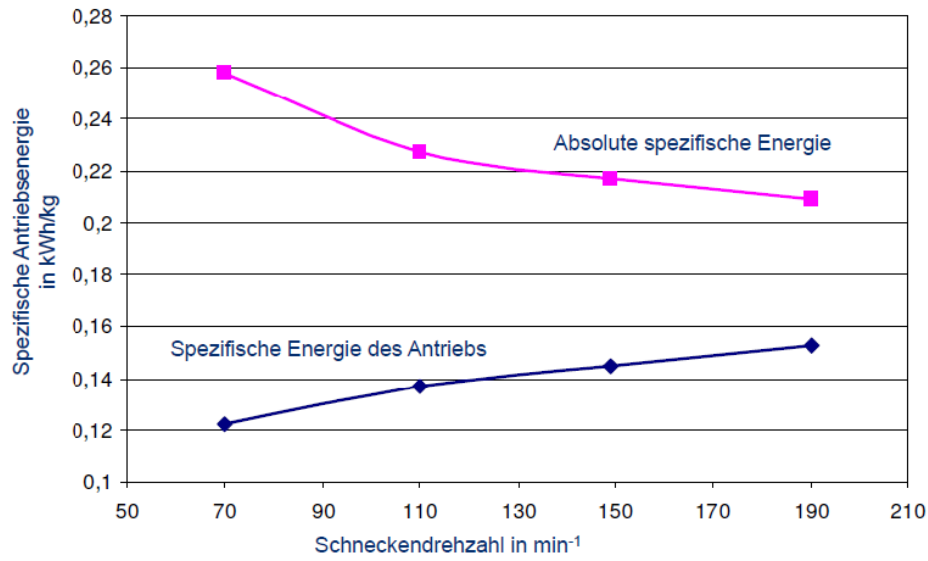
## Wohin fließt die Antriebsleistung?



- Der Großteil der Antriebsleistung wird zum Schmelzen des Granulats benötigt.
- Im Regelfall muss sogar dissipierte Wärme vom Zylinder abgeführt werden.



## Abhängigkeit des spezifischen Energieverbrauchs von der Drehzahl



## Heizung und Kühlung des Zylinders

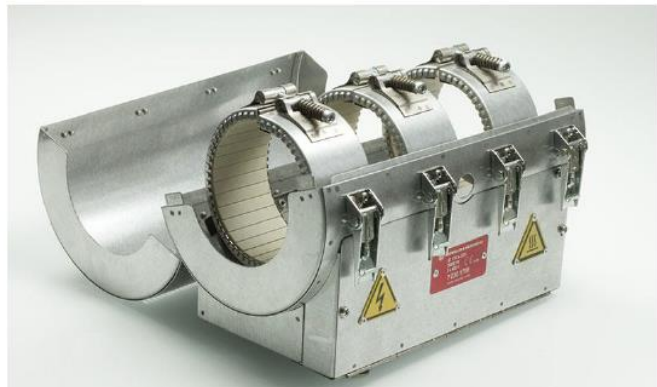


### Heiz-Kühl-Einheiten

- Kombination mehrerer Heizbänder in einem Blechgehäuse
- Gebläse und Leitbleche zur Luftkühlung

### Heizbänder und Heizplatten

- Mineralstoffisoliert
- Keramikisoliert
- glimmerisoliert





## Temperaturmessung



### Thermoelement

- Messung der Zylindertemperatur (im Stahl)
- Regelung der Heizung und Kühlung



### Thermoschwert

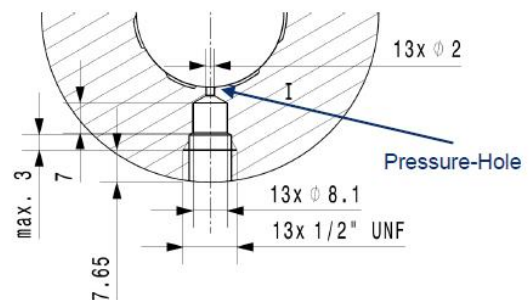
- Messung der Temperatur der Schmelze im Kanal
- Allerdings unter Störung der Strömung

## Druckmessung und kombinierte Druck- und Temperaturmessung

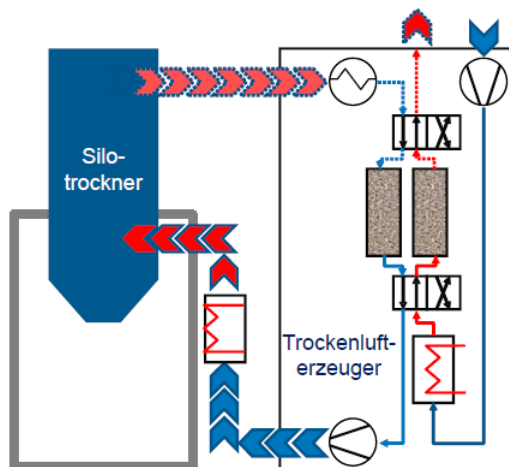


### Druckaufnehmer

- Messung des an der Messmembran anliegenden Drucks
- Kombinierte Varianten mit integriertem Thermoelement erhältlich
- Installation entweder an der Fließkanalwand (Entstehung von Kanten!) oder in sog. Pressure-Holes.



## Weitere Anlagenperipherie - Trockner



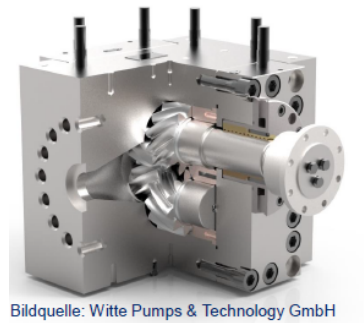
### Welche Kunststoffe müssen getrocknet werden?

- Kunststoffe mit hygroskopischen (wasserabsorbierenden) Eigenschaften
- Kunststoffe mit hygroskopischen Additiven
- Kunststoffe ohne hygroskopische Eigenschaften, wenn Feuchtigkeit auf der Oberfläche (feuchte Klima) kondensieren kann

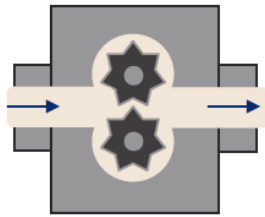
### Gefahren unzureichender Trocknung

- Oberflächendefekte (Trübung, Verlust des Glanzes oder der Transparenz)
- Molekularer Abbau durch Hydrolyse
- Prozessinstabilität durch Änderung der Viskosität
- Schäumen der Schmelze
- Starke Änderung der physikalischen Eigenschaften des Endproduktes

## Weitere Anlagenperipherie – Schmelzpumpen und Lochplatten/Siebe

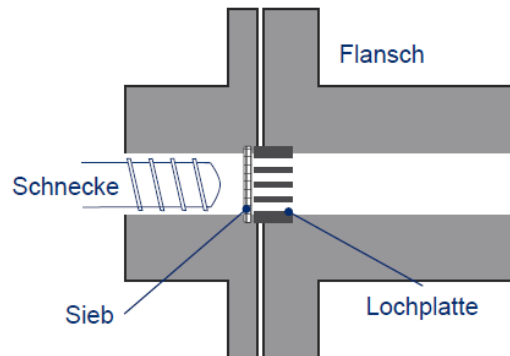


Bildquelle: Witte Pumps & Technology GmbH



### Lochplatten/Siebe

- Thermische Homogenisierung
- Reinigung von Fremdstoffen, Gelpartikeln etc.



## Wrap-Up - 1 und 2

Was ist Ihnen aus der letzten Veranstaltung im Gedächtnis geblieben?

- Typische Extrusionsprodukte und Branchen?
- Werkzeugtypen?
- Funktionszonen von Extrusionsschnecken
- Zylinderbauarten?
- Energieanteile?
- Messsensorik?



### 3. Einzugszone

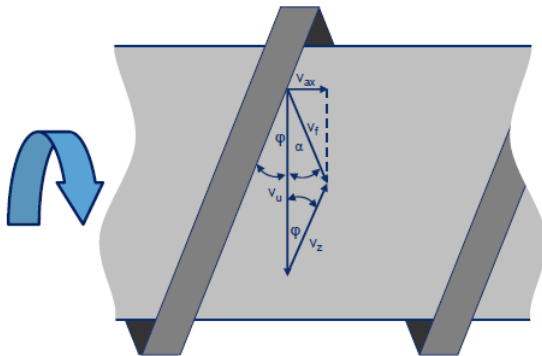
#### Lernziele

Nach dieser Veranstaltung sollten Sie...

- Das Funktionsprinzip der Schneckenförderung verstanden haben,
- Die auftretenden Bewegungen und Geschwindigkeiten in der Einzugszone kennen,
- Den Einfluss der Schnecken geometrie auf den Durchsatz abschätzen können,
- Den Begriff Schüttdichte kennengelernt haben und
- Die Besonderheiten von im Einzug genutzten Zylindern verinnerlicht haben.

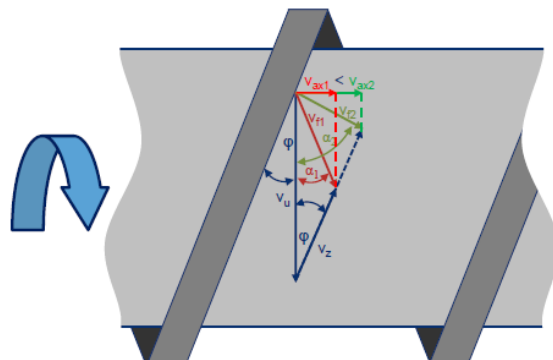
#### Grundlagen der Schneckenförderung

##### Auftretende Bewegungsrichtung im Einzug

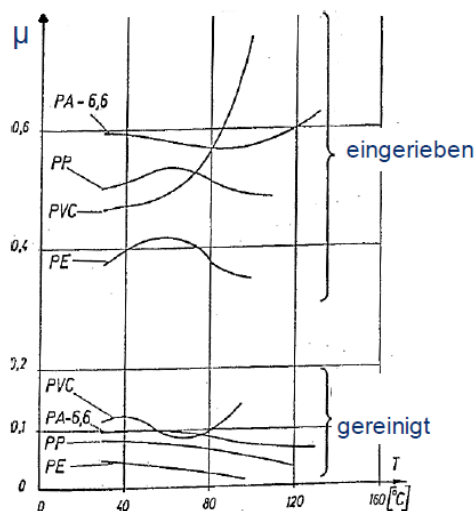


- $v_u$ : Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke
- $v_f$ : Bewegung des Granulats unter Förderwinkel  $\alpha$  durch Stoß der aktiven Flanke
- $v_z$ : Relative Bewegung des Granulats zur Schnecke  
→ Förderwirkung (mit axialem Anteil  $v_{ax}$ )

##### Der Förderwinkel $\alpha$

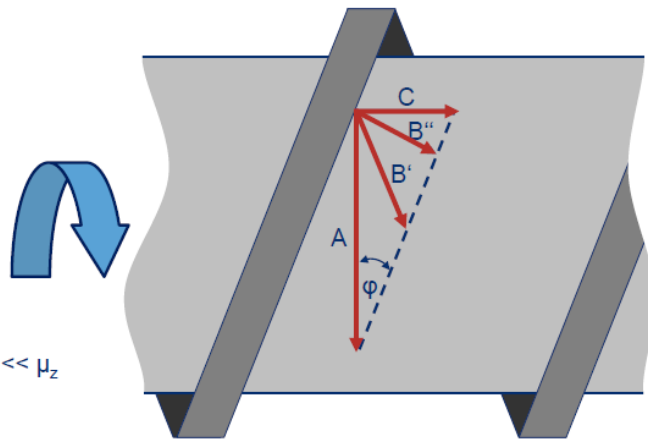


- Förderwinkel  $\alpha$  bestimmt Effizienz der Förderung
- Je größer  $\alpha$ , umso höher der axiale Geschwindigkeitsanteil  
→ größere Förderwirkung
- Reibung zwischen Granulat und Schnecke sowie zwischen Granulat und Zylinder bestimmt den Förderwinkel



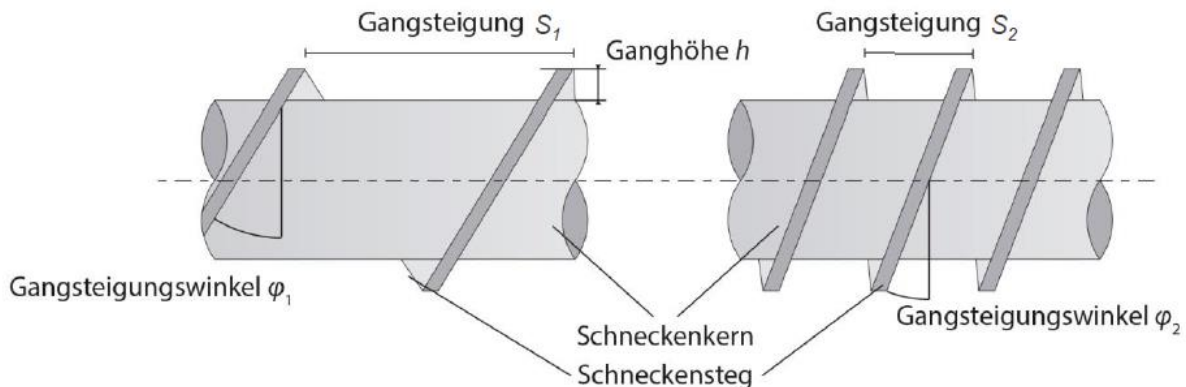
## Bewegungsrichtungen des Granulats

- Bewegung A
  - Extremfall für sehr viel höhere Reibung an der Schnecke als am Zylinder  $\mu_s \gg \mu_z$
  - Granulat dreht mit
  - $v_f = v_u$
  - keine Förderung
- Bewegung B
  - Normalfall für geringere Reibung an der Schnecke als am Zylinder  $\mu_s < \mu_z$
  - maximaler Ausstoß für  $\alpha = 90^\circ - \varphi$  bei  $\mu_s \ll \mu_z$
- Bewegung C
  - Extremfall, wenn Granulat gänzlich am Mitdrehen gehindert wird
  - sog. Mutter-Schraube-Förderung



A/B/C: Mögliche Bewegungsrichtungen  
 $\mu_s$ : Gleitreibung Granulat/Schnecke  
 $\mu_z$ : Gleitreibung Granulat/Zylinder

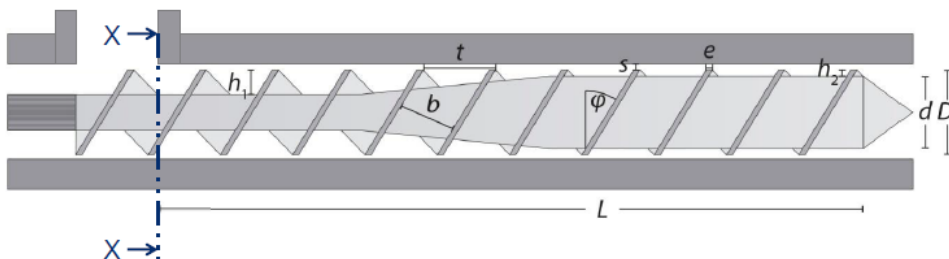
## Einfluss von Gangtiefe und Gangsteigung



- Je größer die Ganghöhe  $h$ , desto mehr Material wird gefördert.
- Je größer die Gangsteigung  $S$  (der Steigungswinkel  $\varphi$ ), desto kleiner ist das Druckaufbauvermögen.

## Die Berechnung des Durchsatzes in freien Einzugszonen

### Volumenstrom aus Axialgeschwindigkeit und freiem Querschnitt



$$\dot{V} = A_f \cdot v_{ax}$$

$$\text{mit } A_f = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) - \frac{e}{\sin \varphi} \cdot h_s \cdot i_s$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{s}{\pi \cdot D}\right)$$

$i_s$ : Anzahl Gänge



Querschnitt X - X

## Grundsätzliche Annahmen

Analytische Beschreibung der Massebewegung in der Einzugszone

- Förderung von Feststoffen als fließfähiges Schüttgut (Granulat/Pulver) -> kein Aufschmelzen
- Kunststoff füllt den Schneckenangang vollkommen aus, er bewegt sich als Block vorwärts.
- Innerer Druck im Granulat:

$$\frac{\partial p}{\partial z} \neq 0, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

- Reibkoeffizient zwischen Kunststoffrohstoff und Schnecke sind unabhängig vom Granulatdruck; Temperatureinfluss muss ggf. berücksichtigt werden.
- Spiel zwischen Schneckensteg und Zylinder ist vernachlässigbar.

## Berechnung der Geschwindigkeiten

- Umfangsgeschwindigkeit  $v_u$ :

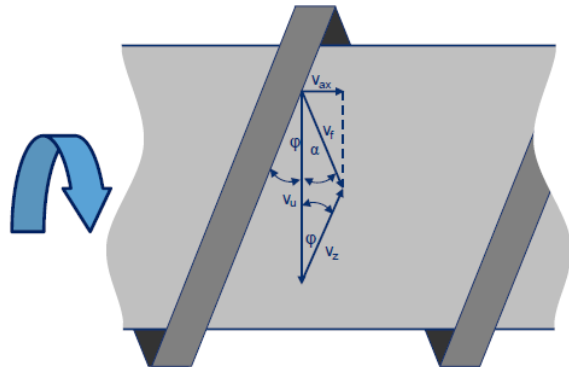
$$v_u = \pi \cdot n \cdot D$$

mit  $n$ : Drehzahl

$D$ : Schneckendurchmesser

- Fördergeschwindigkeit  $v_f$ :

$$v_f = v_u \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi + \alpha}$$



- Resultierende Geschwindigkeit in Gangrichtung  $v_z$ :

$$v_z = v_u \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi + \alpha}$$

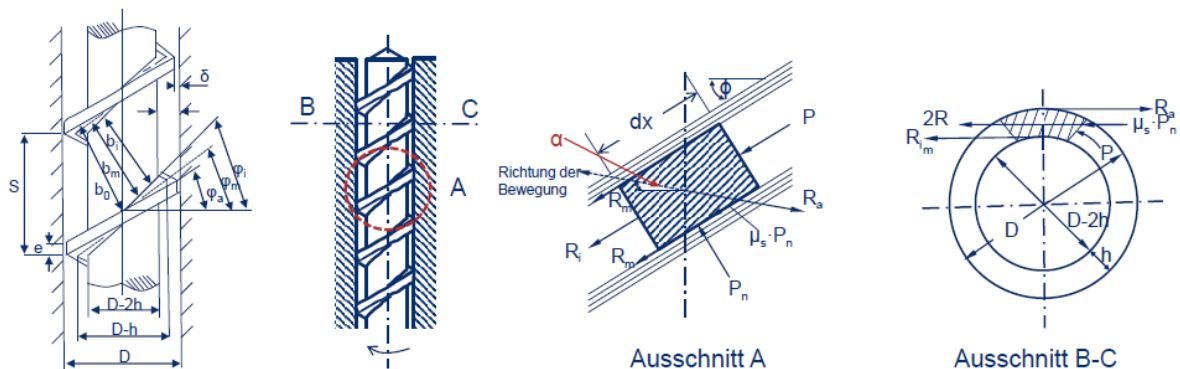
- Axialgeschwindigkeit  $v_{ax}$ :

$$v_{ax} = v_u \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi + 1}$$

## Ermittlung des Förderwinkels $\alpha$

Aufstellen des Kräftegleichgewichts:

- Analyse der an einem Volumenelement im Schneckenkanal angreifenden Kräfte
- Bestimmung der Reib- und Druckkräfte in Abhängigkeit von der Schneckenengeometrie



Kräfte am Volumenelement im Schneckenkanal

Angreifende Reibkräfte:

- $R_a$  = entgegengesetzt zur Förderrichtung  $\alpha$  an der Zylinderwand angreifende Reibkraft, verursacht durch den Granulatdruck am Zylinder
- $R_i$  = Reibkraft am Schneckenkern, wirkt in Richtung des Winkels  $\varphi_i$ , verursacht durch den Granulatdruck auf die Schnecke
- $R_m$  = Reibkraft an den Gewindeflanken, wirkt in Richtung  $\varphi_m$ , verursacht durch den Granulatdruck auf die Schneckenkanalflanken

Angreifende Druckkräfte:

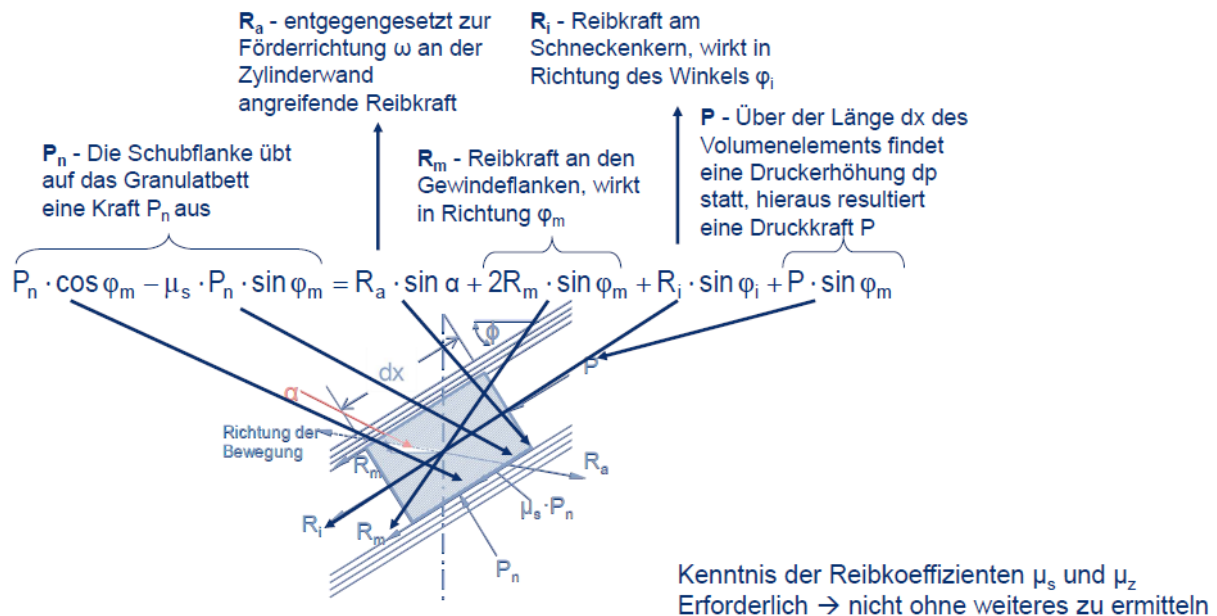
$P$  = Druckaufbau über der Länge  $dx$  des Volumenelements, Kraftrichtung parallel zur Gangrichtung ( $\varphi_m$ )

$P_n$  = Kraft der Schubflanke auf das Granulatbett, Kraftrichtung senkrecht zur Schubflanke ( $\varphi_m$ )

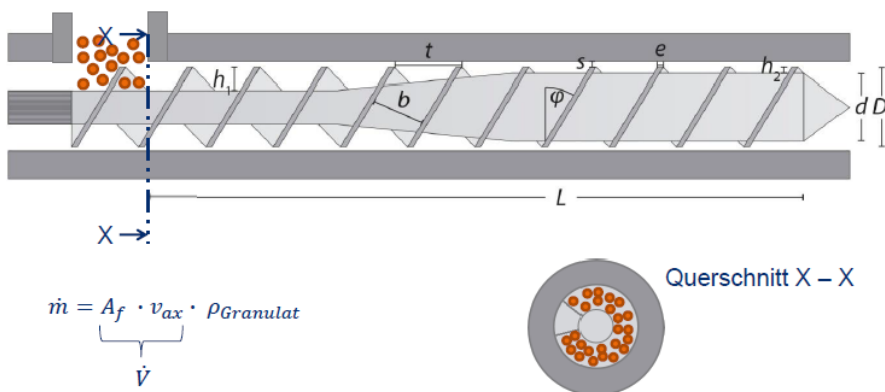
$P_n$  ist etwa so groß wie die entsprechende Komponente der Reibkraft an der Zylinderwand ( $R_a$ ).

Die Kraft  $P_n$  verursacht an der Schubflanke eine Reibkraft  $P_n \cdot \mu_s$ , Kraftrichtung parallel zur Schubflanke ( $\varphi_m$ ).

Kräftegleichgewicht in axialer Richtung:

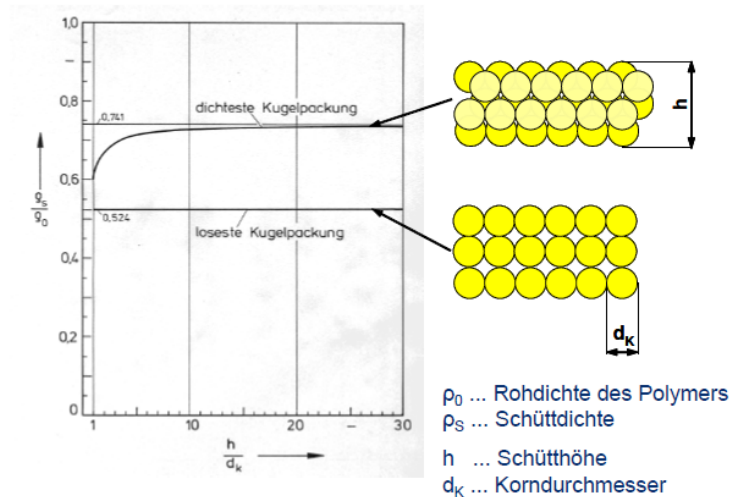
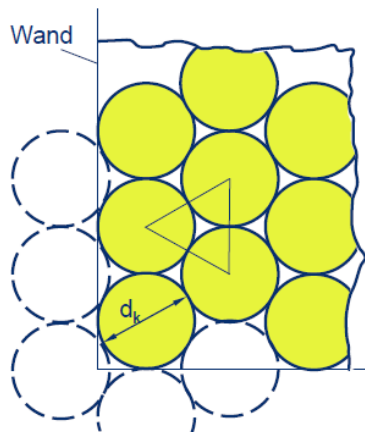


Massestrom aus Volumenstrom und Schüttdichte



Schüttdichte

- kein „echter“ Stoffwert
- Hängt vom Verhältnis zwischen Wandung und Volumen ab



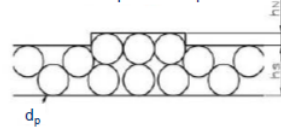
Die Berechnung des Durchsatzes in genuteten Einzugszonen

### Förderfälle in genuteten Einzugszonen

Unterscheidung ob Förderung in den Nuten oder nicht

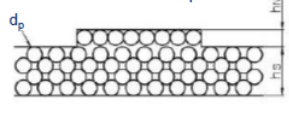
Nuttiefe kleiner als mittlerer Granulatdurchmesser  
 → Förderung in den Nuten findet statt

Fall 1a:  $h_s < 2 d_p$ ,  $h_N < d_p$

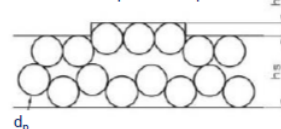


Nuttiefe größer als mittlerer Granulatdurchmesser  
 → Förderung in den Nuten findet nicht statt

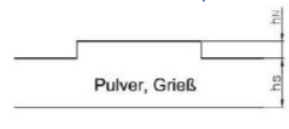
Fall 2a:  $h_s, h_N > d_p$



Fall 1b:  $h_s > 2 d_p$ ,  $h_N < d_p$



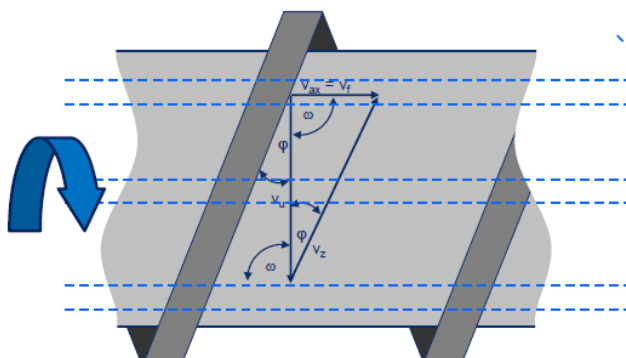
Fall 2b:  $h_s, h_N \gg d_p$



→ Fall 1a und 1b: Berücksichtigung des zusätzlichen Fördervolumens und des Nutwinkels  $\omega$

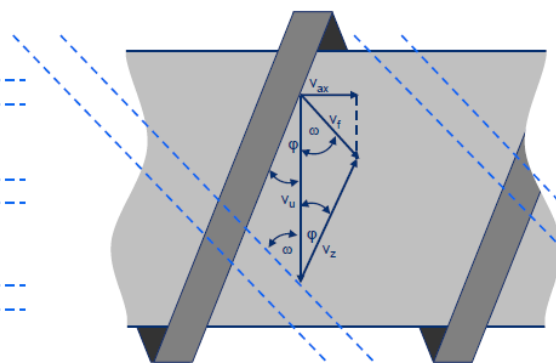
→ Fall 2a und 2b: Berechnung wie Glattrohretruder unter Berücksichtigung der Reibung Kunststoff/Kunststoff

### Axial- und Wendelnuten



#### Axialnuten

- Maximaler Durchsatz, da Granulatbewegung in axialer Richtung (Bewegung C)
- Eingeschränkte Druckstabilität



#### Wendelnuten

- Nutwinkel zwischen 40 und 50 °C → näher einem „natürlichen“ Förderwinkel für  $\mu_s \ll \mu_z$  (Bewegung B'')
- Hohe Druckstabilität

## Förderfall 1a: Mutter-Schraube-Förderung

### Annahmen

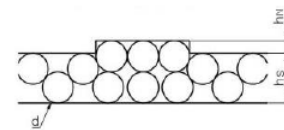
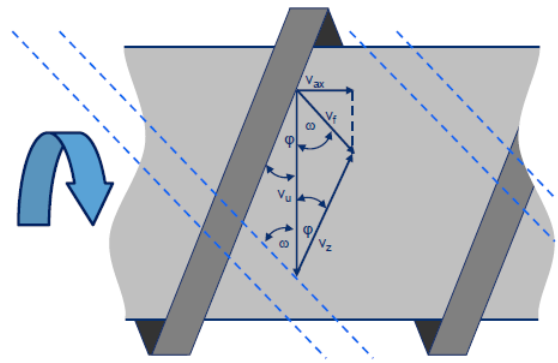
- $h_s < 2 d_p$ ,  $h_N < d_p \rightarrow$  eher Schnecken mit kleinem D
- Granulat bewegt sich als Block auf der Schnecke (gilt für Granulate mit hoher Scherfestigkeit, z. B. PP, PE, PA, PS ...)
- Nuten sind förderwirksam  $\rightarrow$  Fläche berücksichtigen:

$$A_f = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) - \frac{e}{\sin \varphi} \cdot h_s \cdot i_s + \underbrace{\frac{b_N}{\sin \omega} \cdot h_N \cdot i_N}_{A_{fN}}$$

mit  $b_N$ : Nutbreite  
 $h_N$ : Nuttiefe  
 $i_N$ : Anzahl Nuten

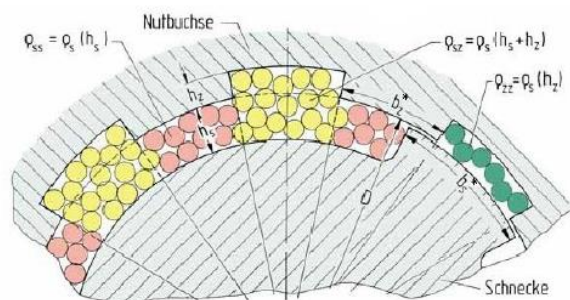
- Förderwinkel  $\alpha =$  Nutwinkel  $\omega$

$$v_{ax} = v_u \cdot \frac{\tan \varphi}{\frac{\tan \varphi}{\tan \omega} + 1} = S \cdot n \cdot \frac{\tan \omega}{\tan \varphi + \tan \omega}$$



Existenz dreier Bereiche mit verschiedenen Schütthöhen

- Unterhalb der Zylinderwand:  $h = h_s$
- Unterhalb einer Nut:  $h = h_s + h_N$
- Oberhalb des Steges in der Nut:  $h = h_N$



## Förderfall 1b: Abgleiten des Granulats

### Annahmen

- $h_s > 2 d_p$ ,  $h_N < d_p \rightarrow$  eher Schnecken mit größerem D
- Innerhalb des Granulats kommt es zu einem Abgleiten der Schichten am Schneckengrund von Granulat in der Nut
- Nuten sind förderwirksam, aber verschiedene Geschwindigkeiten in Nut und darunter

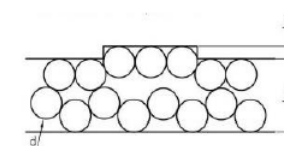
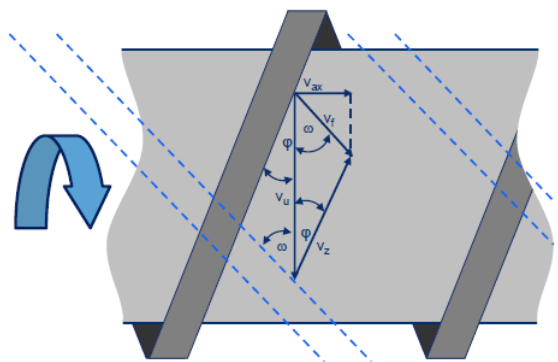
$$A_{fS} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) - \frac{e}{\sin \varphi} \cdot h_s \cdot i_s$$

$$A_{fN} = \frac{b_N}{\sin \omega} \cdot h_N \cdot i_N$$

$$v_{axS} = S \cdot n \cdot \frac{\tan \alpha}{\tan \varphi + \tan \alpha}$$

$$v_{axN} = S \cdot n \cdot \frac{\tan \alpha}{\tan \varphi + \tan \alpha}$$

$$\rightarrow \dot{m} = [v_{axS} \cdot A_{fS} + v_{axN} \cdot A_{fN}] \cdot \rho_{\text{Granulat}}$$





## 4. Aufschmelzzone

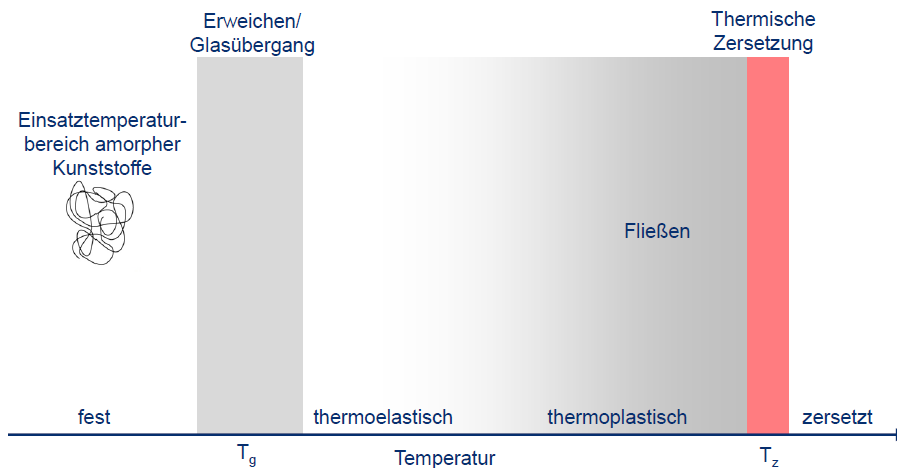
### Lernziele

Nach dieser Veranstaltung sollten Sie ...

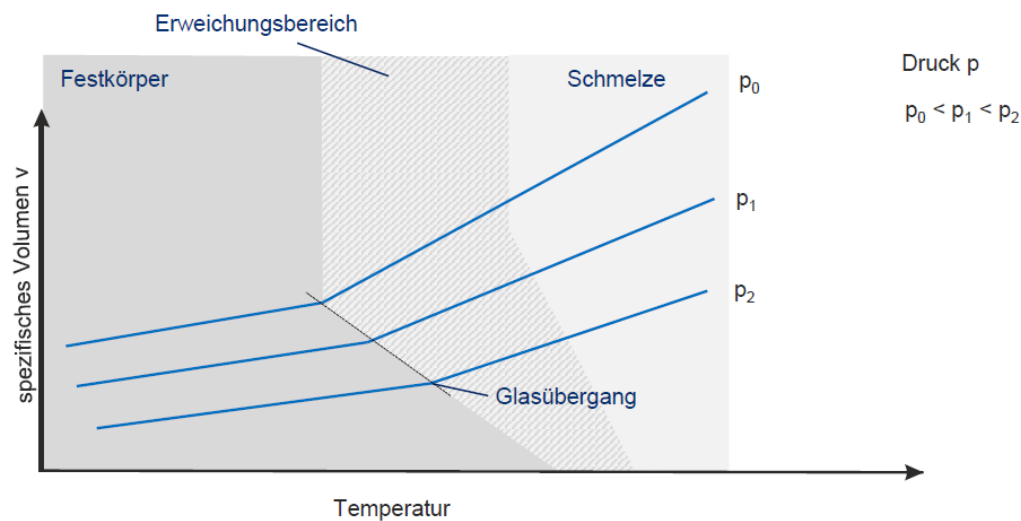
- die grundlegenden Vorgänge in der Aufschmelzzone eines Extruders verstanden,
- die typische Anordnung von Feststoff und Schmelze im Schneckengang kennengelernt,
- die Grundlagen der mathematischen Formulierung dieser Vorgänge erfasst und
- die Besonderheiten bei der Berechnung einer genuteten Aufschmelzzone verinnerlicht haben.

### Zustandsbereiche von Kunststoffen

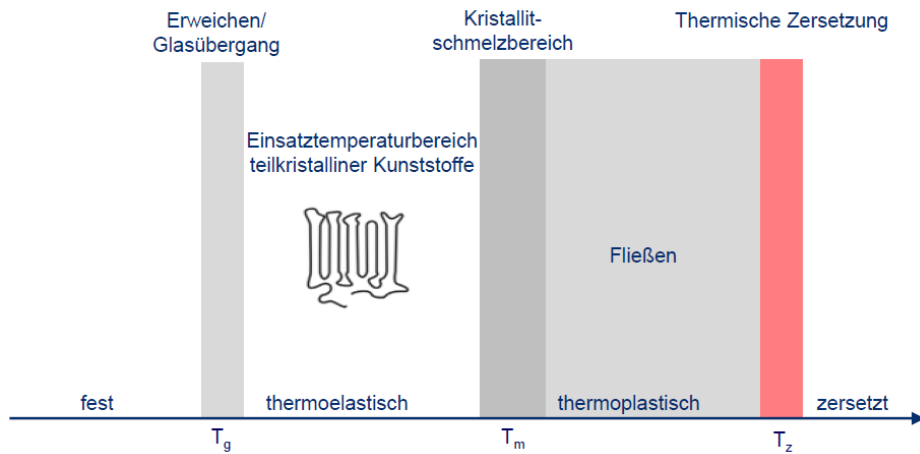
#### Amorpher Thermoplast



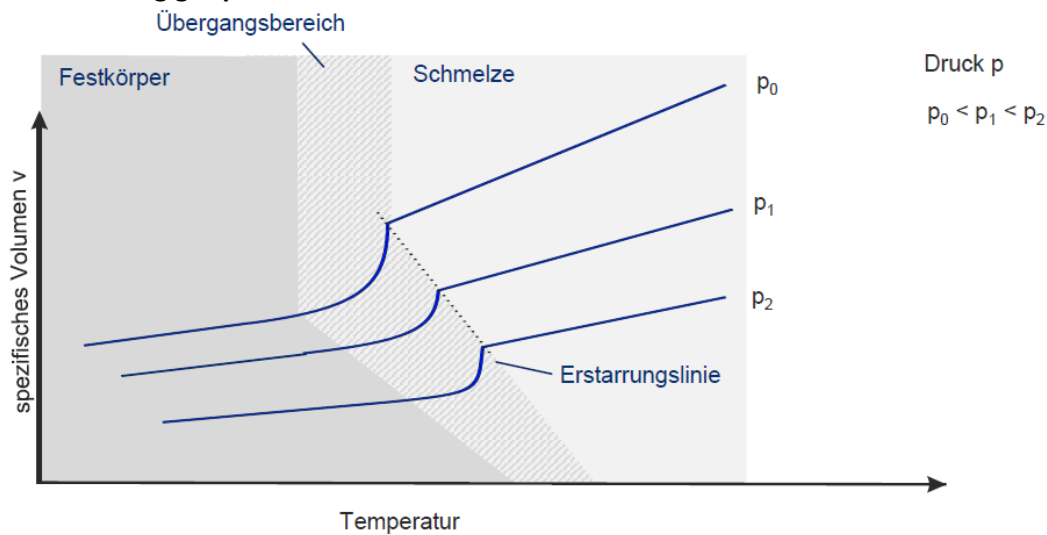
#### Druckabhängiges pVT-Verhalten amorpher Kunststoffe



## Teilkristalliner Thermoplast

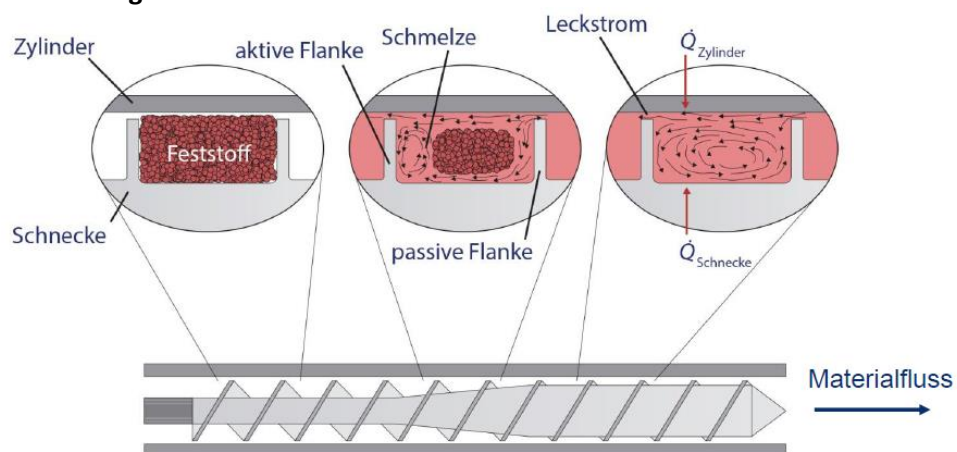


## Druckabhängiges pvT-Verhalten teilkristalliner Kunststoffe

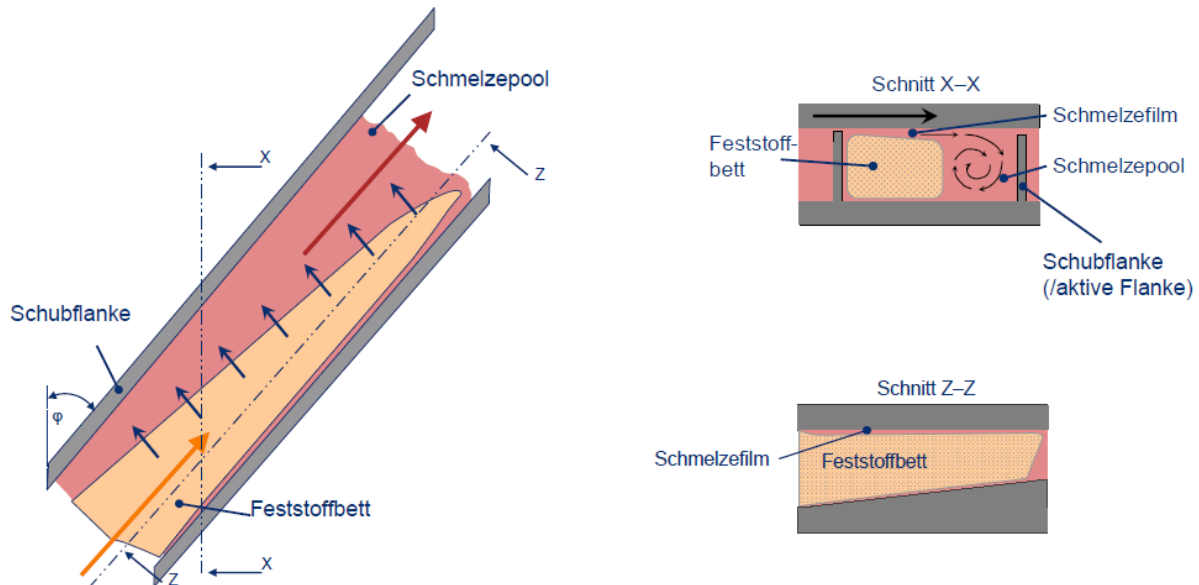


## Der Aufschmelzvorgang im Schneckenring

### Gleichzeitiges Vorhandensein von Granulat und Schmelze

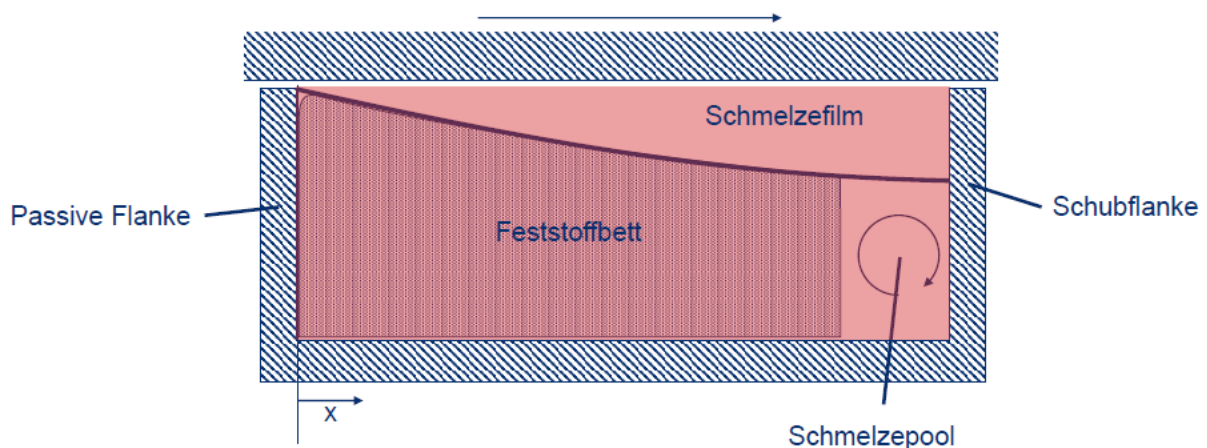


## Vorgänge in der Aufschmelzzone nach Maddock

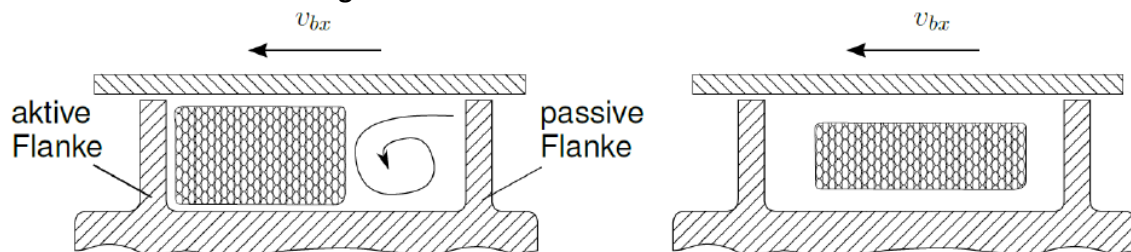


## Experimentelle Untersuchung von Maddock

- Zu Beginn wird Feststoff nur durch Wärmeleitung angeschmolzen (noch keine Dissipation).
- Dünner Schmelzefilm entsteht an der Zylinderwand.
- Schmelzpool/-wirbel entsteht an der aktiven Flanke.



## Alternative Modellvorstellungen



### Klenk

- Schmelzewirbel an der passiven (nicht aktiven) Flanke
- Für wandgleitende Schmelzen (PVC, PE-HD)

### Lindt/Dekker

- Gleichmäßige Verteilung der Schmelze um das Feststoffbett (kein Schmelzpool)
- Für Schmelzen mit geringer Wärmeleitfähigkeit

→ Keine weitergehende Bestätigung oder Etablierung dieser Ansätze in der Forschung, teilweise auch Widerlegung

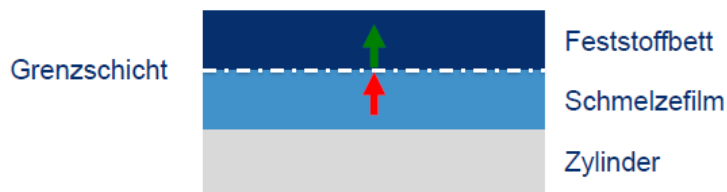
## Mathematische Beschreibung des Aufschmelzens

### Aufschmelzmodell nach Tadmor (aufbauend auf Maddock)

Aufstellung der Masse- und Energiebilanzen zwischen Feststoffbett und Schmelzefilm

$$\boxed{v_{sy}\rho_s\lambda} = \boxed{k_m \left( \frac{dT}{dy} \right)_{y=\delta}} - \boxed{k_s \left( \frac{dT_s}{dy} \right)_{y=\delta}}$$

Aufschmelzenergie      Einströmende Wärmestromdichte      Ausströmende Wärmestromdichte



### Annahmen des Tadmor-Modells

Grundannahmen:

- Wärmeenergie gelangt nur über den Schmelzefilm in das Feststoffbett (Schnecke, Schneckenflanken und Schmelzewirbel sind adiabatisch), siehe Abb. zur experimentellen Untersuchung von Maddock
- Die Feststofftemperatur ist konstant
- Wärmeenergie wird vollständig zum Aufschmelzen des Feststoffs verwendet

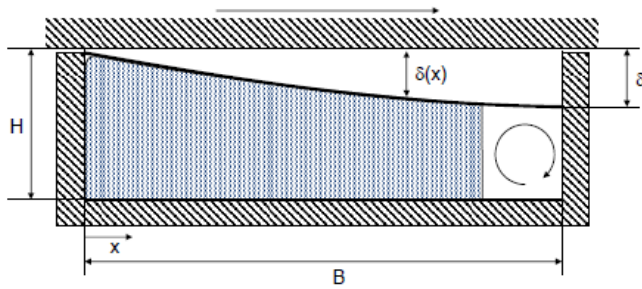
Weitere Vereinfachungen

- Die Schnecke wird als ruhend und der Zylinder als bewegt betrachtet.
- An der passiven Flanke ist die Schmelzefilmdicke gleich null.
- An der aktiven Flanke hat der Schmelzefilm die Dicke  $\delta$ .
- Das Fließverhalten der Schmelze ist Newtonsch' oder gehorcht dem Potenzfließgesetz.
- Elastische und Normalspannungseffekte (Kompressibilität) werden vernachlässigt.
- Die Temperatur an der Zylinderwand ist konstant und stets größer als die Schmelztemperatur.
- Das Feststoffbett bewegt sich als Blockströmung im Kanal.
- Die Leckströmung über den Steg wird vernachlässigt.
- Der Einfluss der Schmelzefilme am Schneckengrund und an den Schneckenstegen wird vernachlässigt.

### Ergebnisse der Berechnung

Jeweils als Funktion der Kanallänge erhält man

- die Feststoffbettbreite  $B$ ,
- die mittlere Schmelzefilmdicke  $\delta$ ,
- die mittlere Schmelztemperatur und
- die Aufschmelzrate  $\Omega'$ .

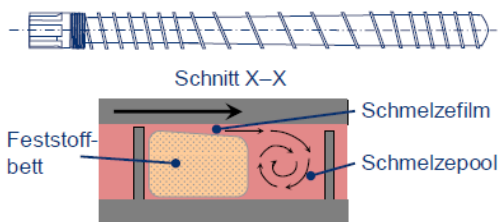
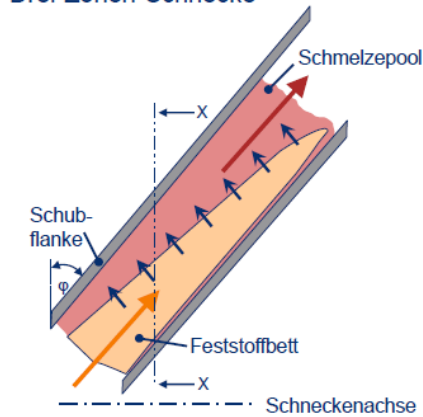


In der Regel reichen diese Größen für eine Schneckenauslegung aus.  
Für ein besseres Verständnis des Aufschmelzprozesses können Geschwindigkeits- und Temperaturprofile im Schmelzefilm hergeleitet werden.

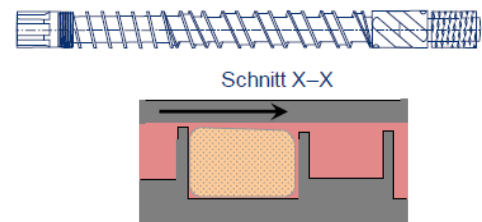
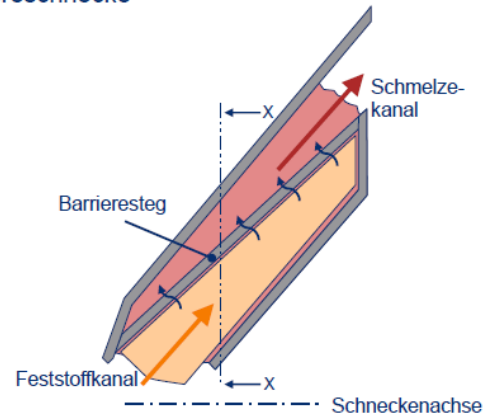
## Übertragung auf andere Schnecken und Zylinder

### Aufschmelzmechanismus in verschiedenen Extruderschnecken

#### Drei-Zonen-Schnecke

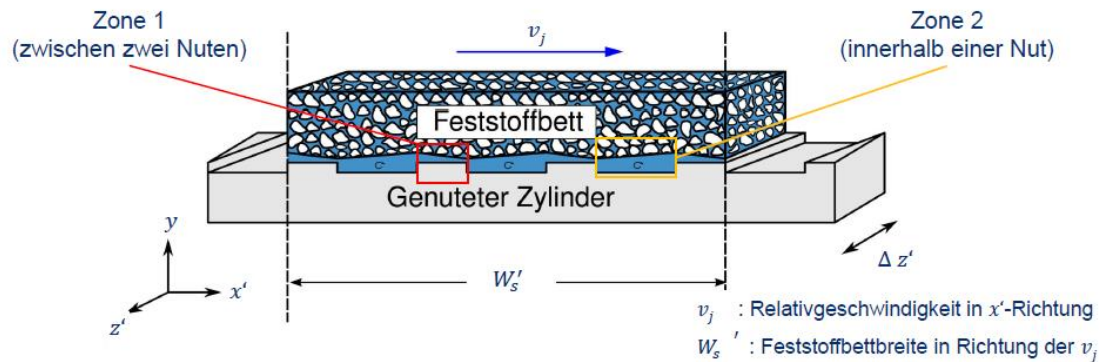


#### Barrierschnecke



### Aufschmelzmodell in einer genuteten Aufschmelzzone

Grundidee:



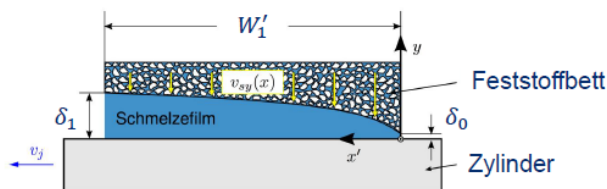
Annahmen (über Tadmor hinausgehend)

- Bis zum Ende mit Feststoff gefüllter Feststoffkanal

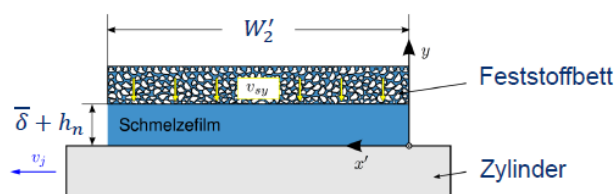
- Strukturviskose Schmelze mit temperaturabhängiger Viskosität
- Iterative Berechnung der Schmelzefilmdicke zu Beginn eines jeden Abschnittes
- Erweiterter, temperaturabhängiger Potenzansatz nach Ostwald und de Waele

Aufteilung in zwei Bereiche:

Bereich 1 (zwischen zwei Nuten)

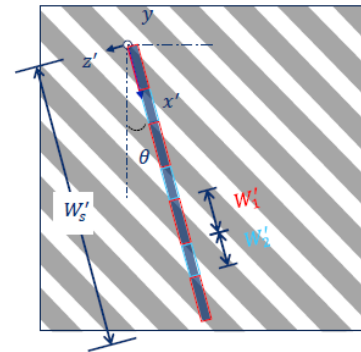


Bereich 2 (innerhalb einer Nut)



Gesamte Aufschmelzrate:

$$\Omega' = (\Omega'_1 + \Omega'_2) \frac{W'_s}{W'_1 + W'_2}$$

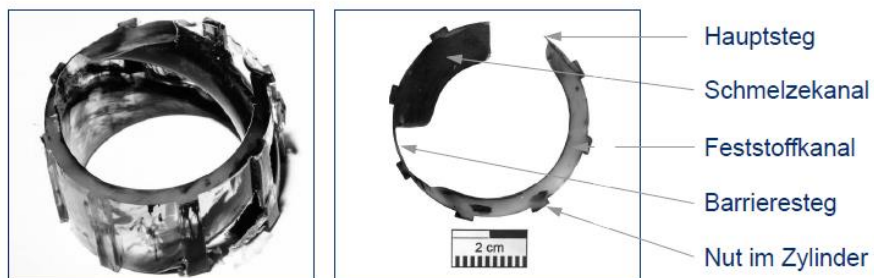


Experimentelle Untersuchung:

Versuchsprobe nach dem Abnehmen von der Schnecke

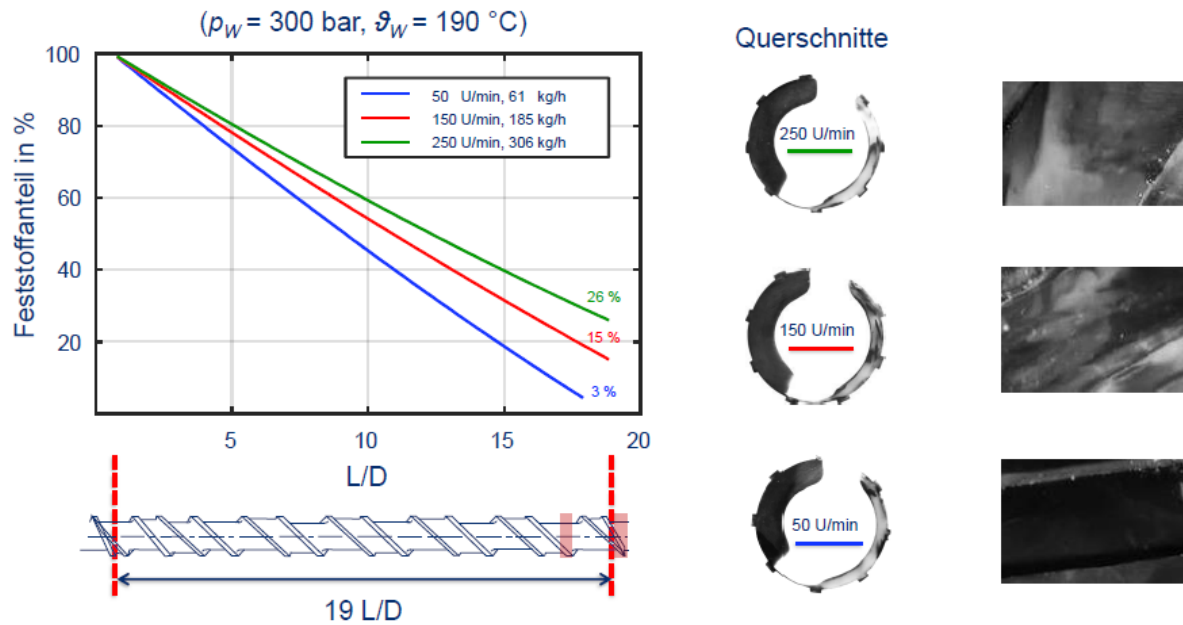


Probenaufbereitung zur Versuchsauswertung



Validierung:





### Wrap-up – 3 und 4

Was ist Ihnen aus der letzten Veranstaltung im Gedächtnis geblieben?

- Bewegungsrichtungen und Geschwindigkeitskomponenten in der Einzugszone?
- Förderwinkel in glatten und genuteten Einzugszonen?
- Anhängigkeit der Schüttdichte von der Schütthöhe?
- Förderfälle je nach Verhältnis von Korndurchmesser, Nuttiefe und Gangtiefe?
- Erweichungs- und Aufschmelzverhalten von Thermoplasten?
- Aufschmelzvorgang nach Maddock?

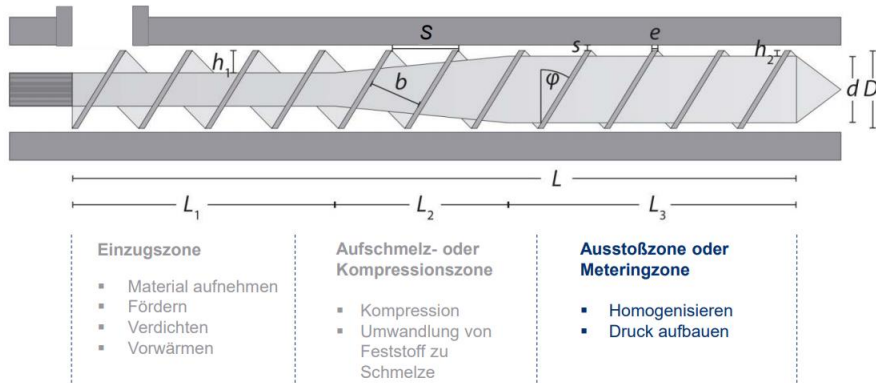
## 5. Mischzone und Meteringzone

### Lernziele

Nach dieser Veranstaltung sollen Sie...

- die Unterscheidung zwischen konventioneller Meteringzone und Mischzone verstanden haben,
- die verschiedenen Mischprinzipien verinnerlicht,
- Auslegungsansätze für Meteringzone und Mischelemente kennengelernt und
- einen Überblick über verschiedene Standard-Mischteile gewonnen haben.

### Die Metering-/Mischzone von Einschneckenextrudern



### Klassische Meteringzone vs. Mischelemente

#### Aufgaben und Eigenschaften

##### Klassische Meteringzone

- üblicherweise in glatten Zylindern
- Druckaufbau zur Überwindung des Werkzeugs für konstanten Durchsatz
- Stoffliches und thermisches Homogenisieren der Schmelze durch Scherströmung



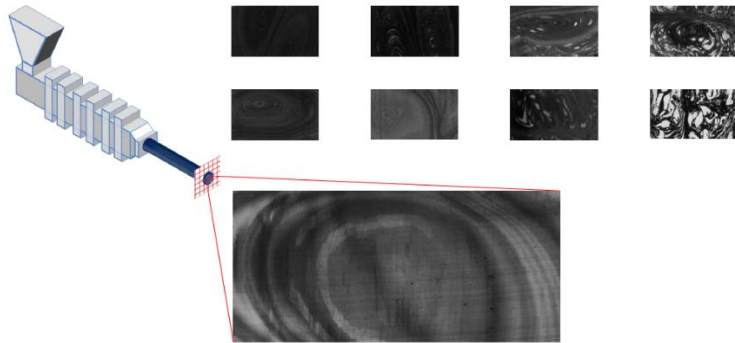
##### Mischteile

- Üblicherweise in genuteten Zylindern
- Druckverbraucher
- Stoffliches und thermisches Homogenisieren der Schmelze durch Scher- und Dehnströmung und Umverteilung

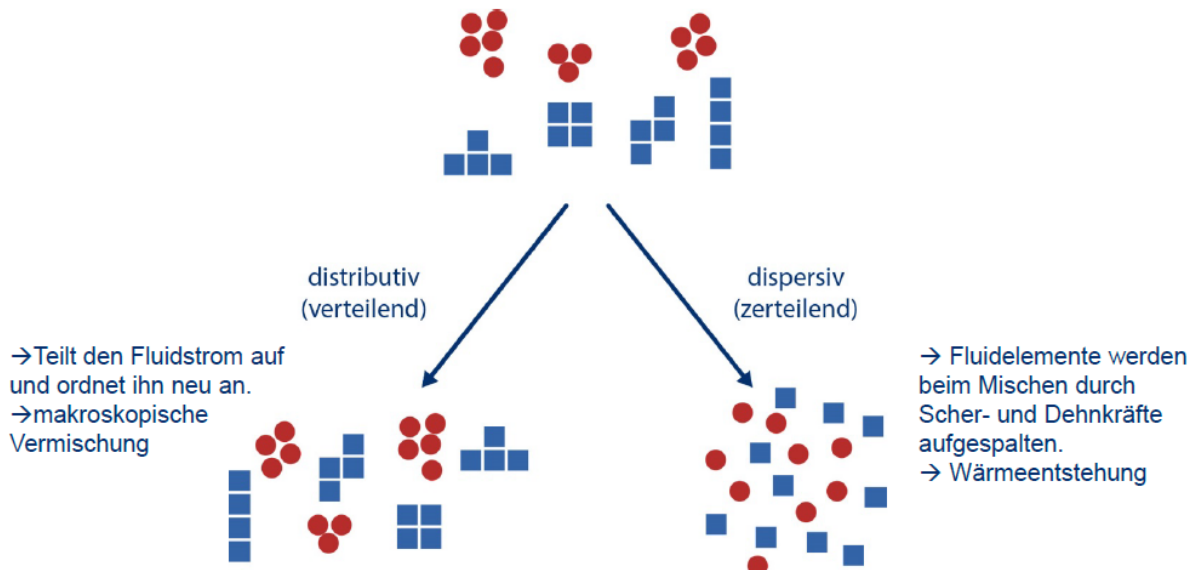


## Schmelzhomogenität

### Homogenität der Schmelze



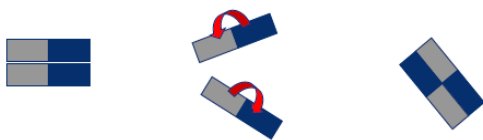
### Mischprinzipien



### Distributives Mischen

Umverteilen von Fluidelementen durch

- Aufspalten
- Umorientierung
- In neuer Konfiguration zusammenführen

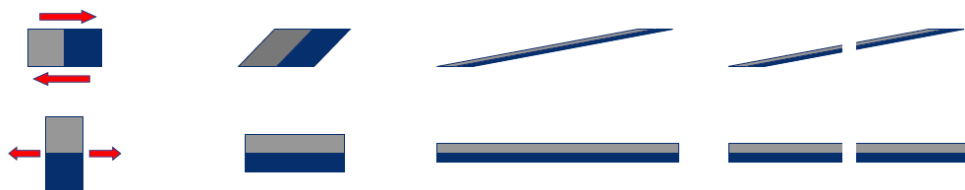


Charakteristische Merkmale:

- Mischen auf makroskopischer Größenskala
- Nur geringe Scherung

### Dispersives Mischen

Verstreckung und Zerteilung von Fluidelementen durch Scher- und Dehnströmungen



Charakteristische Merkmale:

- Mischen bis hinunter auf mikroskopische Größenskalen

- Lang ausgestreckte Fluidlamellen
- Hoher Energieeintrag durch Scherung

## Auslegung der Meteringzone

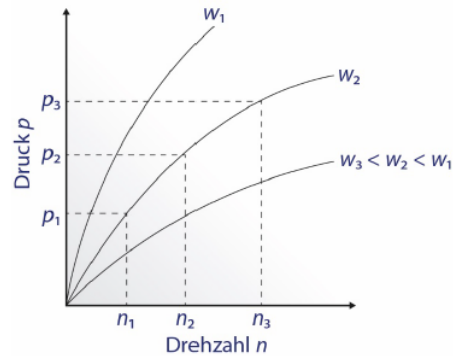
### Durchsatzbestimmende Zone in Glatrohrextrudern

- abhängig vom Werkzeugwiderstand
- abhängig von der Viskosität der Schmelze
- Druck wächst bei strukturvviskosen Polymeren unterproportional mit der Durchsatzleistung an.
- übliche Extrusionsdrücke: 100 bis 500 bar
- durchsatzoptimale Gangtiefe:

$$h_{MZ} = \frac{\left(\frac{1}{m}+2\right) \cdot 2 \cdot \frac{\dot{m}}{\rho}}{\left(\frac{1}{m}+1\right) \cdot \pi \cdot n \cdot D \cdot b \cdot \cos \varphi} \quad \text{mit } m: \text{ Fließexponent nach Ostwald / de Waele}$$

- Druckaufbau pro Längeneinheit:

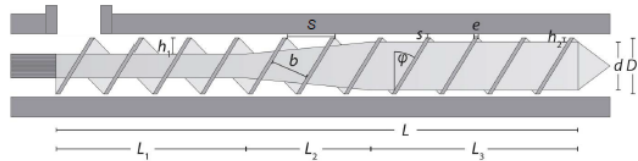
$$\frac{\partial p}{\partial L} = h_{MZ}^{-(n+1)} \cdot \frac{\left(\frac{1}{m}\right)^{0,94} \cdot 6 \cdot K \cdot (\pi \cdot D \cdot n \cdot \cos \varphi)^n}{\frac{1}{m}+2} \quad \text{mit } K = \eta_{\dot{\gamma}=1} \text{ s}^{-1} \text{ (sog. Einsviskosität)}$$



### Richtwerte

Länge der Meteringzone:  $L_3 = 0,2 \cdot L$  bis  $0,5 \cdot L$   
( $L$  = Gesamtlänge der Schnecke)

- für gute Homogenität
- für guten Druckaufbau



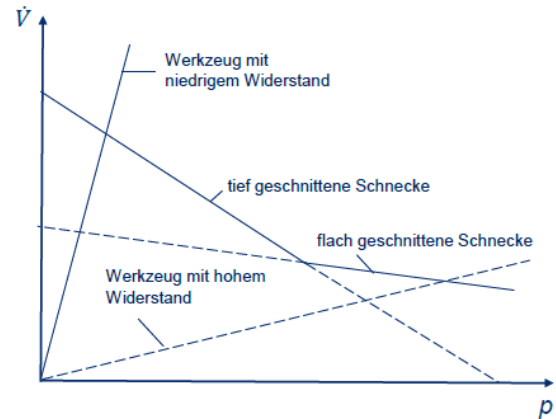
Gangtiefe  $h_2$  je nach Werkzeugwiderstand

- geringer Werkzeugwiderstand  $w \rightarrow$  Druckströmung  $\dot{V}_p$  klein  $\rightarrow$  großes  $h_2$
- $h_2$  bei kleinen Schneckendurchmessern etwa  $0,05 D$  bis  $0,07 D$
- $h_2$  bei mittleren und großen Schneckendurchmessern etwa  $0,02 D$  bis  $0,05 D$
- Relation zur Eingangs-Gangtiefe:  $\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_{Schütt}}{\rho_{Schmelze}} \cdot k$ , mit  $k = 1 \dots 1,5$

Gangsteigung identisch mit der Gangsteigung im Einzug

## Schneckenkennlinie

- längere effektive (mit Schmelze gefüllte) Meteringzone → flachere Schneckenkennlinie
- weitere Abflachung der Kennlinie durch kleinere Gangtiefe möglich → jedoch mit Absenken der Kennlinie verbunden (geringerer Durchsatz)
- flachere Kennlinie → "steiferes" Durchsatzverhalten (Ausstoßleistung der Maschine wird durch den Werkzeugwiderstand und andere Parameter nur wenig beeinflusst)

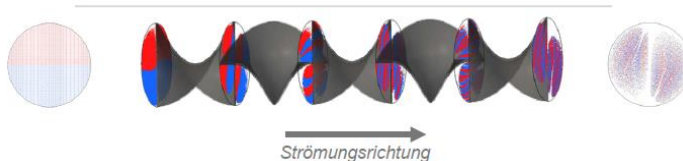


## Auslegung von Mischelementen

### Berechnung des Strömungsfeldes

Übliche Vorgehensweise

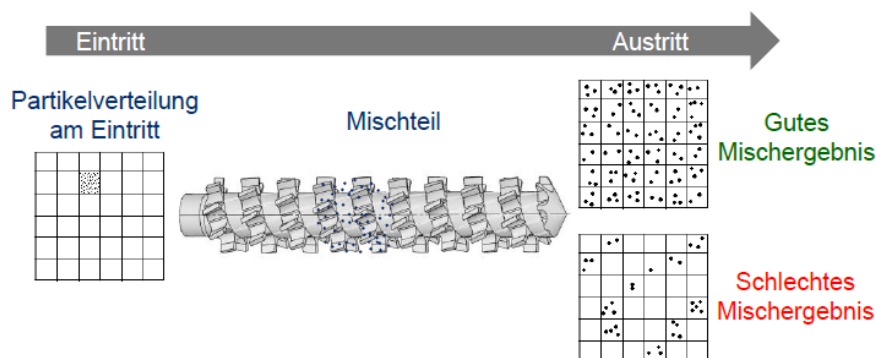
- Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes
- Particle-Tracking mit masselosen Tracerpartikeln
- Erzeugung von Poincaré-Abbildungen



Auswertung

- Statistische Maße zur Beurteilung der Mischgüte
- Berechnung der Grenzflächenvergrößerung

### Statistische Mischgütemaße



Berechnung aus

- Mittlerer Konzentration
- Varianz
- Standardabweichung

Nachteil statistischer Mischgütengröße

→ Numerische Grenzwerte abhängig von

- der Partikelanzahl und

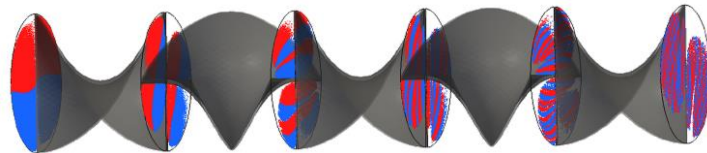
- der Anzahl von Flächenelementen

### Alternativer Ansatz: Bestimmung der Grenzflächenvergrößerung

Vorgehen

- Partikelposition in Poincaré-Abbildungen sind gegeben
- Rekonstruktionsalgorithmus
- Berechnung der Grenzflächenvergrößerung ggü. dem Ausgangszustand

$$\varphi = \frac{A}{A_0}$$

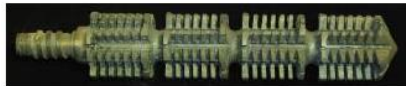


### Standarmischelemente



#### Scher-Misch-Element

- Kombination aus Wendelscherteil und Saxton-Mischteil
- Mischprinzip: dispersiv und distributiv



#### Schlitz-Maddock

- vier Kanalpaare und Schlitz in den Stegen
- Mischprinzip: distributiv



#### MBK

- Scher-/Mischteil Typ Maddock mit Schlitz in der Barrieresteg
- Mischprinzip: dispersiv und distributiv



#### Kreuzloch

- Kreuzloch Mischteil mit acht Ringen
- Mischprinzip: überwiegend distributiv



#### S-Scheiben

- Schlitzscheiben-Mischteil mit acht Ringscheiben
- Mischprinzip: distributiv



#### Saxton-1

- Saxton-Mischteil mit gegenläufigen breiten Stegen
- Mischprinzip: distributiv



#### Saxton-2

- Saxton-Mischteil mit gegenläufigen schmalen Stegen
- Mischprinzip: distributiv



#### CTM

- „Cavity-transfer“-Mischteil
- Mischprinzip: dispersiv und distributiv



#### Stiftzylinder

- Kämmendes Mischteil
- Mischprinzip: dispersiv und distributiv

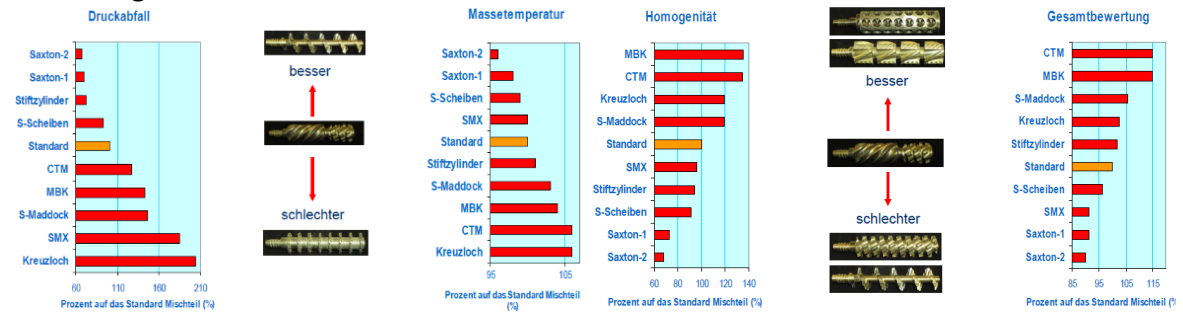


#### SMX

- Statik-Mischer Typ SULZER SMX mit vier Mischelementen
- Mischprinzip: distributiv



## Bewertung der Mischteile am IKT



## 6. Prozesspraxis

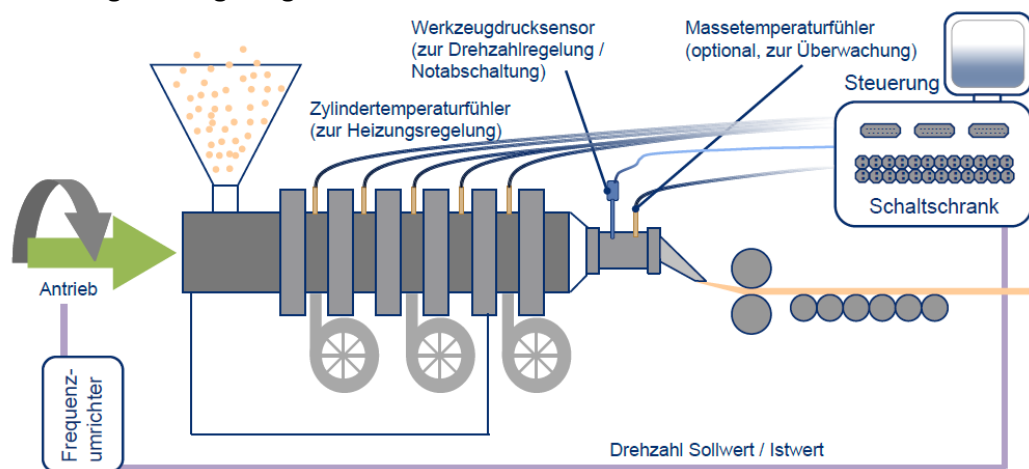
### Lernziele

Nach dieser Veranstaltung sollten Sie...

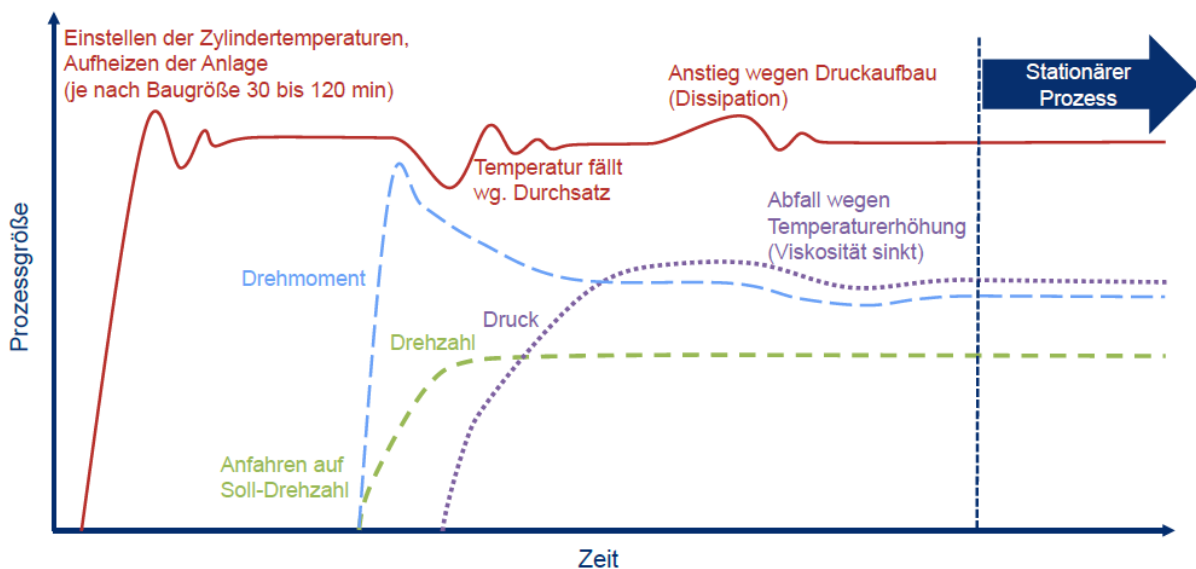
- Kenntnis über das Zusammenwirken der verschiedenen Prozessparameter bei der Extrusion erlangt,
- die Ermittlung von Extruderkennlinien und des Arbeitskennfeldes erfasst,
- die Herausforderungen von Produktwechsel im laufenden Betrieb verstanden und
- typische Prozessschwierigkeiten und Produktfehler sowie Gegenmaßnahmen kennengelernt haben.

### Extruderbedienung

#### Steuerung und Regelung von Extrudern



#### Anfahren des Extruders



#### Tipps und Tricks beim Anfahren

Vermeidung hoher Anfahr-Drehmomente (je nach Schnecken-Zylinder-Kombination bzw. Kunststoff)

-> vor allem bei Kunststoffen mit hoher Härte, hohem E-Modul und/oder Dichte

- leer oder teilgefüllt anfahren, Granulat erst bei drehender Schnecke voll zudosieren
- erst geringe Drehzahl einstellen, schrittweise zur Soll-Drehzahl steigern.
- Nutbuchse auf höhere Temperatur temperieren
- Granulat vorwärmen

- Mit einfacher zu verarbeitendem Kunststoff anfahren, dann im laufenden Betrieb wechseln

### Einstellen der Nachfolgeinheit

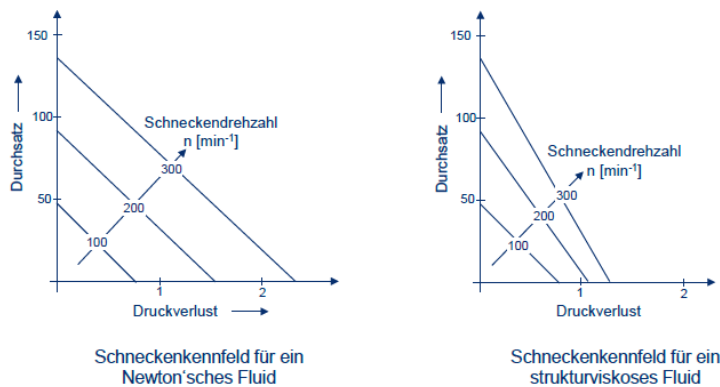
Nach dem Anfahren des Extruders

- „Einfädeln“ des Extrudats durch ganze Extrusionslinie (Kalandrier, Kühlstrecke, Abzug, etc.)
- bei Blasfolienextrusion: Einstellen der Folienblase
- bei Flachfolie: Einstellen der Werkzeuglippen
- etc.

### Extruder- und Werkzeugkennlinien

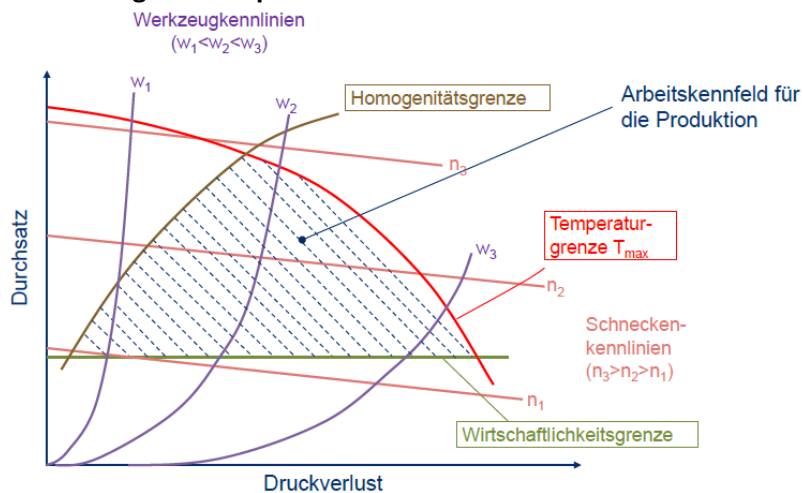
#### Aufnahme von Extruderkennlinien

Abfahren verschiedener Geschwindigkeiten und Ermittlung des jeweiligen Druckverlustes und Durchsatzes (bei konstanter Temperatur)



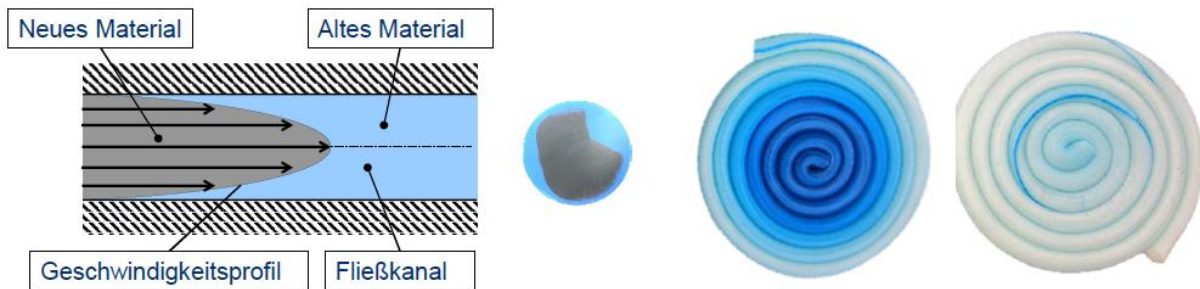
Kennlinien müssen für jede Kombination aus Schnecke, Zylinder, Werkzeug und Werkstoff neu ermittelt werden.

#### Darstellung des kompletten Arbeitskennfeld



## Produktwechsel auf Extrudern

### Farb- und Materialwechsel im laufenden Betrieb



- Farb- und Materialwechsel oft im laufenden Betrieb
- Verdrängung der alten Schmelze durch neue
- Vermischung durch das Geschwindigkeitsprofil bzw. das sog. Verweilzeitspektrum

### Verweilzeitspektrum

Unter der Verweilzeit wird die Zeit verstanden, die ein ausgewähltes Masseteilchen benötigt, um den Verfahrensteil eines Extruders zu durchlaufen.

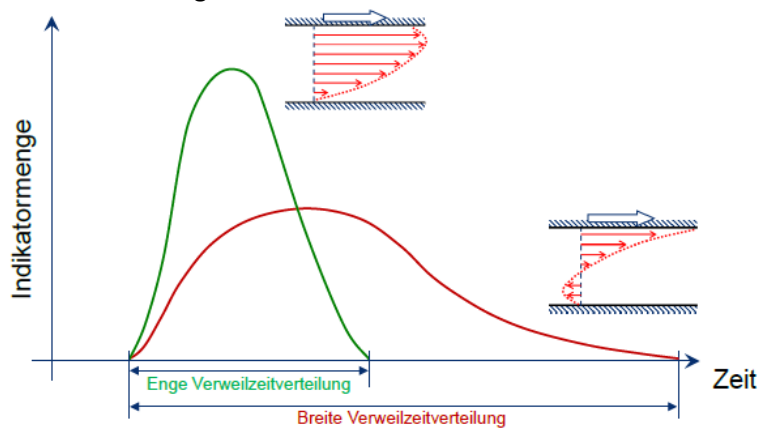
Nicht alle Teile der Schmelze haben die gleiche Verweilzeit!

- unterschiedliche Fließwege im System
- unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten

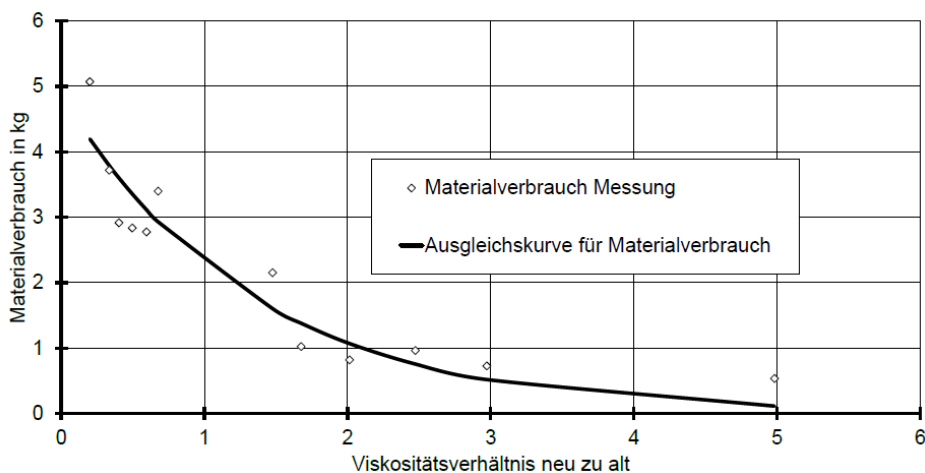
-> Gesamtheit der verschiedenen Verweilzeiten  $\triangleq$  Verweilzeitspektrum

Bestimmung des Verweilzeitspektrums

- Verwendung einer Markierungssubstanz (Tracer)
- Messung der Tracerkonzentration über der Zeit

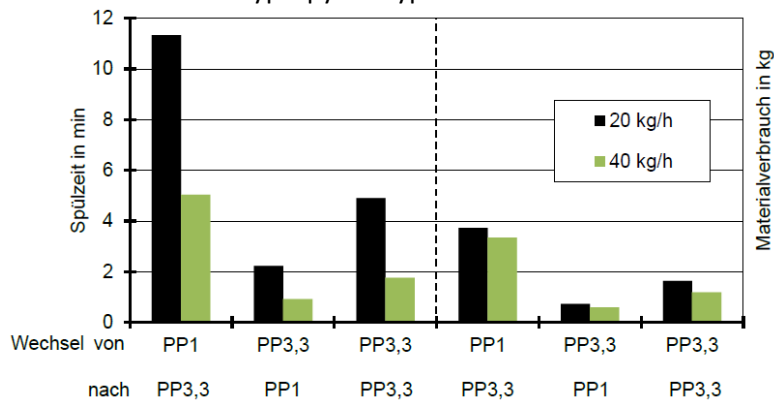


### Einfluss der Viskosität



## Einfluss der Drehzahl / des Durchsatzes

Wechselzwischen Polypropylen-Typen mit unterschiedlichem Schmelzflussindex (MFI 1 bzw. 3,3)



## Troubleshooting

### Typische Fehler und Probleme bei der Extrusion

Prozessschwankungen (Durchsatz, Druck, Drehmoment, Temperatur)

- fehlerhafte Regelparameter
- Prozess außerhalb des Arbeitskennfelds
- falsches Temperaturprofil
- fehlerhafte Auslegung der Schnecke

Extrudatfehler

- Oberflächenfehler (z.B. Shark-Skin, Slip-Stick) und Schmelzebruch
- Black-Spots, Gelpartikel, Stippen
- Materialabbau (thermisch, durch Scherung, oxidativ, hydrolytisch)

Verschleiß/Ablagerungen

- vergrößertes Schneckenspiel
- veränderte Gangtiefe
- Veränderung der Nutgeometrie in Nutbuchsen

### Fehlermatrix

| Verarbeitungsfehler und mögliche Ursachen                                                                                      |                            |                  |             |                             |                  |                 |                      |                |                      |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------|-------------|-----------------------------|------------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------------|--------------|
|                                                                                                                                | Masse-/Zylinder-temperatur | Düsen-temperatur | Masse-druck | Schnecken-drehzahl/-Ausstoß | Länge/Bügel-zone | Homogenisierung | Feuchtigkeits-gehalt | Fremd-material | Kühlung Einzugs-zone | Gleit-mittel |
| Pumpen                                                                                                                         | ●                          |                  | ●           | ▼                           |                  | ●               | ▼                    |                | ●                    | ▼            |
| raue Oberfläche                                                                                                                | ▲                          | ▲                |             | ●                           | ●                | ▲               |                      |                |                      | ▲            |
| schlierige Oberfläche                                                                                                          | ▼                          | ▼                |             |                             | ●                | ▲               | ▼                    |                |                      | ●            |
| Lunker und/oder Blasen                                                                                                         | ▼                          | ▼                | ▲           | ▲                           |                  |                 | ▼                    |                | ▼                    | ▼            |
| Fließlinien/Stegmarkierungen                                                                                                   | ●                          |                  | ●           | ▼                           |                  | ▲               | ▼                    |                |                      |              |
| starkes Blocken                                                                                                                | ▼                          | ▼                | ▲           | ▼                           |                  |                 | ▼                    |                |                      | ▲            |
| unaufgeschlossenes Material                                                                                                    | ▲                          | ▲                |             | ▼                           |                  | ▲               |                      | ▼              |                      |              |
| Maßschwankungen                                                                                                                | ●                          | ●                | ●           | ●                           | ●                | ●               | ▼                    |                | ●                    | ▼            |
| ungenügende Formstabilität des Extrudates                                                                                      | ▼                          | ▼                | ▲           | ▼                           | ●                |                 | ▼                    |                |                      |              |
| Schmelzebruch                                                                                                                  | ▲                          | ▲                | ▼           | ●                           | ●                | ●               |                      |                |                      | ▲            |
| Materialabbau                                                                                                                  | ▼                          |                  |             | ●                           |                  | ▼               | ▼                    |                |                      |              |
| ▲ Erhöhen zur Lösung des Problems<br>▼ Reduzieren zur Lösung des Problems<br>● Erhöhen oder Reduzieren zur Lösung des Problems |                            |                  |             |                             |                  |                 |                      |                |                      |              |
| Tabelle 7                                                                                                                      |                            |                  |             |                             |                  |                 |                      |                |                      |              |

### Voraussetzungen für effizientes Problemlösen bei Prozessschwankungen

Vielzahl an möglichen Ursachen für Prozessschwankungen -> keine Pauschallösungen

Voraussetzung für Ursachenermittlung und Findung von Lösungen:

- gute Messtechnik
- gutes Verständnis des Extrusionsprozesses
- Erfassung und Analyse von Prozessdaten  
-> Temperaturen, Drücke, Drehzahl, Drehmoment, Durchsatz, Kühl- und Heizleistung, Einschaltdauern, etc.
- gute Dokumentation von bisherigen Problemen und deren Lösungen
- Schulen der Mitarbeiter
- gute Information über die Bedingung der Arbeitsmittel
- gute Informationen über die Werkstoffzufuhr

#### **Oberflächendefekte durch Wandgleitung**

- Auftreten von Wandgleitung bei einer kritischen Wandschubspannung
- Dadurch spontane Reduktion der herrschenden Wandschubspannung im Fließkanal  
-> Existenz eines Wandschubspannungsbereichs, in dem es sowohl zu Wandhaftung als auch Wandgleitung kommen kann (Slip-Stick)  
-> Prozessinstabilitäten und Oberflächendefekte

#### **Strippen, Black-Spots und Gel-Partikel**

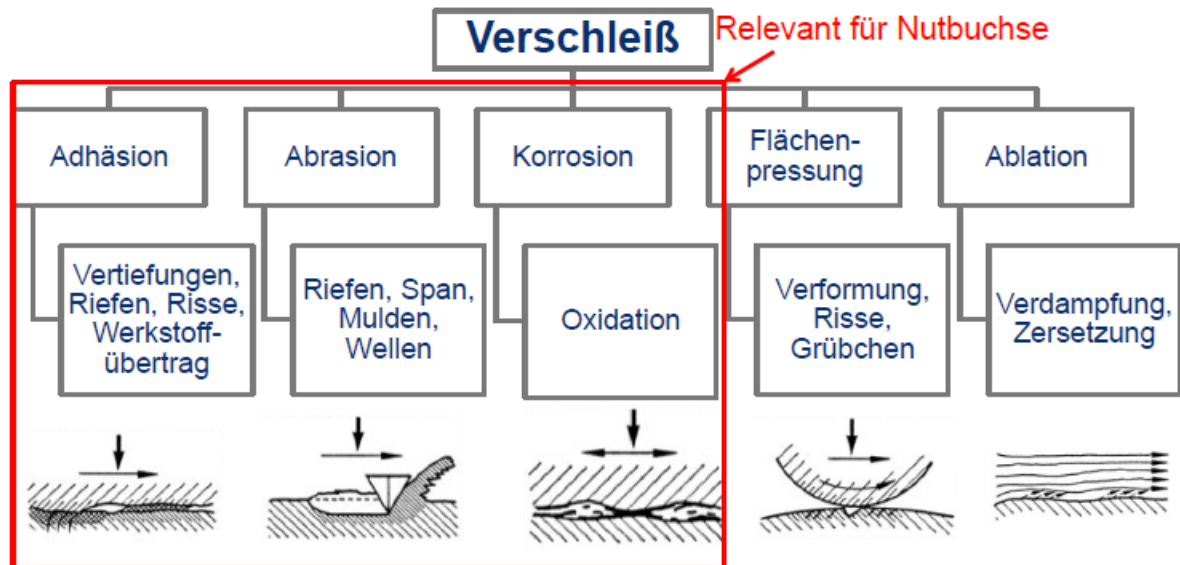
- Einschlüsse im Extrudat
- Strippen -> Abbauprodukte (Black-Spots) durch thermische oder mechanische Schädigung oder Fremdpartikel



- Gel-Partikel -> nachvernetzte und somit unschmelzbare Bereiche im Kunststoff
- Ursachen -> vorwiegend Materialfehler oder falsche Lagerung/Trocknung -> nur selten Prozessfehler



## Verschleißmechanismen



Wesentliche Einflussgrößen bei Nutbuchsen:

$\text{Verschleiß} = f(\text{Druck}, \text{Geschwindigkeit}, \text{Polymer}, \text{Aufschmelzgrad})$

## 7. Prozesssimulation in der Extrusion

### Lernziele

Nach dieser Veranstaltung sollten Sie...

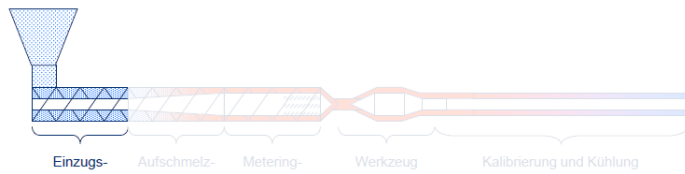
- Beispiele für den Einsatz von Simulationenethoden nennen...
- Besonderheiten einzelner Zonen des Einschneckenextruders hinsichtlich der Modellierung erklären...
- die Grundgleichungen der Strömungsmechanik erklären...
- Anforderungen an Extrusionswerkzeuge erklären...
- Modellierungsansätze zu Mischprozessen beschreiben...

können.

Dieses Kapitel ist zum Teil gekürzt.

### Modellierung

#### Physikalische Effekte in der Einzugszone



#### Reiner Feststofftransport

- Einziehen
- Fördern
- Verdichten
- Vorwärmen des Granulates

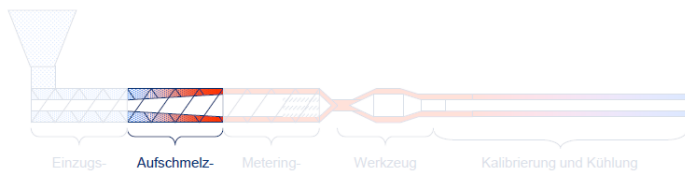
#### Effekte

- Reibung im Granulat bzw. mit der Wand
- Wärmeleitung und -konvektion

#### Einflussgrößen

- Schneckendrehzahl und -geometrie, ggf. Nuten-geometrie
- Granulat- und Zylindertemperatur
- Schüttdichte
- Wärmeleitfähigkeit und -kapazität

#### Physikalische Effekte in der Aufschmelzzone



#### Transport von Feststoff und Schmelze

- Aufschmelzen des Granulates

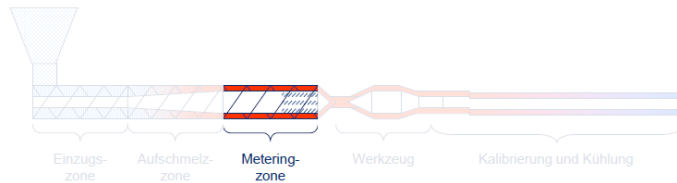
#### Effekte

- Reibung im Granulat bzw. mit der Wand
- Wärmeleitung und -konvektion

#### Einflussgrößen

- Schneckendrehzahl und -geometrie, ggf. Nuten-geometrie
- Granulat- und Zylindertemperatur
- Schüttdichte
- Wärmeleitfähigkeit und -kapazität, Schmelzenthalpie

## Physikalische Effekte in der Meteringzone



### Transport von Schmelze

- Homogenisieren der Schmelze
- Druckaufbau

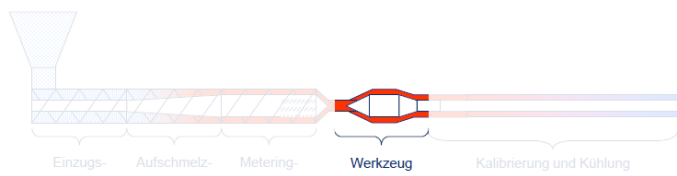
### Effekte

- Impulstransport
- Wärmeleitung und -konvektion
- Mischvorgänge

### Einflussgrößen

- Schneckendrehzahl und -geometrie, ggf. Nuten-geometrie
- Schmelze- und Zylindertemperatur
- Viskosität, Dichte, Wärmeleitfähigkeit und -kapazität

## Physikalische Effekte im Extrusionswerkzeug



### Transport von Schmelze

- Schmelzestrom „formen“
- Gleichmäßige Austrittsgeschwindigkeit sicherstellen
- Druckverlust im Werkzeug

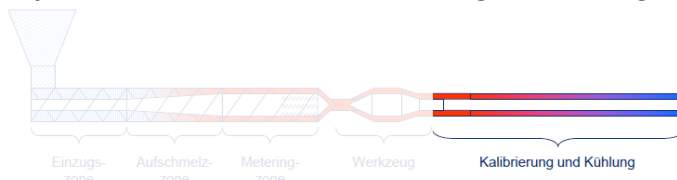
### Effekte

- Impulstransport
- Wärmeleitung, -konvektion und -dissipation

### Einflussgrößen

- Volumenstrom und Werkzeuggeometrie
- Schmelze- und Werkzeugtemperatur
- Viskosität und Dichte der Schmelze
- Wärmeleitfähigkeit und -kapazität

## Physikalische Effekte in der Kalibrierung und Kühlung



### Transport von Schmelze und Feststoff

- Abkühlen und Fixieren der Geometrie

### Effekte

- Wärmeleitung, -konvektion und -strahlung
- Deformation durch Volumenkontraktion und Abzug des Extrudates
- Strangaufweitung am Austritt des Werkzeugs

### Einflussgrößen

- Volumenstrom, Geschwindigkeitsverteilung am Werkzeugaustritt, Abzugsgeschwindigkeit, Druckdifferenz in der Kalibrierung
- Schmelztemperatur
- Viskosität und Dichte der Schmelze
- Wärmeleitfähigkeit und -kapazität, Kristallisations-enthalpie

## Durchströmung von Extrusionswerkzeugen

### Ziele und Lösungsansatz

Simulationen können die Kosten für die Werkzeugauslegung drastisch verringern.

Ziele bei Extrusionswerkzeugen

- Gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über den gesamten Austrittsquerschnitt
- Abschätzung des Druckbedarfs bei gegebenem Durchsatz
- Abschätzung der Temperaturentwicklung bei thermisch empfindlichen Kunststoffen
- Abschätzung der Verweilzeit, Erkennen von „Totzonen“

Modellgleichungen

- Transportgleichungen für Masse (Kontinuitätsgleichung), Impuls und Energie
- Rheologische Zustandsgleichung
- Thermodynamische Zustandsgleichung

### Kontinuitätsgleichung

Beschreibt die Massenerhaltung in jedem Kontrollvolumen

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Zeitliche Änderung der Dichte in einem Kontrollvolumen

Räumliche Änderung der Massenstromdichte

### Impulsgleichung

Beschreibt die Impulserhaltung in jedem Kontrollvolumen

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) + \rho \cdot \vec{g} + \nabla \cdot \underline{\tau} - \nabla p$$

Zeitliche Änderung

Trägheitskräfte

Gravitationskräfte

Reibungskräfte

Druckkräfte

### Energiegleichung

Beschreibt die Energieerhaltung in jedem Kontrollvolumen

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{v} T) + \nabla \cdot \left( \frac{\lambda}{c_p} \cdot \nabla T \right) + \frac{1}{c_p} \cdot \underline{\tau} : \nabla \vec{v}$$

Zeitliche Änderung

Konvektiver Transport

Wärmeleitung

Dissipation

### Rheologische Zustandsgleichung

Beschreibt die Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit, Temperatur und ggf. Druck.  
Gebräuchlichste Modelle

- Carreau-Ansatz
- Cross-WLF-Ansatz

### Thermodynamische Zustandsgleichung

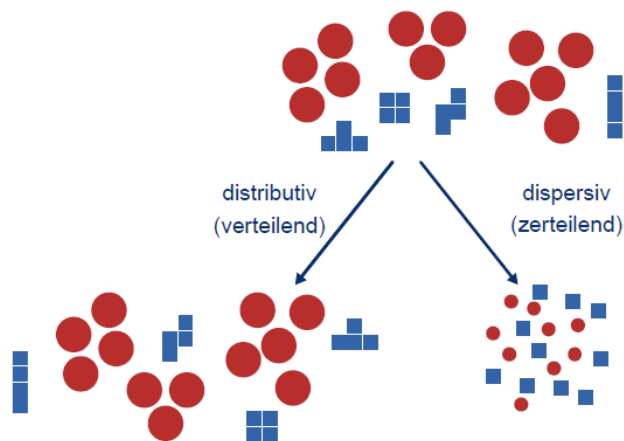
In der Regel wird der TAIT-Ansatz verwendet, der das spezifische Volumen sowohl in der Schmelze als auch im erstarrten Zustand beschreibt.

### Diskretisierungsmodelle

- Mittelflächenmodell
- DualDomain Modell
- 3D-Modell

## Numerische Berechnung von Mischprozessen

### Mischmechanismen



#### Distributives Mischen

- Aufspalten des Fluidstromes
- Umlorientieren
- In neuer Konfiguration zusammenführen
- Nur geringe Scherung

#### Dispersives Mischen

- Ver Streckung und Zerteilung von Fluidelementen aufgrund von aufgebrachten Scher- und Dehnströmungen
- Führt zu lang ausgestreckten Fluidlamellen
- Deutlich effektiver als distributive Mischvorgänge
- Problem: Eingebraachte Wärme aufgrund starker Scherung

Die beiden Mischmechanismen wirken immer gleichzeitig und sollten sich sinnvoll ergänzen.

### Modellierungsansätze

Allen Ansätzen gemeinsam: Lösen von

- Kontinuitätsgleichung
- Impulsgleichung
- Energiegleichung

Unterschiede in der Modellierung der Mischvorgänge:

Lösen einer skalaren Transportgleichung für die Stoffmengenkonzentrationen der zu vermischenden Stoffe

- **Vorteil:** unterschiedliche Stoffeigenschaften können beim Lösen der Bilanzgleichungen berücksichtigt werden
- **Nachteil:** Verwischen der Gradienten an der Phasengrenze

Lagrange' Methoden: Verfolgung masseloser Tracerpartikel

- **Vorteil:** Gradienten werden scharf abgebildet
- **Nachteil:** Berücksichtigung unterschiedlicher Stoffeigenschaften ist deutlich schwieriger zu realisieren

### **Quantitative Auswertung der Partikelverteilung**

Statistische Mischgütezahlen berechnet mit Hilfe der

- Varianz
- Standardabweichung
- mittlere Konzentration

## 8. Thermoformen

### Thermoformen

#### Definition

Umformen nach DIN 8550:

„Fertigen durch bildsames (plastisches) Ändern der Form eines festen Körpers; dabei werden sowohl die Masse als auch der Zusammenhalt beibehalten.“

Thermoformen nach VDI 2008:

„Thermoformen beschreibt das Umformen von Halbzeug aus thermoplastischen Kunststoffen.“

Allgemein:

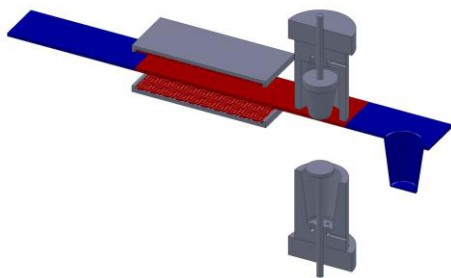
Thermoformen bezeichnet ein Verfahren, bei dem eine thermoplastische Folie oder Platte bis in den thermoelastischen Bereich erwärmt und anschließend unter Verwendung von Druckluft und/oder Vakuum und/oder mechanischer Verstreckhilfen umgeformt wird. Es wird deshalb auch Warmumformen oder Vakuumformen genannt. Anders als beim Tiefziehen von Metall handelt es sich jedoch um eine reine Dehnverformung.

Das Thermoformen ist eines der ältesten Verarbeitungsverfahren in der Kunststofftechnik. Bis heute ist es eines der wichtigsten Weiterverarbeitungsverfahren.

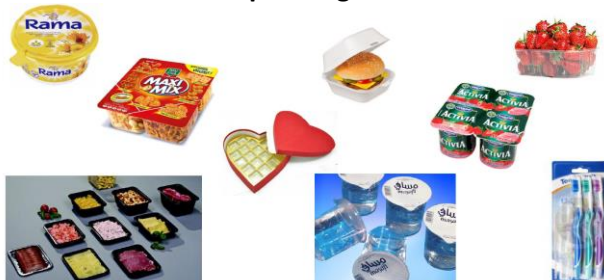
#### Verfahrensschritte

Beispiel für einen stempelunterstützten Negativthermoformprozess:

- Halbzeug erwärmen
- Halbzeug einfahren
- Werkzeug schließen
- Stempel eintauchen
- Formluft einströmen
- Formteil abkühlen
- Werkzeug öffnen
- Formteil entformen
- Formteil ausstanzen



#### Formteile für die Verpackungstechnik



- Wirtschaftliches Verfahren für die Verpackungstechnik



- ➔ Dennoch: Größter Anteil an den Gesamtherstellungskosten liegt bei den Materialkosten mit bis zu über 80 %!!!

### Cost estimation KTR 5

Maschinenpreis: 0,5 Mio€

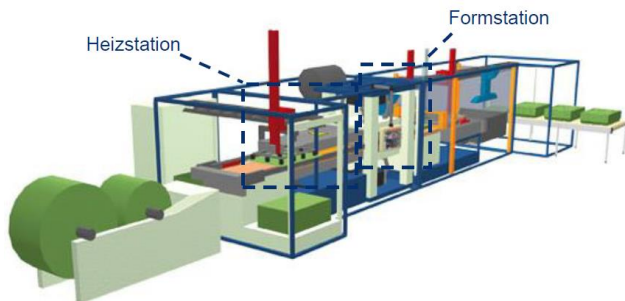
Halbzeugmaterial: PP

Materialkosten pro 1000 Einheiten: ca.  
23 € (über 75 % an Herstellungskosten)

- 51

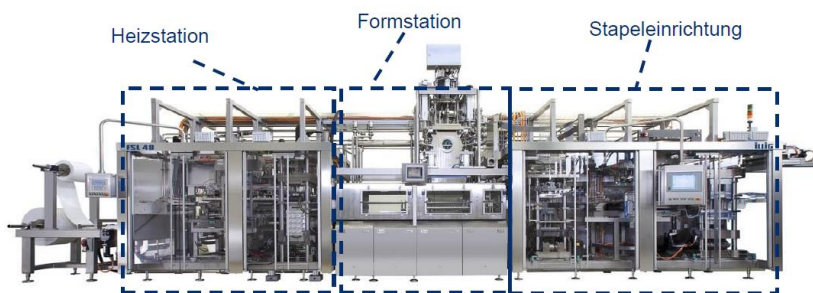
### **Rollenautomaten/Mehrstationenmaschinen**

Bei Rollenautomaten werden Folienrollen als Halbzeuge verarbeitet. Die Erwärmung und die Formgebung finden in getrennten Stationen statt. Sie werden deshalb auch Mehrstationenmaschinen genannt.



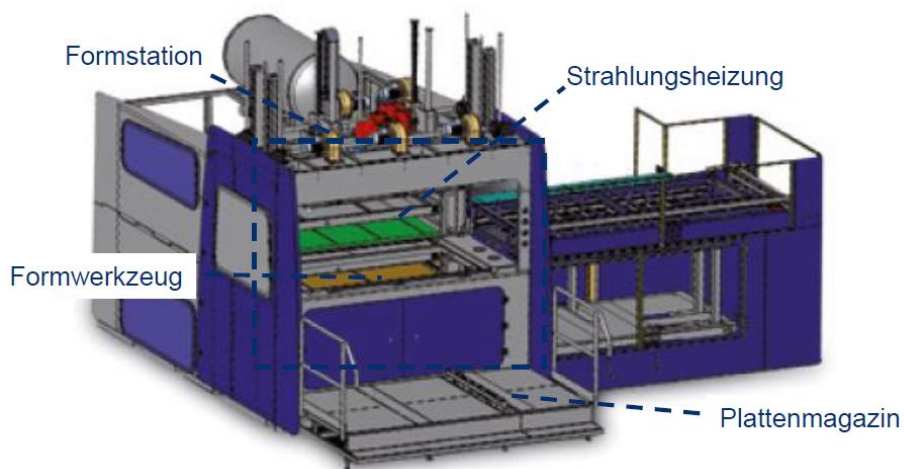
Die Taktzeit wird durch die Abkühlphase bestimmt.

Beispiel für eine Mehrstationenmaschine:



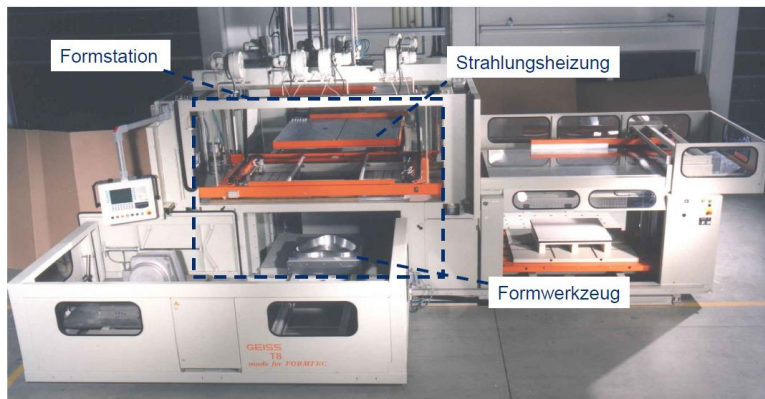
### **Plattenautomaten/Einstationenmaschinen**

Bei Plattenautomaten werden Kunststoffplatten verarbeitet. Häufig finden Erwärmen und Formen in derselben Station statt. Solche Maschinen werden deshalb auch Einstationenmaschinen genannt.



Die einzelnen Verfahrensschritte Einlegen, Aufheizen, Formen usw. addieren sich zur Gesamtzykluszeit.

Beispiel für eine Einstationenmaschine:



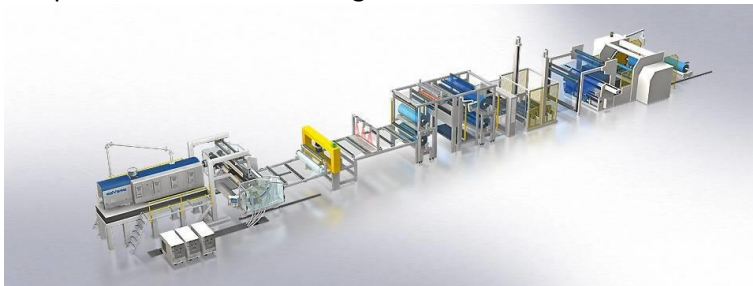
## Halbzeuge – Herstellung und Eigenschaften

### Herstellungsverfahren

Dem Thermoformen geht stets die Herstellung eines Halbzeugs voraus. Die Halbzeugherstellung erfolgt durch:

- Flachfolienextrusion
- Folienblasen
- Kalandrieren (PVC)
- Foliengießen (PMMA)

Beispiel einer Flachfolienanlage:



### Einteilung

Halbzeuge werden unterschieden in Folienmaterial (bis zu einer Dicke von 2,5 mm bzw. „aufwickelbar“) und Plattenmaterial (ab einer Dicke von 2,5 mm bzw. „stapelfähig“).

Beispiel für Rollenware



Beispiel für Plattenware



Beispiel für genarbte TPE-Folie



### Übersicht über verschiedene Werkstoffe

Als Halbzeugmaterialien werden hauptsächlich Thermoplaste verwendet. Wichtige Vertreter sind:

- PS (amorph, kompakt o. geschäumt, oft schlagfest PS-HI)
- ABS (amorph, hohe Schlagzähigkeit, hygroskop)
- PVC (amorph, hohe Festigkeit und Steifigkeit)
- PMMA (amorph, glasklar, witterungs- und alterungsbeständig)
- PET (als APET amorph und hygroskop, als CPET teilkristallin)

- PE (teilkristallin, meist PE-HD, hohe Verarbeitungsschwindigkeit)
- PP (teilkristallin, geringe Wasserdampfdurchlässigkeit)
- PC (amorph, lichtdurchlässig, hohe Schlagzähigkeit, hygroskopisch)

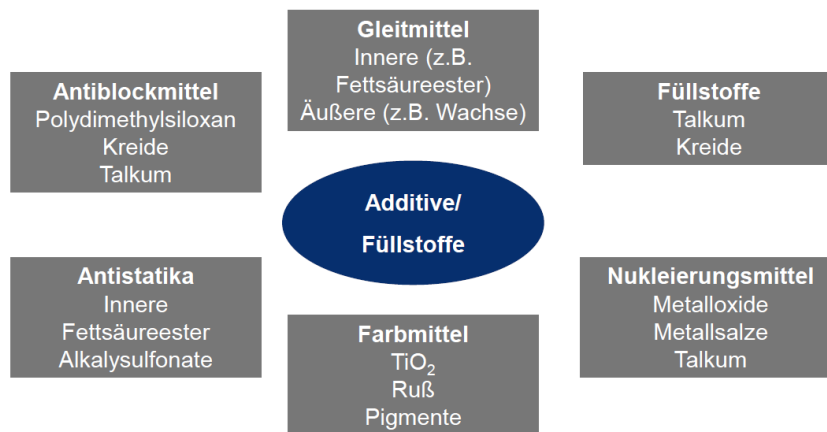
Es werden aber auch teilvernetzte Materialien wie TPE eingesetzt.

Mehrschichtverbunde kommen zum Einsatz, wenn

- eine Barrierschicht (z.B. EVOH) erforderlich ist,
- recyceltes Material verwendet wird (meist als mittlere Zwischenschicht),
- bei Kombination Kompakt- mit Schaumschicht („Soft-touch-Effekt“) oder
- Dekor- bzw. Lackfolien verarbeitet werden (z.B. Dekor + Trägerschicht).

### Verwendung von Additiven und Füllstoffen

Es gibt Anforderungen an die Halbzeuge (z.B. Verarbeitbarkeit) oder die späteren Formteile (z.B. Transparenz), die eine Additivierung der Halbzeugmaterialien erfordern:



Antiblockmittel:

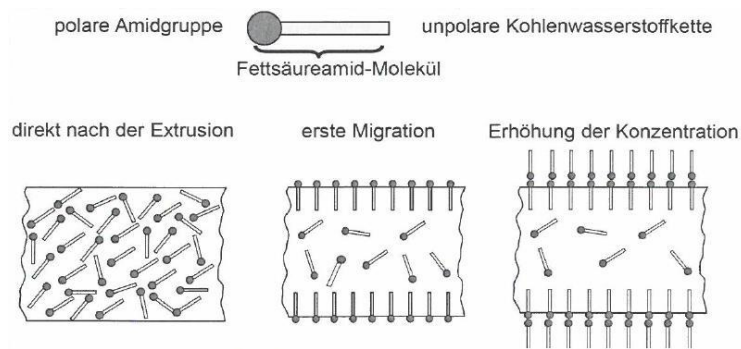
- verhindern (oberflächliche) Aneinanderkleben von Folien
- Aneinanderkleben tritt z.B. beim Aufwickeln von Flachfolien auf
- Antiblockmittel treten infolge der Folienschwindung in Dickenrichtung an der Oberfläche hervor
- **Wirkprinzip**: künstliche Erzeugung einer Oberflächenrauigkeit reduziert Kontaktfläche

Antistatika:

- reduzieren elektrische Oberflächenwiderstände des Halbzeugs
- dadurch verminderte Staubanziehung (Lebensmittelverpackung!) und elektrostatische Aufladung
- verbessert Vereinzelung von Verpackungseinheiten beim Entstapeln
- **Wirkprinzip**: Innere Antistatika migrieren an die Oberfläche und bilden hydrophile Schicht. Dadurch Anziehung von Wasser aus der Umgebung.

Gleitmittel:

- verändern die Reibeigenschaften an der Folienoberfläche
- Reduktion des Reibkoeffizienten verhindert Faltenbildung beim Aufwickeln der Folie
- Erhöhung des Reibkoeffizienten verhindert Verrutschen der inneren Lagen des Folienwickels
- **Wirkprinzip** äußere Gleitmittel:



#### Farbmittel:

- Unterscheidung in organische und anorganische Farbmittel
- gute Farbabstimmung bei organischen Farbmitteln
- hohe Temperaturbeständigkeit bei anorganischen Farbmitteln
- Titanoxid oder Zinksulfid für weiße Pigmentierung (Bedrucken!)
- Farbruß zur Schwärzung von Halbzeugen

#### Füllstoffe:

- reduzieren Halbzeugkosten
- beeinflussen mechanische und thermische Eigenschaften
- verbessern Verarbeitbarkeit z.B. durch Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit und dadurch Reduzierung der Abkühlzeit

#### Nukleierungsmittel:

- häufig eingesetzt bei Polypropylen für Verpackungsartikel
- erhöhen die Kristallisationstemperatur beim Abkühlen und wirken kristallisationsbeschleunigend
- bewirken feineres Sphärolitgefüge und erhöhen dadurch die Transparenz und den Glanz
- vergrößern Prozessfenster und reduzieren Zykluszeit

PP (Folienquerschnitt)



PP + Nukleierer (Folienquerschnitt)

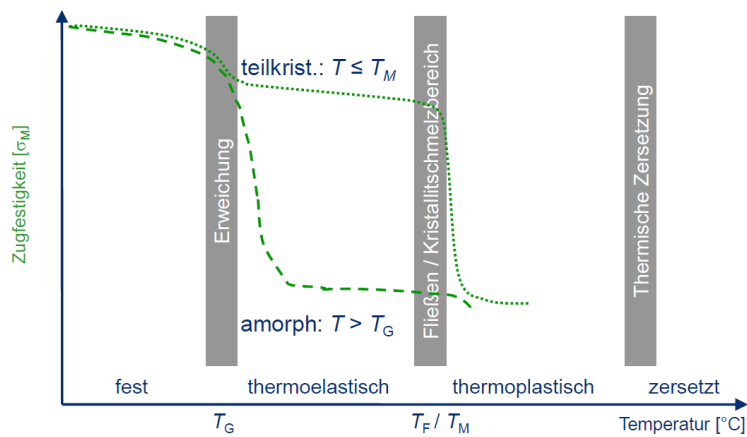


## Halbzeuergewärmung – Methoden und Berechnung

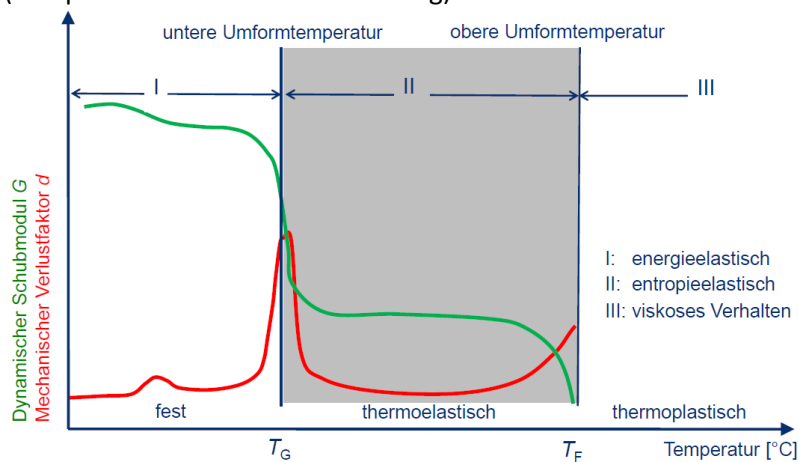
### Umformbereich

Der Umformtemperaturbereich liegt bei amorphen TP oberhalb  $T_G$ , bei teilkristallinen TP knapp unterhalb  $T_M$ .

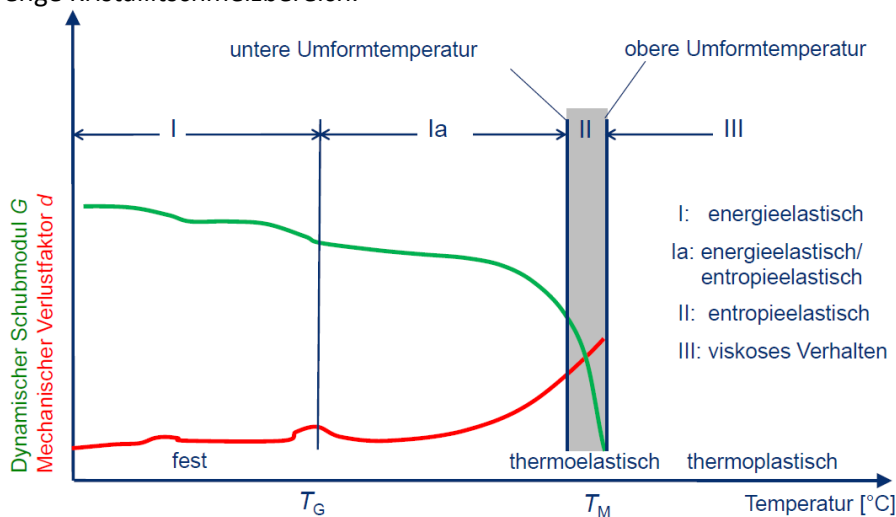




Amorphe Thermoplaste verfügen oberhalb von  $T_G$  über ein relativ breites Verarbeitungsfenster (Temperaturbereich der Umformung).



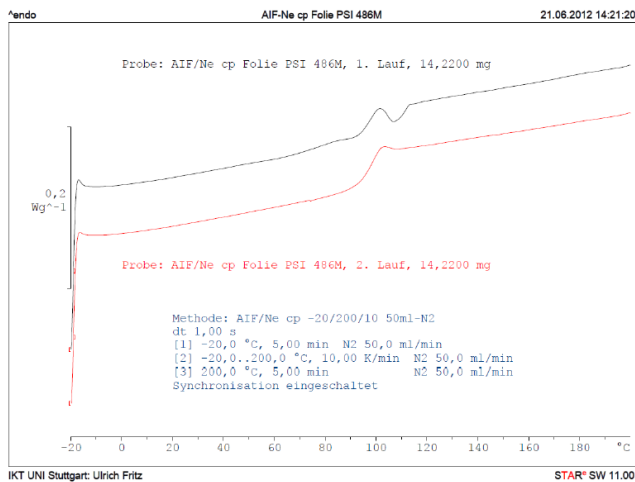
Das Verarbeitungsfenster bei teilkristallinen Thermoplasten hingegen ist enger. Grund ist der u. U. enge Kristallitschmelzbereich.



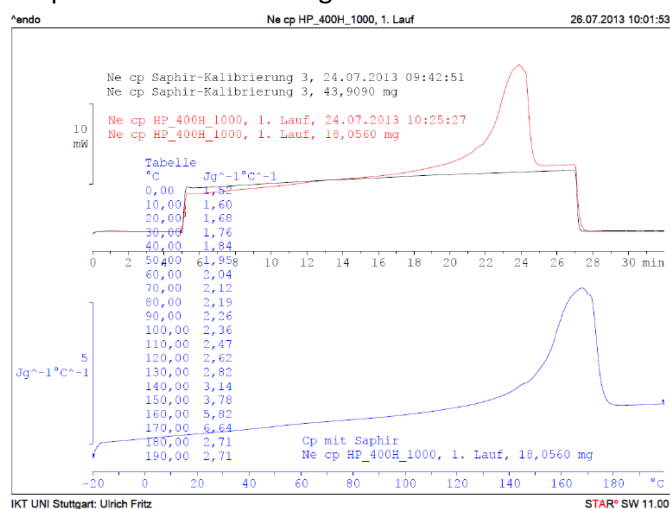
Einschub:

Wie kann der Umformtemperaturbereich (grob) ermittelt werden?

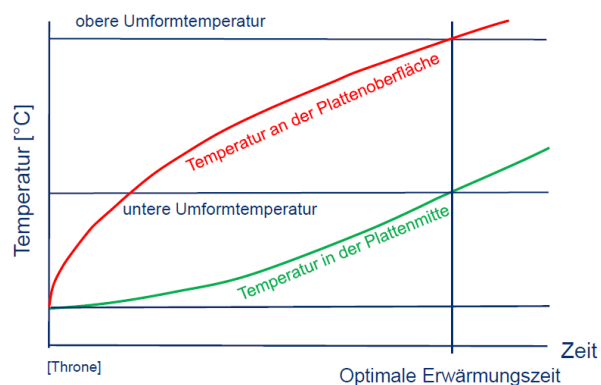
Beispiel einer DSC-Messung eines HIPS:



### Beispiel einer DSC-Messung eines PP:



Der Umformtemperaturbereich wird durch die obere und die untere Umformtemperatur bestimmt. Oberhalb dieses Temperaturbereichs kann es zu thermischen Schädigungen, unterhalb zu Mikrorissen beim Umformen im Halbzeug kommen.



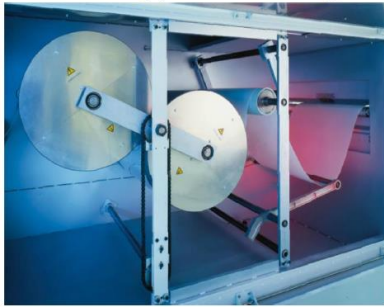
### Erwärmungsarten

Prinzipiell können Halbzeuge über Wärmekontakt, mittels Konvektion oder Wärmerstrahlung erwärmt werden.

Kontaktheizungen oder Konvektionsöfen werden jedoch hauptsächlich zur gleichmäßigen und schonenden Vorheizung von Folienrollen eingesetzt.



Kontakttheizung (Walzenvorheizung)



Konvektionsofen (Vorheizung)



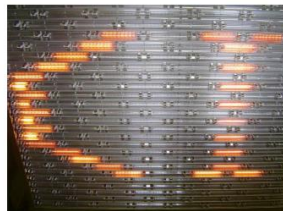
Bei den meisten Thermoformverfahren werden Halbzeuge berührungslos mit Hilfe von Infrarotstrahlung erwärmt.

Hierfür werden unterschiedliche Strahlerarten eingesetzt:

Keramikstrahler



Quarzstrahler



Halogenstrahler



Metallfolienstrahler



Die Strahlerarten unterscheiden sich:

- im Ansprechverhalten
- in der Betriebstemperatur
- im Wellenlängenbereich ihrer maximalen Intensität

### Grundlagen der Berechnung

Aus dem Energiesatz verbleibt für ruhende, inkompressible Medien (mit innerer Wärmequelle):

$$\rho(T) \cdot c_p(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{q} + \dot{q} \quad \begin{array}{l} \rho: \text{Dichte} \\ c_p: \text{spez. Wärmekapazität} \end{array}$$

Die Wärmestromdichte ist nach Fourier gegeben durch:

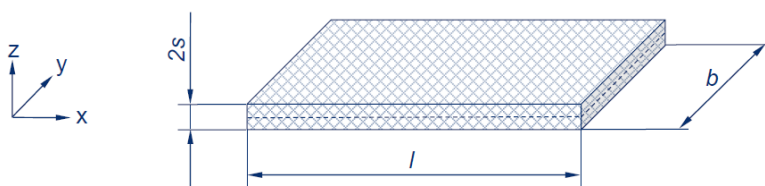
$$\vec{q} = -\lambda(T) \cdot \operatorname{grad} T \quad \lambda: \text{Wärmeleitfähigkeit}$$

Für konstante Stoffwerte\*  $\rho$ ,  $c_p$ , und  $\lambda$  folgt mit der Einführung der Temperaturleitfähigkeit  $a$ :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \Delta T = a \cdot \Delta T + \frac{a}{\lambda} \cdot \dot{q}$$

\* $\rho$ ,  $\lambda$  und insbesondere  $c_p$  und damit  $a = f(T)$ !

Ein Halbzeug kann als rechteckige, ebene Platte angesehen werden:



Für die ebene Platte gilt in kartesischen Koordinaten:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{a}{\lambda} \cdot \dot{q}$$

Und vereinfachend für die halbbunendliche (l, b >> s), ebene Platte:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{a}{\lambda} \cdot \dot{q}$$

Anfangsbedingung (instationärer Fall):

$$T_{t=0, z} = T_0$$

Randbedingungen:

- 1. Art (Dirichlet'sche RB):

$$T_{t, z=s} = \text{konst.} \quad / \quad T_{t, z=s} = T(t)$$

- 2. Art (Neumann'sche RB):

$$\dot{q}_{t, z=s} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_s = \text{konst.} \quad / \quad \dot{q}_{t, z=s} = \dot{q}(t)$$

- 3. Art (Newton'sche RB):

- Konvektion:

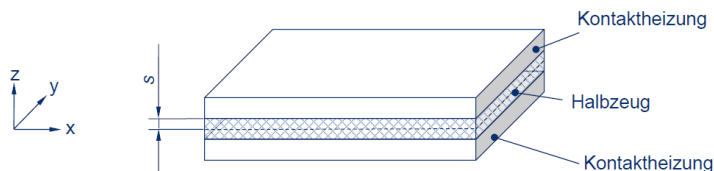
$$\dot{q}_{t, z=s} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_s = \alpha (T_\infty - T_s)$$

- Wärmestrahlung:

$$\dot{q}_{t, z=s} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_s = f(T_\infty^4, T_H^4, F, \varepsilon_\infty, \varepsilon_H)$$

## Grundlagen der Berechnung - Kontakterwärmung

Die Kontakterwärmung entspricht der Randbedingung 1. Art:



Annahmen:

- Halbzeug: Halbbunendliche Platte (eindimensional) der Dicke 2s
- Instationärer Fall (Aufheizen):
  - Halbzeugtemperatur zum Zeitpunkt  $t = 0$ :  $T_0$
  - Spontane Temperaturerhöhung an Halbzeugober- und -unterseite
  - $T_{\text{Oberseite}} = T_{\text{Unterseite}} = T_{\text{Kontaktheizung}}: T_s = T_K = \text{konstant}$

Lösung\* der Differentialgleichung über *Fourierreihe*:

$$T(t, z) = T_K + (T_0 - T_K) \cdot \frac{4}{\pi} \left[ e^{-\frac{\pi^2 \cdot a \cdot t}{4s^2}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{2s}\right) - \frac{1}{3} \cdot e^{-\frac{9\pi^2 \cdot a \cdot t}{4s^2}} \cdot \cos\left(\frac{3\pi \cdot z}{2s}\right) + K \right. \\ \left. + \frac{1}{5} \cdot e^{-\frac{25\pi^2 \cdot a \cdot t}{4s^2}} \cdot \cos\left(\frac{5\pi \cdot z}{2s}\right) \pm K \right]$$

\* gültig für getroffene Annahmen

Berechnung (Abschätzung) der Aufheizzeit  $t_h$ :

- Aufheizvorgang hinreichend weit fortgeschritten\* → Nur erster Term der *Fourierreihe* wird berücksichtigt
- Erforderliche Temperatur in Halbzeugmitte:  $T_{\text{erf}}$

Aus

$$T(t_h, 0) = T_{\text{erf}} = T_K + (T_0 - T_K) \cdot \frac{4}{\pi} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot a \cdot t_h}{4s^2}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot 0}{2s}\right)$$

folgt:

$$t_h \approx \frac{4s^2}{\pi^2 \cdot a} \cdot \ln \left[ \frac{4}{\pi} \cdot \left( \frac{T_0 - T_K}{T_{\text{erf}} - T_K} \right) \right]$$

\* Fourierzahl  $Fo \geq 0,2$

Anmerkung zur Fourierzahl:

- *Fourierzahl*  $Fo$ : dimensionslose Zeit

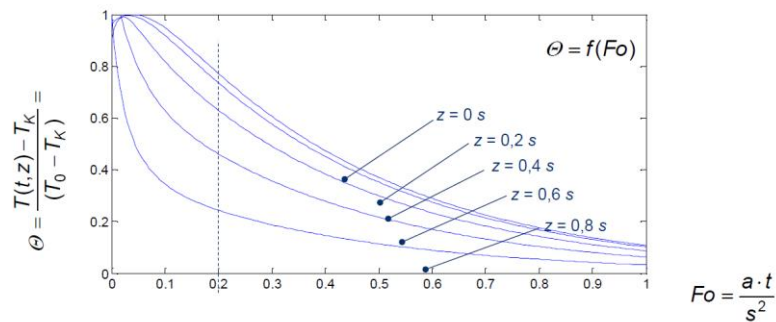
$$Fo = \frac{a \cdot t}{s^2}$$

- Lösung für das Temperaturverhältnis  $\theta$ : dimensionslose Temperatur

$$\theta = \frac{T(t, z) - T_K}{(T_0 - T_K)} = \frac{4}{\pi} \left[ e^{-\frac{\pi^2 \cdot Fo}{4}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{2s}\right) - \frac{1}{3} \cdot e^{-\frac{9\pi^2 \cdot Fo}{4}} \cdot \cos\left(\frac{3\pi \cdot z}{2s}\right) + K \right] + \frac{1}{5} \cdot e^{-\frac{25\pi^2 \cdot Fo}{4}} \cdot \cos\left(\frac{5\pi \cdot z}{2s}\right) \pm K$$

- Übertragung der Lösung für die halbumendliche ebene Platte auf andere Fälle (andere  $a$ ,  $s$ ,  $T_M$  und  $T_0$ ) möglich

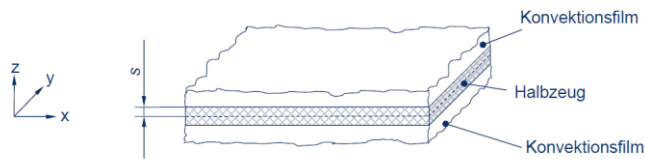
Anmerkung zur Fourierzahl:



## Grundlagen der Berechnung - Konvektion

Die Konvektionserwärmung entspricht der Randbedingung 3. Art. Annahmen wie zuvor, jedoch:

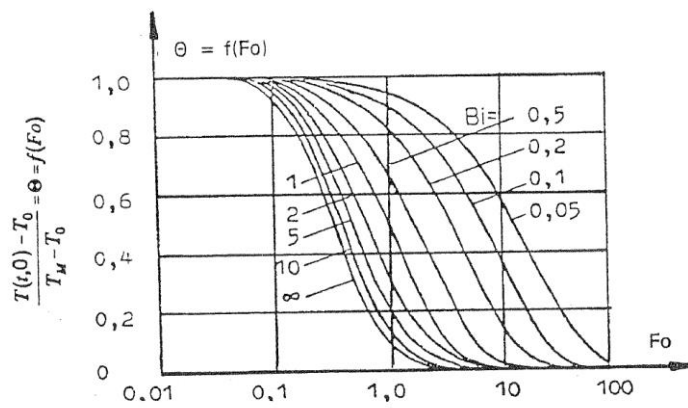
- endlicher Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$   
→ keine spontane Temperaturerhöhung an Halbzeugober- und -unterseite



Berechnung über modifizierte Kurven für  $Q = f(Fo)$  über Biot-Zahl  $Bi$  (Verhältnis von Wärmeübergang zu Wärmeleitung):

$$Bi = \frac{2 \cdot \alpha \cdot s}{\lambda}$$

Temperaturverhältnis  $\Theta = f(Fo, Bi)$



Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$ :

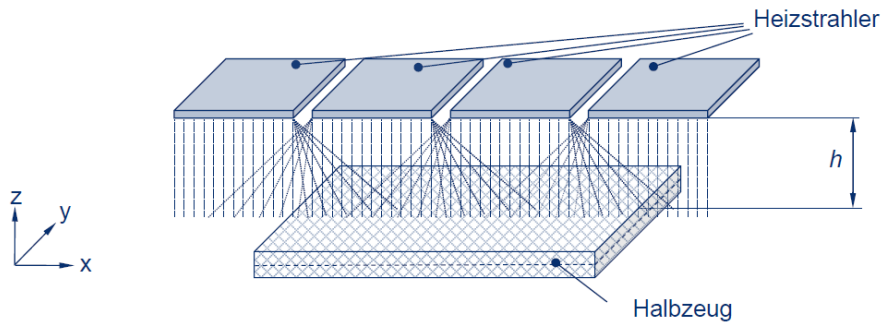
- Strömungs- und medienabhängig
- Ermittlung z.B. über VDI-Wärmeatlas

Beispiele für Wärmeübergangskoeffizienten nach [Throne]:

| Fluid                      | Conventional heat transfer coefficient |
|----------------------------|----------------------------------------|
|                            | ( $10^{-3} \text{ W/cm}^2\text{K}$ )   |
| Quiescent air              | 0.5-1                                  |
| Air moved with fans        | 1-3                                    |
| Air moved with blowers     | 3-10                                   |
| Air and water mist         | 30-60                                  |
| Fog                        | 30-60                                  |
| Water spray                | 30-90                                  |
| Oil in pipes               | 30-180                                 |
| Water in pipes             | 60-600                                 |
| Steam in pipes, condensing | 600-3,000                              |

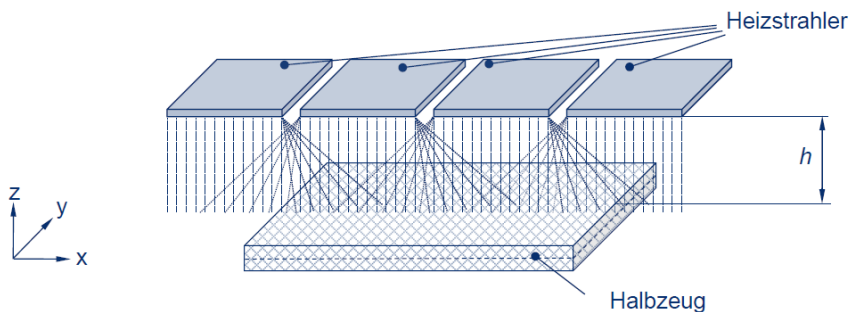
## Grundlagen der Berechnung - Wärmestrahlung

Die Erwärmung mittels Infrarotstrahlung entspricht ebenfalls der Randbedingung 3. Art.



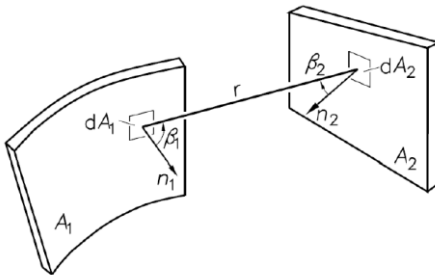
Problem: keine exakte Lösung erhältlich!

Für optimale Thermoformergebnisse wird in vielen Anwendungen eine gleichmäßige Erwärmung des Halbzeugs über der gesamten Halbzeugfläche sowie eine einheitliche Temperatur über dem Halbzeugquerschnitt gefordert.



Die Berechnung einer gleichmäßigen Wärmestromverteilung auf der erfolgt über die sogenannten Sichtfaktoren  $F$ .

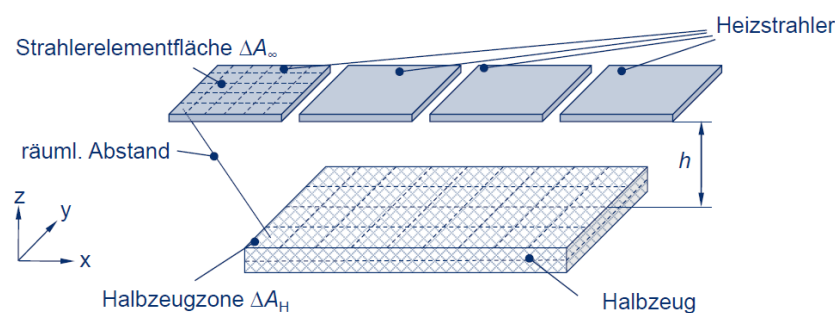
Sichtfaktor  $F$ :



Nach dem Motto: „*What the heater sees is what it heats*“ wird über den Sichtfaktor  $F$  die geometrische Beziehung zwischen dem Halbzeug(-element) und dem Strahlerfeld(-element) berücksichtigt.

## Mathematische Grundlagen - Wärmestrahlung

Sichtfaktor  $F$ :



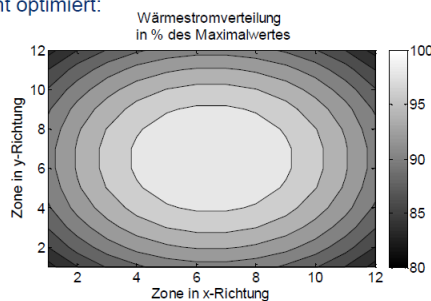
Teilt man Strahler und Halbzeug in endliche Flächen  $\Delta A_\infty$  und  $\Delta A_H$  kann der Sichtfaktor zwischen Strahler und Halbzeug näherungsweise bestimmt werden mit:

$$F_{\infty \leftrightarrow H} \approx \frac{1}{\pi \cdot A_\infty} \sum_{A_\infty} \sum_{A_H} \frac{h^2}{(x^2 + y^2 + h^2)^2} \Delta A_H \Delta A_\infty$$

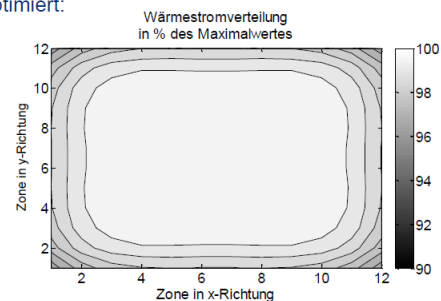
Durch Integration der Temperaturen einzelner Strahler lässt sich die Wärmestromdichte von allen Strahlern auf die Halbzeugfläche berechnen und so optimale Temperatureinstellungen für die einzelnen Strahler ermitteln:

$$q_{\sum A_{\infty,i} \rightarrow AH} \approx \sigma \cdot \frac{1}{\pi \cdot A_{\infty,i}} \sum_{A_{\infty,i}} \sum_{A_s} \frac{h^2}{(x^2 + y^2 + h^2)^2} T_{\infty,i}^4 \Delta A_H \Delta A_{\infty,i}$$

Nicht optimiert:

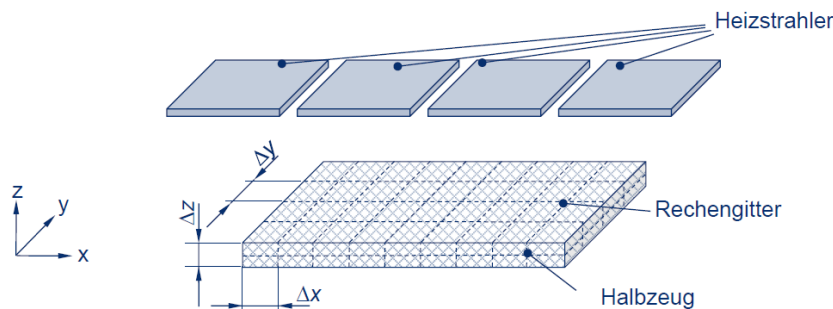


Optimiert:



Bei nun bekannter Wärmestromverteilung lässt sich die Temperaturerhöhung im Halbzeug z.B. mit Hilfe der Finiten Differenzen Methode (FDM) berechnen:

Diskretisierung des Halbzeugs durch (äquidistantes) Rechengitter mit den Gitterlängen  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  und  $\Delta z$ :



Umschreiben der Differentialquotienten in Differenzenquotienten:

- Zentraler Differenzenquotient 1. Ordnung für zeitliche Ableitung

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T(t + \Delta t) - T(t - \Delta t)}{2\Delta t}$$

- Zentraler Differenzenquotient 2. Ordnung für die Örtliche Ableitung

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \approx \frac{T(z + \Delta z) - 2T(z) + T(z - \Delta z)}{\Delta z^2}$$





**Übersicht**

### Halbzeugerwärmung mit Hilfe der finiten Differenzen Methode

**Eingeben**

Thermische Stoffgrößen

Halbzeuggröße und Randbedingungen

Numerische Parameter

Sichtfaktoren

Strahlerfeld

Programm Schließen

**Ergebnisse**

Oberflächentemperaturen

Temperaturverlauf Halbzeugdicke

Berechnung Starten

### Thermische Stoffgrößen:

**Stoffgrößen**

#### Thermische Stoffgrößen

Eingabewerte

|                                                                        |                                   |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Wärmeübergangskoeffizient Halbzeug-Luft $\alpha$ [W/m <sup>2</sup> *K] | <input type="text" value="5.7"/>  |
| Wärmeleitfähigkeit Halbzeug $\lambda$ [W/K*m]                          | <input type="text" value="0.2"/>  |
| Dichte Halbzeug $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]                            | <input type="text" value="900"/>  |
| mittlere spezifische Wärmekapazität Halbzeug $c_p$ [J/kg*K]            | <input type="text" value="3800"/> |

#### Strahlungsoptische Größen

Konstanten

|                                                                  |                                          |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Stefan-Boltzmann-Konstante [W/(m <sup>2</sup> *K <sup>4</sup> )] | <input type="text" value="5.6704e-08"/>  |
| 1. Strahlungskonstante [W/m <sup>2</sup> ]                       | <input type="text" value="3.74177e-16"/> |
| 2. Strahlungskonstante [ $\mu$ m K]                              | <input type="text" value="14387.8"/>     |

Variable Größen:

|                            |                                  |
|----------------------------|----------------------------------|
| Emissionsgrad Strahler [-] | <input type="text" value="0.9"/> |
|----------------------------|----------------------------------|

☒ gemittelte optische Eigenschaften

mittlere optische Eindringtiefe [m]

Emissionsgrad Halbzeug [-]

Reflexionsgrad Halbzeug [-]

☐ spektrale optische Eigenschaften

spektrale Absorptionskoeffizienten [1/m]

spektrale Emissionsgrade [-]

spektrale Reflexionsgrade [-]

### Randbedingungen:

**Halbzeuggröße und Randbedingungen**

#### Halbzeuggröße [mm]

bitte auswählen

☒ Längen ☐ Koordinaten

Länge

Breite

Höhe

#### Temperatureinstellung [°C]

Starttemperatur Halbzeug

Umgebungstemperatur

#### Wärmestromdichte [W/m<sup>2</sup>]

Nettowärmestrom (für Randbedingung 2. Art)

#### Strahlungsheizung (3. Art)

bitte auswählen

☐ beidseitig ☒ einseitig (nur oben)

#### Randbedingungen

bitte auswählen:

☐ 1. Art (Wandtemperatur bekannt)

☐ 2. Art (Wärmestrom bekannt)

☒ 3. Art (Fluidtemperatur Umgebung bekannt)

## Numerische Parameter:

**numerische Parameter**

| örtliche Diskretisierung               |                                 | zeitliche Diskretisierung |                                 |
|----------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| anzahl Elemente in x-Richtung (Länge)  | <input type="text" value="10"/> | Aufheizzeit [s]           | <input type="text" value="60"/> |
| anzahl Elemente in y-Richtung (Breite) | <input type="text" value="10"/> | Zeitintervall [s]         | <input type="text" value="1"/>  |
| anzahl Elemente in z-Richtung (Höhe)   | <input type="text" value="10"/> |                           |                                 |

**Gewichtungsfaktor f für das allgemeine Finite Differenzen Verfahren**

f= 0: vollständig explizites Differenzenschema      f=

f= 0.5: Crank-Nicolson-Verfahren

f= 1: vollständig implizites Differenzenschema

## Sichtfaktoren:

**Sichtfaktoren**

| Strahlerfeld       |                                  | geometrische Abmessungen [mm] |                                  |
|--------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Länge (x-Richtung) | <input type="text" value="240"/> | Breite (y-Richtung)           | <input type="text" value="240"/> |
| Höhe (z-Richtung)  | <input type="text" value="100"/> |                               |                                  |

**Diskretisierung**

anzahl Elemente in x-Richtung

anzahl Elemente in y-Richtung

| Halbzeug                                        |  | geometrische Abmessungen [mm] |  |
|-------------------------------------------------|--|-------------------------------|--|
| bekannt aus "Halbzeuggröße und Randbedingungen" |  |                               |  |

**Diskretisierung**

bekannt aus "Numerische Parameter"

**Sichtfaktoren Halbzeug**

## Strahlerfeld:

**Übersicht**

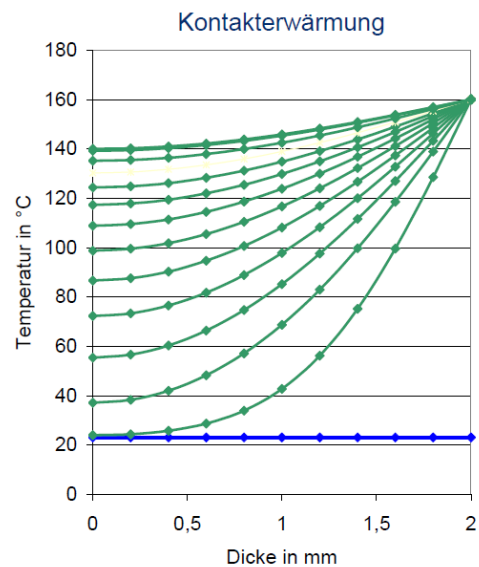
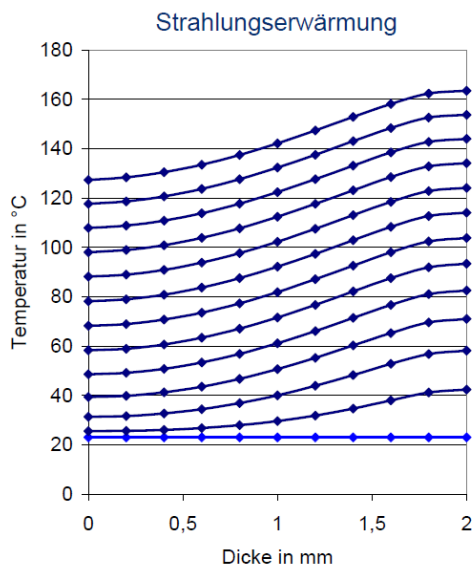
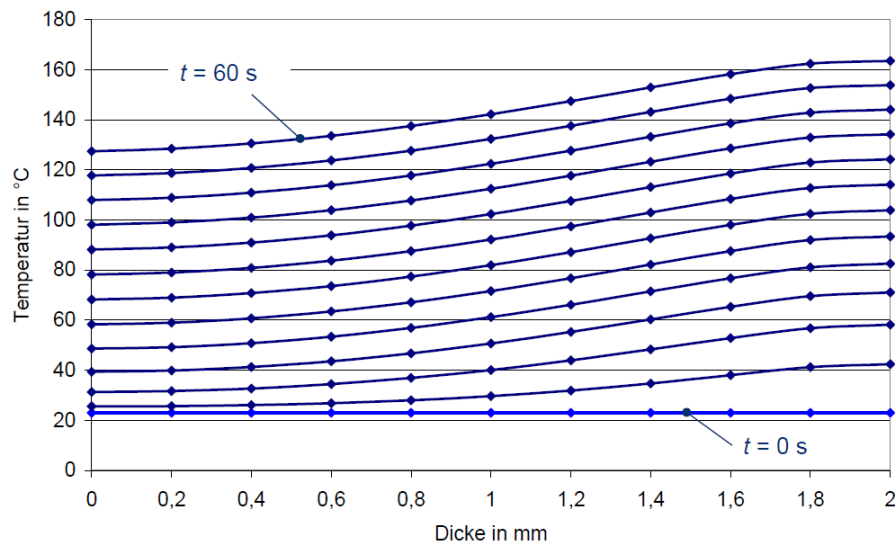
**Strahlerfeldtemperaturen**

Strahlerfeldtemperaturen [°C]

|                                  |                                  |                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <input type="text" value="550"/> | <input type="text" value="500"/> | <input type="text" value="500"/> | <input type="text" value="550"/> |
| <input type="text" value="500"/> | <input type="text" value="450"/> | <input type="text" value="450"/> | <input type="text" value="500"/> |
| <input type="text" value="500"/> | <input type="text" value="450"/> | <input type="text" value="450"/> | <input type="text" value="500"/> |
| <input type="text" value="550"/> | <input type="text" value="500"/> | <input type="text" value="500"/> | <input type="text" value="550"/> |

**Methoden**

Berechnungsergebnis für ein 2 mm dickes Halbzeug:

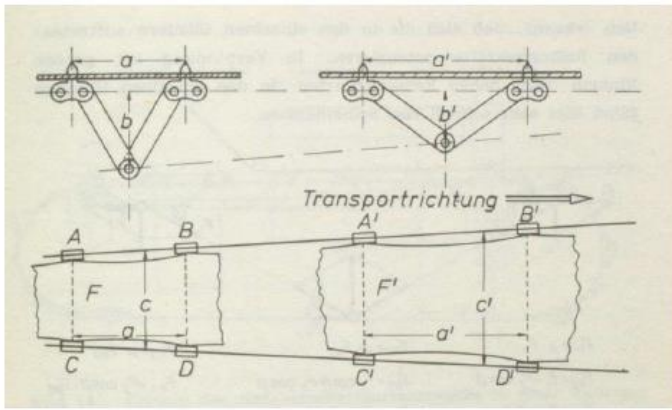


### Besonderheiten bei der Erwärmung von teilkristallinen TP

Bei der Erwärmung von teilkristallinen Thermoplasten, wie PP, gelten höhere Anforderungen an die Maschinen- und Prozesstechnik als bei amorphen Thermoplasten.

Grund:

- teilkristalline TP haben eine höhere Wärmekapazität und benötigen daher mehr Wärmeenergie
- starke Wärmeausdehnung muss durch konisches Auseinanderlaufen der Transportschienen senkrecht zur Vorschubrichtung sowie durch Vorwärmen in Vorschubrichtung kompensiert werden
- enges Verarbeitungsfenster erfordert genaue Temperaturführung



## Zusammenfassung

### Was Sie (auf jeden Fall) wissen sollten...

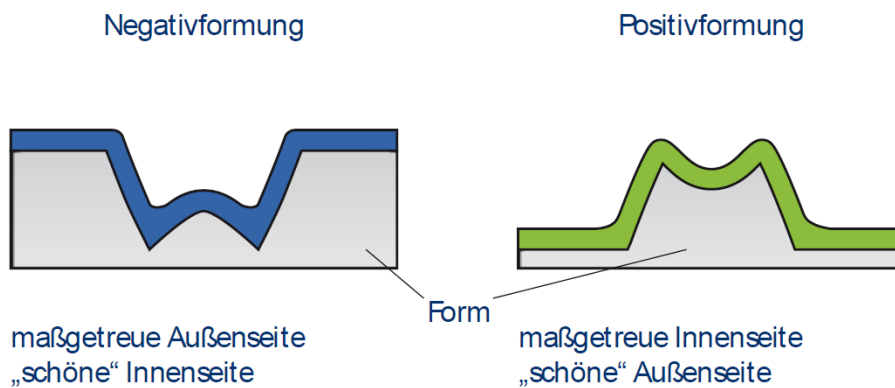
- Erwärmung über Kontakt-, Konvektions- oder Strahlungsheizung
- Art der Erwärmung abhängig von
- Halbzeugdicke
- Anforderungen an die Oberflächenqualität
- Aufheizzeit (und Abkühlzeit) steigt überproportional mit der Halbzeugdicke
- teilkristalline Thermoplaste lassen sich schwieriger verarbeiten als amorphe Thermoplaste
- Hohe Anforderungen an die Ausformschärfe erfordern höhere Umformtemperaturen  
(-> engeres Verarbeitungsfenster)

## Formgebung – Verfahrensvarianten und Simulation

### Grundbegriffe

Nach der Erwärmung des Halbzeuges folgt die Umformphase.

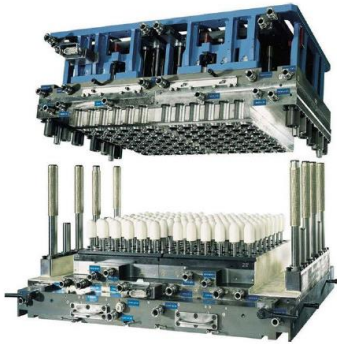
Die Formgebung beim Thermoformen erfolgt zumeist einseitig. Man unterscheidet Negativformung und Positivformung:



Beispiele für Formwerkzeuge:

#### Negativformwerkzeug

(Mehrkavitätenformwerkzeug) für die Becherherstellung

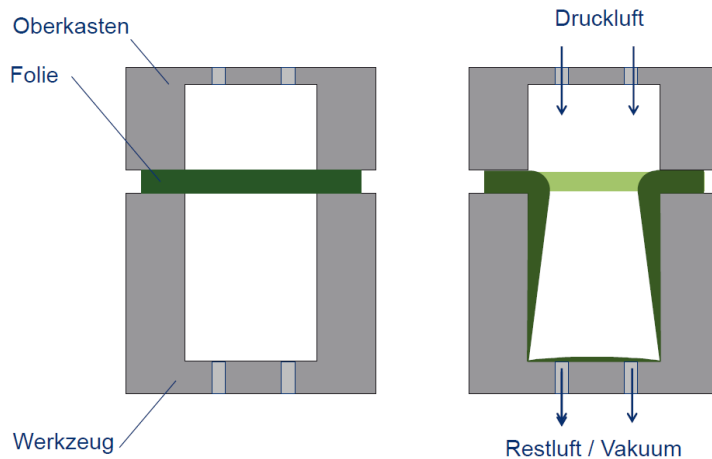


#### Positivformwerkzeug

(Einkavitätenformwerkzeug) für ein Gehäuseteil



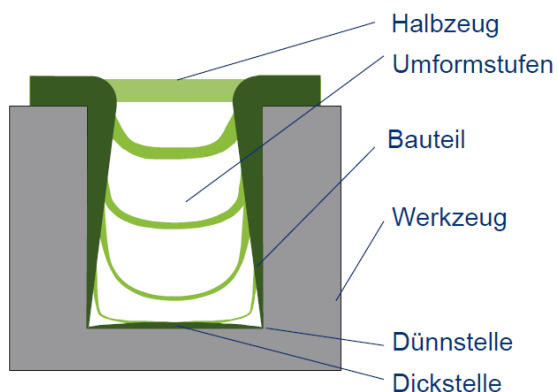
Die Umformung und Ausformung erfolgt mit Druckluft oder durch Anlegen eines Vakuums und kann durch sog. Stempel unterstützt werden.



#### Wanddickenverteilung

Die Herausforderung in der Formgebung liegt in einer gleichmäßigen Wanddickenverteilung des Formteils.

Beim Thermoformen werden die Bauteilkosten i.d.R. durch die Materialkosten bestimmt.  
geringe Wanddicke → geringe Materialkosten → geringe Bauteilkosten

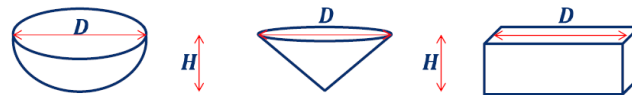


Die Wanddicke eines Bauteils kann über das Verstreckverhältnis abgeschätzt werden.

- Areal Draw Ratio  $R_a = \frac{A}{A_0}$  mit  $V = A * t = A_0 * t_0 = konst.$

| Form      |  | Fläche A           | Fläche A <sub>0</sub> | R <sub>a</sub>                  |
|-----------|--|--------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Halbkugel |  | $2\pi r^2$         | $\pi r^2$             | 2                               |
| Zylinder  |  | $\pi r^2 + \pi rh$ | $\pi r^2$             | $1 + \left(\frac{2h}{r}\right)$ |
| Würfel    |  | $5a^2$             | $a^2$                 | 5                               |
| ...       |  | ...                | ...                   | ...                             |

- H/D-Verhältnis



- Linear Draw Ratio  $R_l = \frac{l}{l_0}$  mit  $t = \frac{t_0}{R_l}$

| Form      |  | Strecke l | Strecke l <sub>0</sub> | R <sub>l</sub>    |
|-----------|--|-----------|------------------------|-------------------|
| Halbkugel |  | $\pi r$   | $2r$                   | $\frac{\pi}{2}$   |
| Zylinder  |  | $2h + 2r$ | $2r$                   | $1 + \frac{h}{r}$ |
| Würfel    |  | $3a$      | $a$                    | 3                 |
| ...       |  | ...       | ...                    | ...               |

Bei den vorgestellten Methoden wird lediglich eine mittlere Wanddicke abgeschätzt. Im realen Prozess liegt jedoch eine inhomogene Wanddickenverteilung vor.

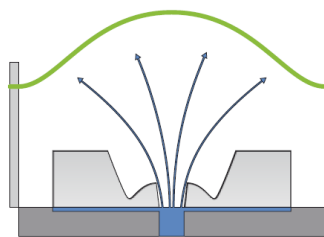
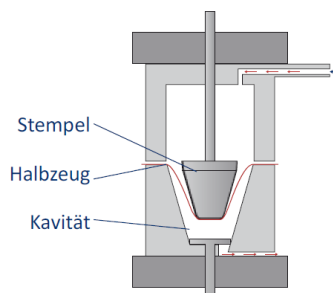
### Vorstrecken

Inhomogene Wanddickenverteilungen erschweren die Bauteilauslegung.

Bei Formteilen mit hohen Verstreckgraden (z.B. Becher) ist daher vor der Ausformung ein Vorstrecken des Halbzeugs notwendig:

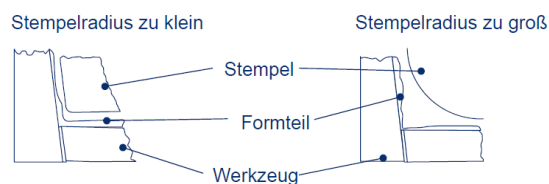
Mechanisches Vorstrecken (Stempel)

Pneumatisches Vorstrecken (Vorblasen)



Stempelgeometrie und Stempelwerkstoff für die Becherformung:

- Geometrie

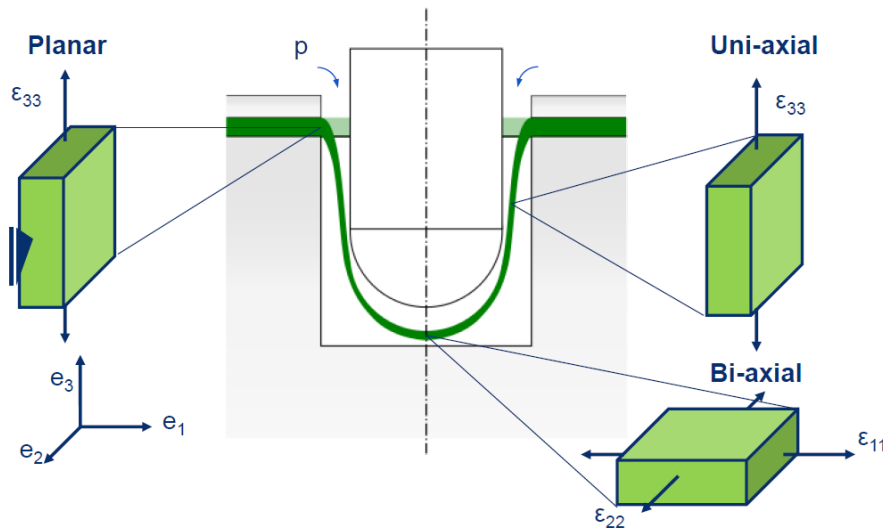


- Werkstoffe

| Folie             | Oberstempelwerkstoffe |               |                      |
|-------------------|-----------------------|---------------|----------------------|
|                   | POM                   | Filz gehärtet | Syntaktischer Schaum |
| PS-HI             |                       | X             | X                    |
| Styrolux, K-Resin | X                     |               | X                    |
| PP                | X                     |               | X                    |
| PP „glasklar“     | X                     |               |                      |
| PVC               |                       | X             | X                    |
| PVC „glasklar“    |                       |               | X                    |
| PET (PETG, APET)  | X                     |               | X                    |
| PET „glasklar“    | X                     |               |                      |

## Deformationszustände beim Thermoformen

Beim Thermoformen erfolgt die Materialverstreckung in verschiedenen Dehnungsmoden:



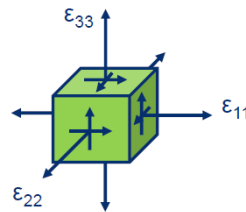
## Dehnung und Spannung

### Wiederholung:

#### ▪ Dehnung

$$\varepsilon_{tech} = \frac{\Delta L}{\Delta L_0} \quad \varepsilon_{wahr} = \int_{L_0}^L \frac{\partial L}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

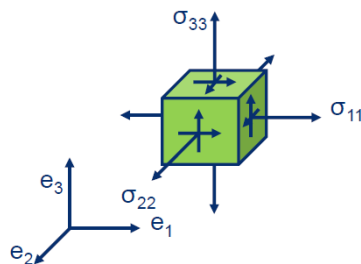
$$\underline{\underline{\varepsilon}}(t) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{1,1}(t) & \varepsilon_{1,2}(t) & \varepsilon_{1,3}(t) \\ \varepsilon_{2,1}(t) & \varepsilon_{2,2}(t) & \varepsilon_{2,3}(t) \\ \varepsilon_{3,1}(t) & \varepsilon_{3,2}(t) & \varepsilon_{3,3}(t) \end{pmatrix}$$



#### ▪ Spannung

$$\sigma_{tech} = \frac{F}{A_0} \quad \sigma_{wahr} = \frac{F}{A}$$

$$\underline{\underline{\sigma}}(t) = \begin{pmatrix} \sigma_{1,1}(t) & \sigma_{1,2}(t) & \sigma_{1,3}(t) \\ \sigma_{2,1}(t) & \sigma_{2,2}(t) & \sigma_{2,3}(t) \\ \sigma_{3,1}(t) & \sigma_{3,2}(t) & \sigma_{3,3}(t) \end{pmatrix}$$

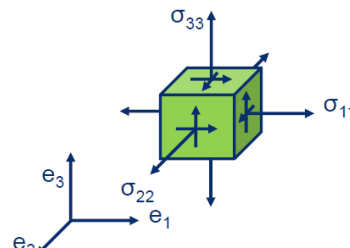




## Materialbeanspruchung bei der Umformung

Zwischen der Deformation des Materials und den Spannungen im Material besteht ein funktionaler Zusammenhang  $\mathcal{F}$ .

Der aktuelle Spannungszustand  $\underline{\underline{\sigma}}(t)$  eines Volumenelementes zum Zeitpunkt  $t$  ist von der gesamten Deformationshistorie des Volumenelementes abhängig.

$$\underbrace{\underline{\underline{\sigma}}(t)}_{\text{Spannungs-}} = \underbrace{-p\underline{\underline{E}}}_{\text{Hydrostatischer Druck}} + \underbrace{\mathcal{F}_{\underline{\underline{\varepsilon}}=-\infty}^{\underline{\underline{\varepsilon}}=t} \underline{\underline{C}}_t(\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}})}_{\text{Deformations-}} \quad \text{geschichte}$$


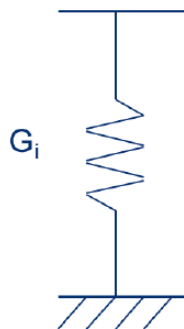
## Theorie der linearen Viskoelastizität

Das Materialverhalten  $\mathcal{F}$  lässt sich durch entsprechende Vergleichsmodelle beschreiben.

### Hooke'sches Gesetz:

Im einfachsten Fall (z.B. im linear-elastischen Verformungsbereich von Metallen) lässt sich der funktionale Zusammenhang  $\mathcal{F}$  durch das Hooke'sche Gesetz beschreiben.

$$\sigma_i(t) = G_i \varepsilon_i(t)$$



▪ Federsteifigkeit  $G_i$  [MPa]

→ Lsg. für das Hooke'sche Modell:  $\underline{\underline{\sigma}}(t) = \underline{\underline{\tilde{G}}}(\nu) * \underline{\underline{\varepsilon}}(t)$  mit  $\underline{\underline{\tilde{G}}}(\nu) \sim$  Steifigkeitsmatrix

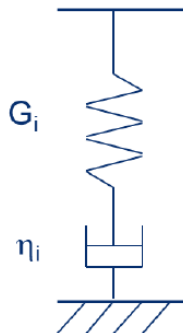
### Maxwell Modell:

Beim Maxwell Modell wird das Materialverhalten durch Feder/Dämpfer-Elemente (sog. Maxwell-Elemente) beschrieben.

$$\sigma_i(t) = G_i \varepsilon_{i,F}(t)$$

$$\sigma_i(t) = \eta_i \dot{\varepsilon}_{i,D}(t)$$

$$\varepsilon_i(t) = \varepsilon_{i,F}(t) + \varepsilon_{i,D}(t)$$

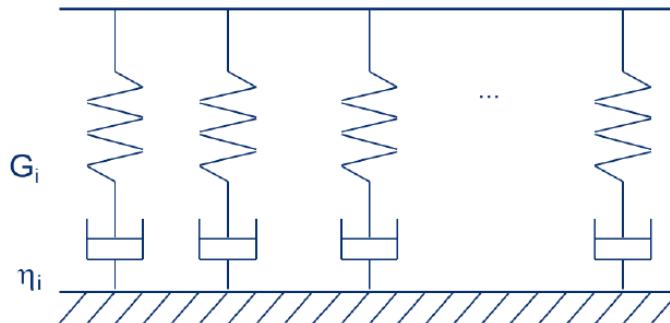


- Elastischer Anteil:  
Federsteifigkeit  $G_i$  [MPa]
- Viskoser Anteil:  
Dämpfer mit Kennwert  $\eta_i$  [Pa s]

→ Lsg. für ein Maxwell-Element:  $\sigma_i(t) = \int_{-\infty}^t \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t'} G_i e^{-\frac{G_i}{\eta_i}(t-t')} dt'$

### Verallgemeinertes Maxwell Modell:

Beim verallgemeinerten Maxwell Modell wird das Materialverhalten als eine Reihenschaltung von mehreren Maxwell-Elementen beschrieben.



→ Lsg. für das verallgemeinerte Maxwell-Modell:  $\underline{\sigma}(t) = \int_{-\infty}^t \sum_i \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t'} G_i e^{-\frac{G_i}{\eta_i}(t-t')} dt'$

### Kaye-Bernstein, Kearsley, Zapas Modell (K-BKZ Modell):

Eine Weiterentwicklung des verallgemeinerten Maxwell Modell stellt das K-BKZ-Modell dar.

$$\underbrace{\underline{\underline{\sigma}}(t)}_{\text{I}} = \int_{-\infty}^t \underbrace{m(t-t')}_{\text{II}} \underbrace{h(I_1, I_2)}_{\text{III}} \underbrace{\underline{\underline{C}}_f^{-1}(t')}_{\text{IV}} dt'$$

- I: Spannungstensor
- II: Gedächtnisfunktion
- III: Dämpfungsfunktion
- IV: Finger'scher Deformations-tensor

$$\text{II: } m(t-t') = \sum_i \frac{g_i}{\tau_i} e^{-\frac{t-t'}{\tau_i}}$$

$$\text{III: Wagner I: } h(I_1, I_2) = \frac{1}{1 + \alpha \sqrt{(I_1 - 3) \cdot (I_2 - 3)}}; \text{ Wagner II: } h(I_1, I_2) = \frac{1}{\exp(\beta \sqrt{\alpha \cdot I_1 + (1 - \alpha) I_2 - 3})}$$

$$\text{IV: } \underline{\underline{C}}_f^{-1} = \begin{pmatrix} e^{2\varepsilon} & 0 & 0 \\ 0 & e^{2m\varepsilon} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-2(1+m)\varepsilon} \end{pmatrix}$$

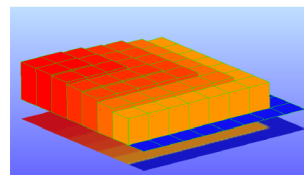
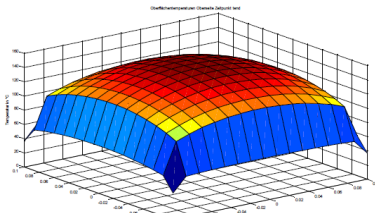
| m-Wert | Dehnmode |
|--------|----------|
| -0,5   | uniaxial |
| 0      | planar   |
| 1      | biaxial  |

### Simulation des Umformprozesses

Simulation mit T-Sim® der Firma Accuform:

1. Modellierung mittels FDM / Messung der Halbzeugtemperatur nach Erwärmung

→ Implementierung in T-Sim

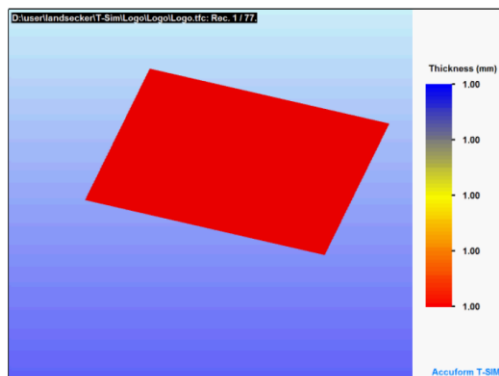


2. Implementierung der Werkzeug- und Stempelgeometrie

3. Definition der Prozessparameter

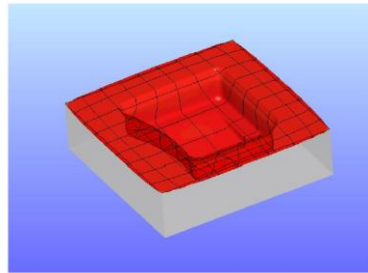
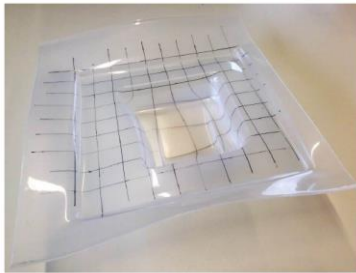
4. Implementierung der Materialparameter

5. Definition weiterer Randbedingungen (Reibung, Wärmeübergang, etc.)



Vorhersage von:

Durchhang, Ausformbarkeit, Wanddickenverteilung, Abformgenauigkeit von Texturierungen, Faltenbildung, Verzerrung einer Dekoration, optimalen Temperaturprofilen und optimaler Stempelgeometrie (Topologieoptimierung)



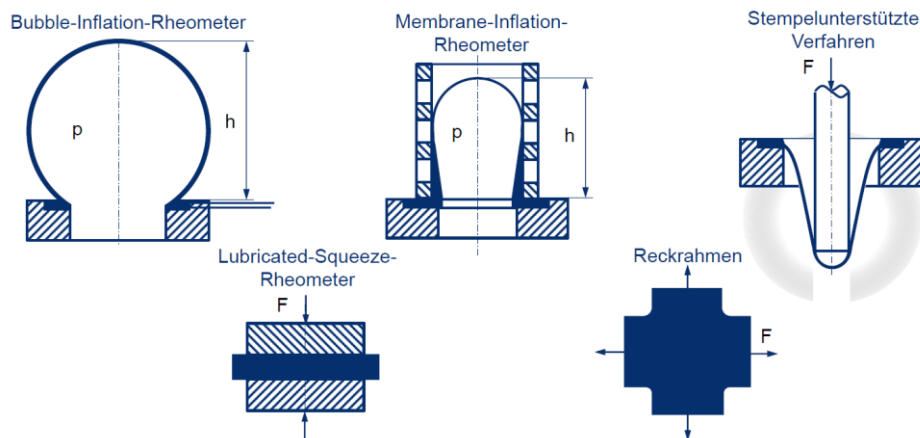
### Materialcharakterisierung

Ermittlung der Modellparameter über zeit- und temperaturabhängige

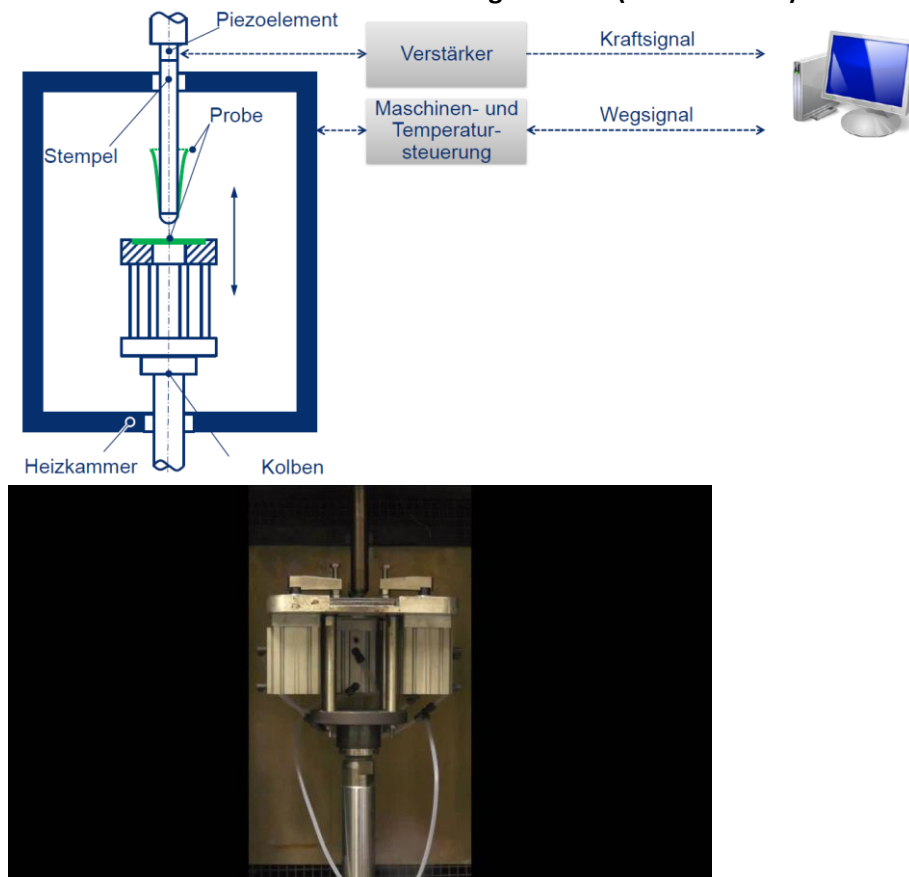
- Zugversuche (mitunter unzuverlässige Messdaten)
- Torsionsschwingversuche (aufwendig)

Alternative Methoden zur Ermittlung der Modellparameter

- Lubricated Squeeze Rheometer
- Bubble Inflation Rheometer
- Membrane Inflation Rheometer
- Multi-axiales Dehnrheometer
- Instrumented Dart Test
- Reckrahmen
- Thermoform-Material-Charakterisierung (TMC) am IKT



## Thermoform-Material-Charakterisierung-Versuch (TMC-Versuch)

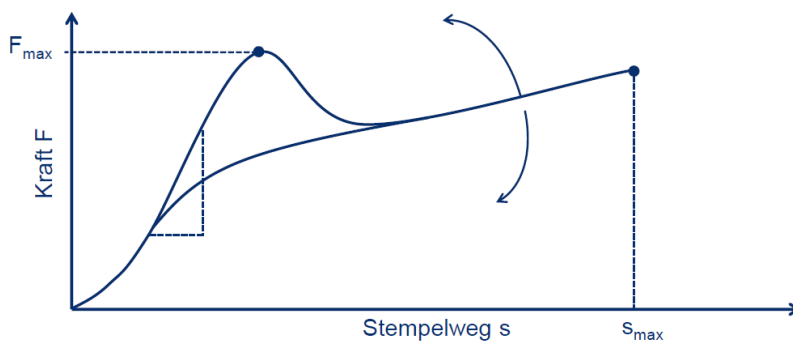


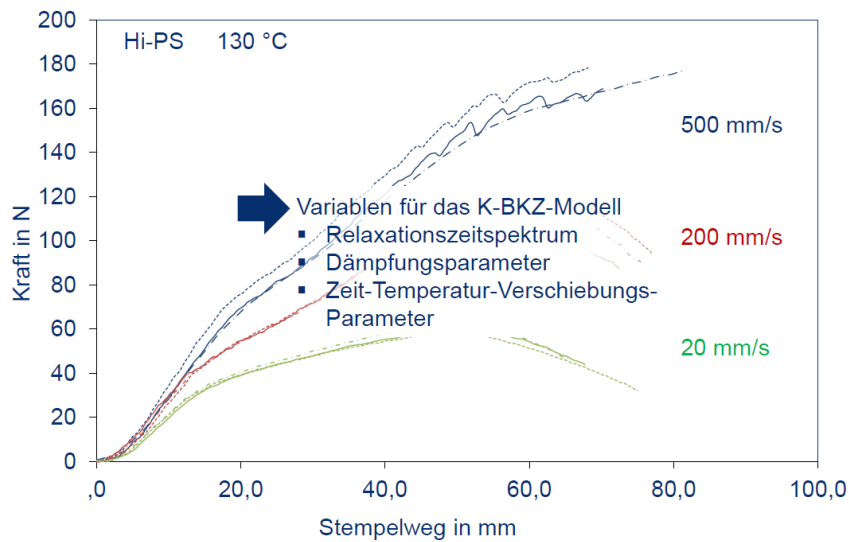
- Ermittlung von zeit- und temperaturabhängigen Kraft-Wegverläufen
- bi-axiale Deformation
- Materialcharakterisierung an Halbzeugen

## Messergebnisse beim TMC-Versuch

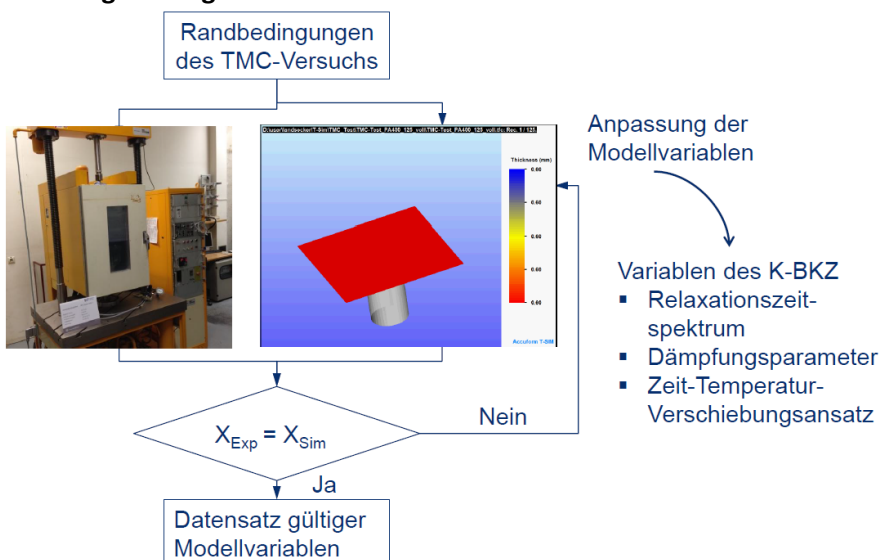
Bestimmung von

- Material
- Temperaturabhängigkeit des Materials
- Geschwindigkeitsabhängigkeit des Materials
- Kritische Verstreckgrade
- Thermoformeignung des Materials allgemein (Durchhang und Abformgenauigkeit)



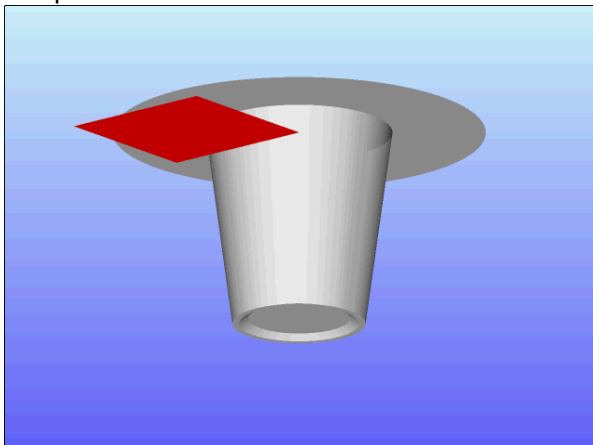


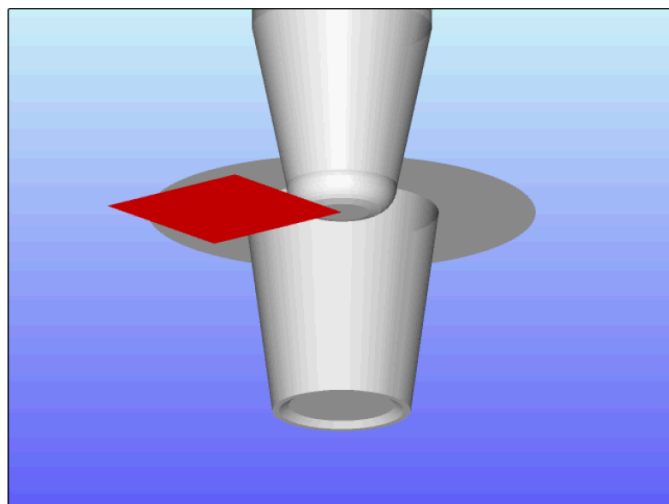
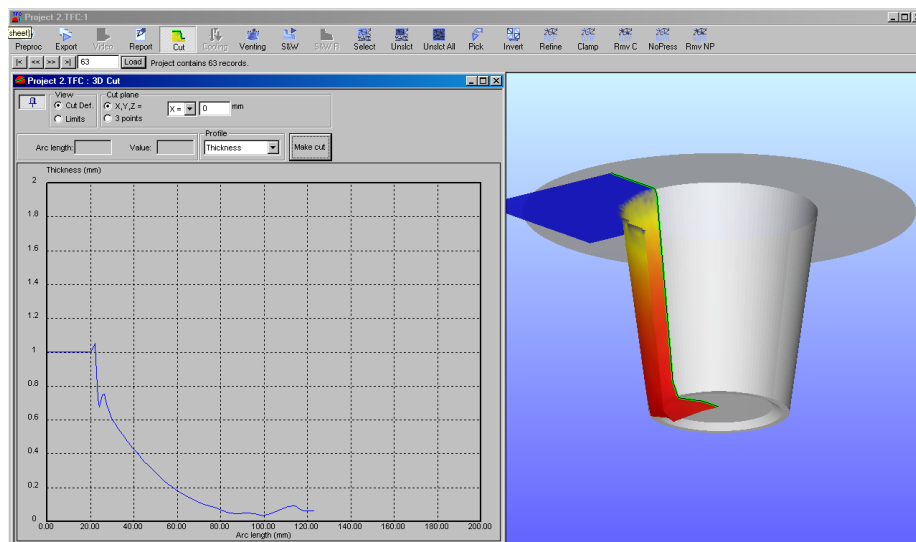
### Reverse-Engineering-Ansatz



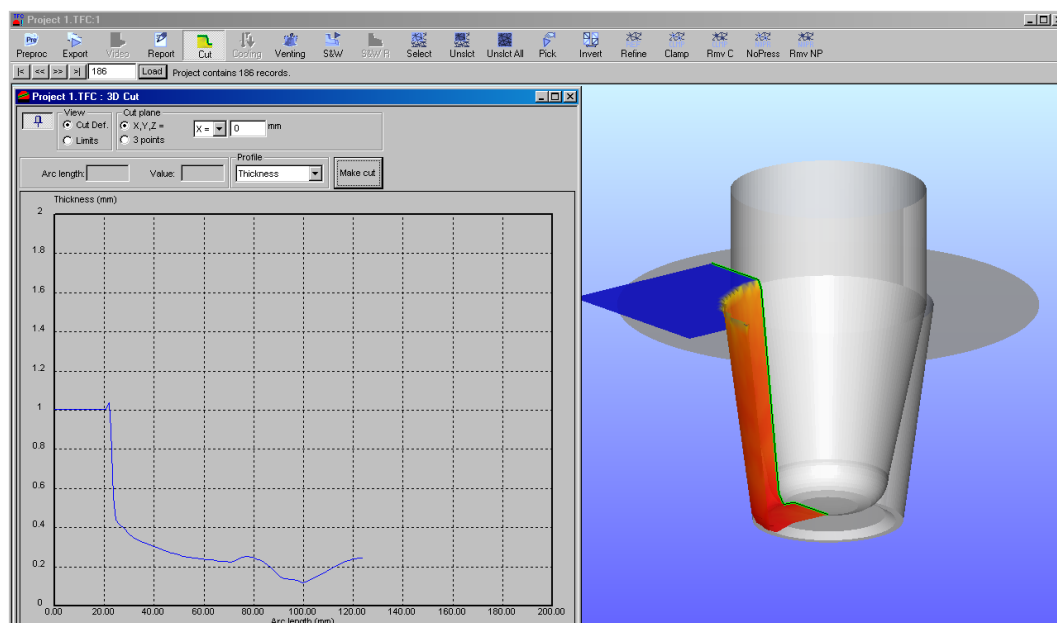
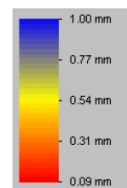
### Exemplarische Simulation

Beispiel: Simulation einer Becherform mittels T-SIM®: ohne Vorstrecken





Dicke



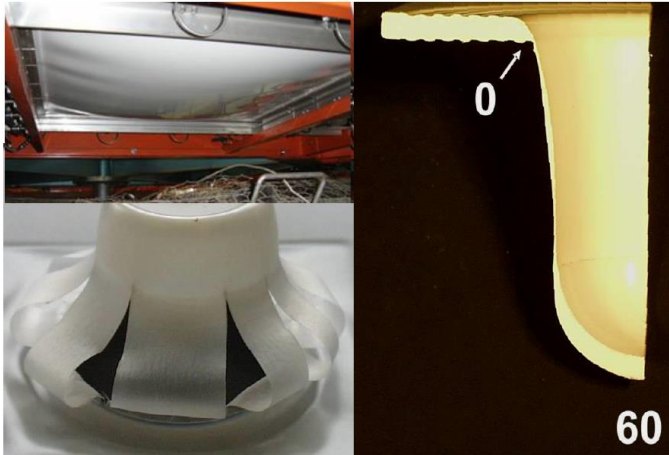
## Einfluss der Halbzeugeigenschaften

Variierende Prozess- und/ oder Halbzeugqualität führen häufig zu folgenden Problemen:

- Inhomogene Deformation



- Faltenbildung
- Durchhang
- Einreißen des Halbzeuges
- geringe Verstreckgrade



### Einige Sonderverfahren

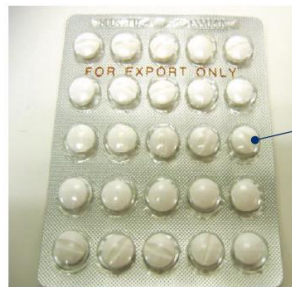
#### Thermoformen als Teilprozess

Zudem existieren komplexe Verpackungsmaschinen, in denen das Thermoformen als Teilprozess integriert ist. Beispiele sind

- Skin- und Blistermaschinen und
- Form-, Füll- und Siegelmaschinen (FFS).



Skin-Verpackung



Blister-Verpackung

Beim Skinverfahren wird die erwärmte Folie über das zu verpackende Gut geformt und kühlt auf dessen Kontur ab.

#### FFS

Form-, Füll- und Siegelmaschinen (FFS) bestehen aus:

- einer Formstation,
- einer Füllstation,
- einer Siegelstation und
- einer Stanzstation.



Das Formteil wird nach dem Thermoformen sofort befüllt, anschließend mit Deckelfolie versiegelt und ausgestanzt.

Anwendungsbeispiele: Multipack für Joghurt, Käseaufschnitt, Zahnbürsten usw.

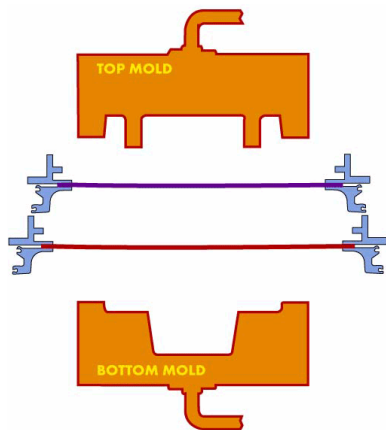
## Twin-Sheet-Verfahren

### Twin-Sheet-Verfahren

- Simultane Erwärmung zweier Halbzeuge (Platten)
- Simultane Negativformung der Halbzeuge
- Verschweißen der Formteile im Randbereich durch Pressen

### Anwendungen

- Hohlkörper (KFZ-Tank, Wischwasserbehälter)
- Lüftungskanäle
- Transporttrays
- ...



## Zusammenfassung

### Möglichkeiten

Das Thermoformen steht gelegentlich in Konkurrenz zum Spritzguss.

Die hier aufgezählten Vor- bzw. Nachteile sind deshalb vorwiegend gegenüber dem Spritzguss zu sehen.

**Vorteile** bei der Herstellung technischer Teile durch Umformen:

- hohe Teilemasse (bis 125 kg) und
- große Formteile (bis 4 m<sup>2</sup>) möglich.
- flexible Wanddicken (0,05 mm – 16 mm).
- kostengünstig bei kleinen Stückzahlen (geringe Werkzeugkosten).
- geringe Änderungskosten, Farbwechselkosten.
- homogene Mehrschichtverbunde möglich.

**Vorteile** der Herstellung von Verpackungsteilen durch Umformen:

- kürzere Taktzeiten.
- Verarbeitung von Halbzeugen.

## **Grenzen**

### **Nachteile:**

- wenig Gestaltungsmöglichkeit (Hinterschnitte, Tiefziehverhältnis begrenzt, keine Rippen, keine Schraubdome, ...).
- keine gleichmäßige Wanddickenverteilung
- schwierige Temperaturführung
- bei vorgegebenem Halbzeug: keine Einflussnahme des Verarbeiters auf die Rezeptur der Folie möglich.

## 9. Einführung Spritzgießen

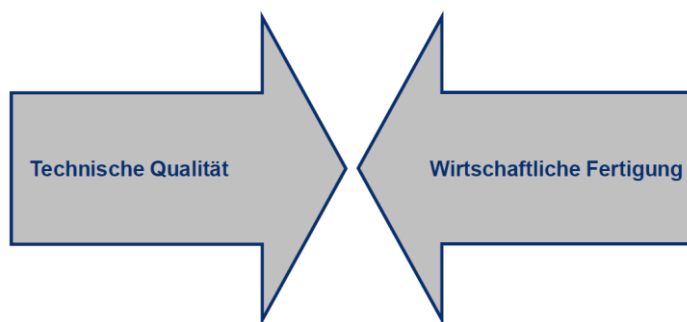
**Lernziele** Nach dieser Veranstaltung sollten Sie ...

- verstehen, wie eine Spritzgießmaschine im Allgemeinen aufgebaut ist,
- die einzelnen Schritte des Spritzgießzyklus verstanden haben,
- ein tieferes Verständnis über die Funktionsweise der Plastifizier- und Einspritzeinheit besitzen,
- die gängigsten Bauformen der Schließeinheit gelernt haben.

### Allgemein

- Serienverfahren zur Herstellung von Kunststoffprodukten benötigen grundsätzlich ein Werkzeug zur Formgebung
- Werkzeuge sind sehr leistungsfähig, so dass mehrere hunderttausend Produkte darauf verschleißarm hergestellt werden können.
- Serienverfahren rechnen sich nur, wenn große Serien, bzw. große Stückzahlen gefertigt werden.
- Werden Thermoplaste verarbeitet, so geschieht dies meistens im Temperaturbereich von ca. 200 bis ca. 300 °C.

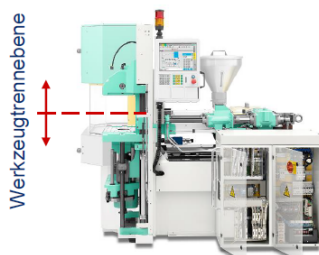
### Forderungen an den Spritzgießprozess



### Aufbau und Komponenten einer Spritzgießmaschine

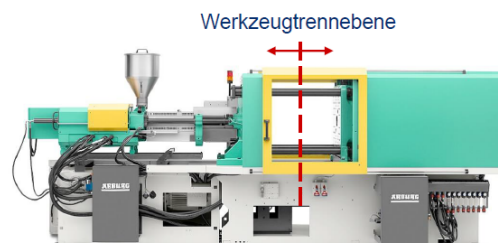
#### Unterscheidung von Spritzgießmaschinentypen nach Schließrichtung

##### Vertikalmaschinen



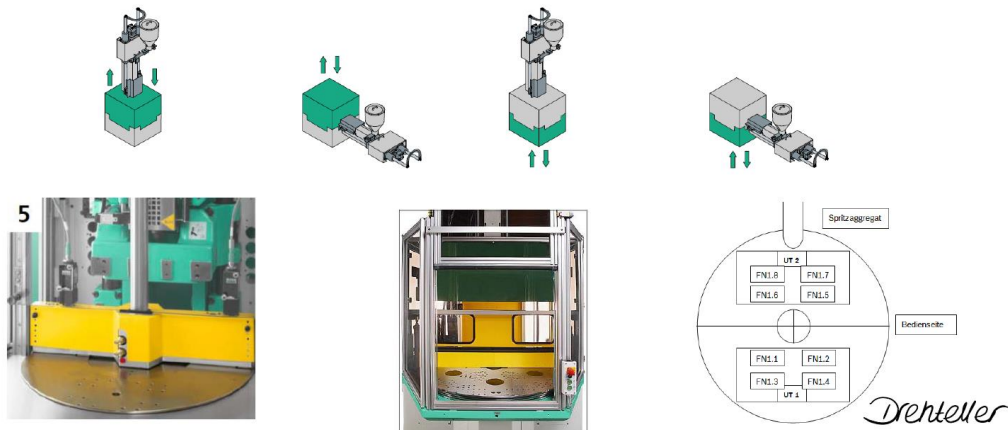
- Horizontale Trennebene
  - besonders gut geeignet für die Herstellung von Formteilen mit **Einlegeteilen**
  - Ausführung mit Rundtisch möglich
  - Zuordnung mehrer Werkzeuge zu einer Plastifiziereinheit
- lange Kühlzeiten realisierbar

##### Horizontalmaschinen

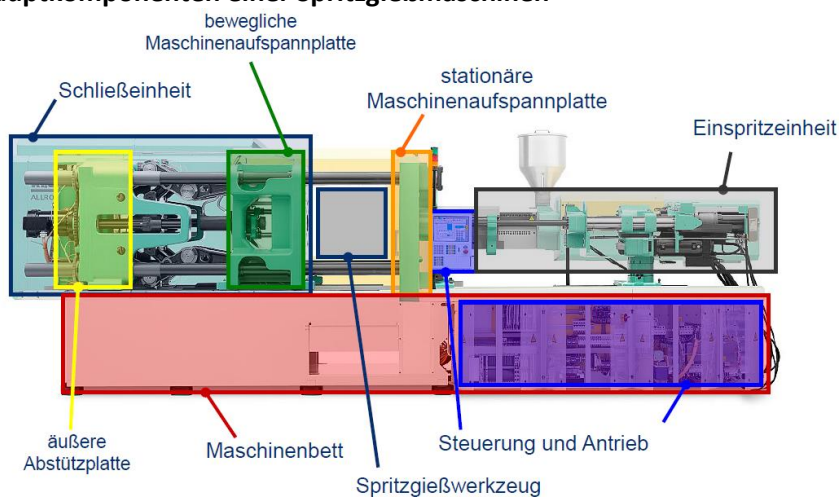


- Vertikale/ senkrechte Trennebene
  - Formteile können aus dem Werkzeug fallen.
  - Gut geeignet für **Massenprodukte!**
- Größten Marktanteil bei der Verarbeitung von Thermoplasten

## Vertikalmaschinen



## Hauptkomponenten einer Spritzgießmaschinen



→ Hauptbewegungsachsen sind die Einspritz- und Schließereinheit

### Maschinenbett

- Aufnahme von Spritzeinheit und Schließseite

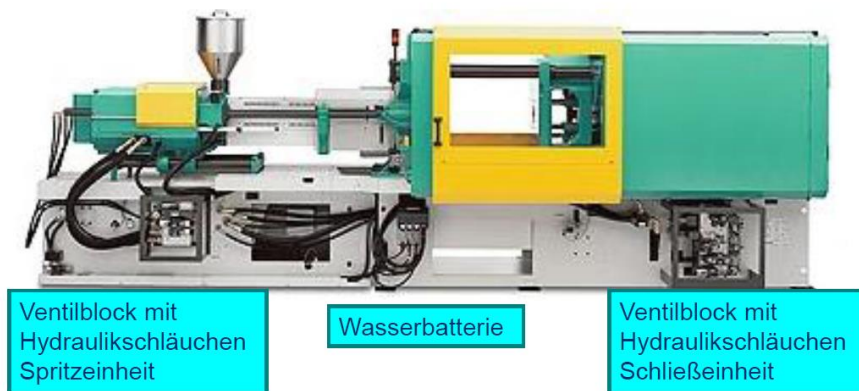
### Antrieb

- Hydraulisch, vollelektrisch oder Hybridtechnik
- *Hydraulische Maschine*: Hydraulikpumpe im Maschinenbett angeordnet;
- Verfahrenbewegungen über Hydraulikzylinder, Schneckenantrieb über Hydromotor
- *Vollelektrische Maschine*: Verfahrenbewegungen mit Servostellmotoren, Schneckenantrieb über Elektromotor

### Steuerung

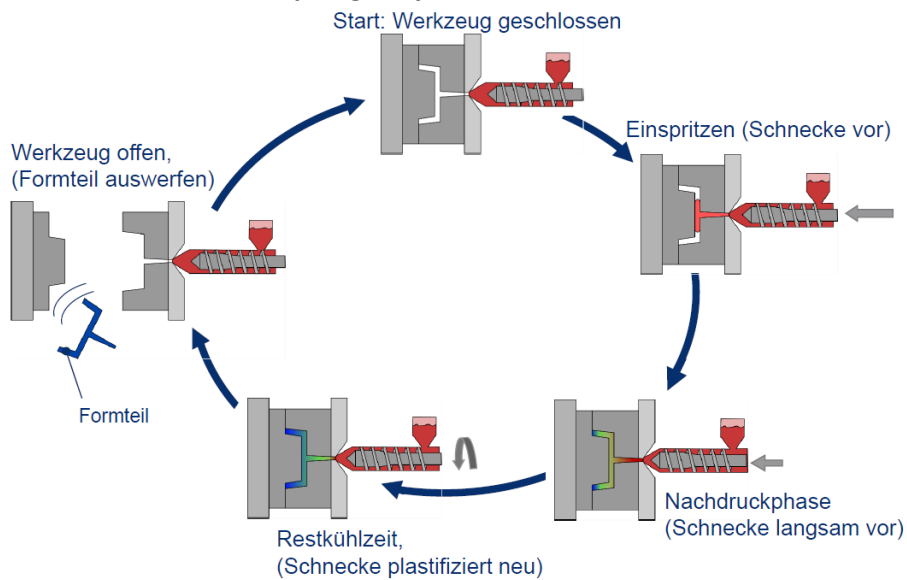
- Steuerung und Regelung sämtlicher Prozessgrößen an der Maschine
- Ansteuerung zusätzlicher Entformungshilfsmittel am Spritzgießwerkzeug (z.B. Kernzüge)
- Steuerung eines Handlingsystems

## Rückseite Spritzgießmaschine

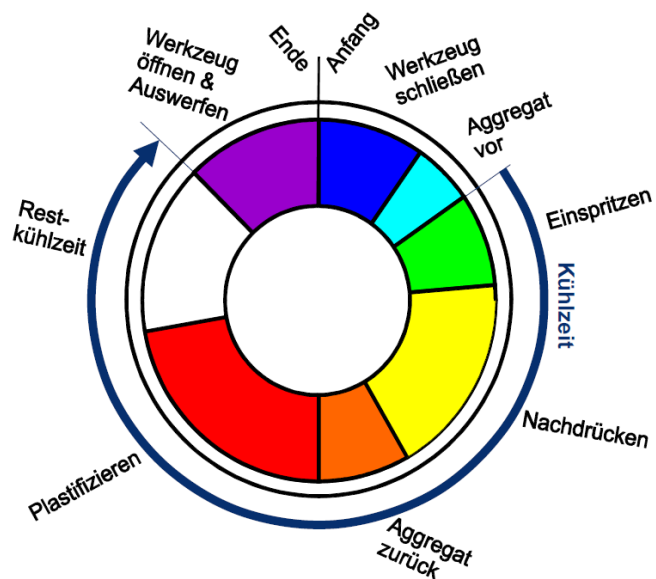


## Zyklusablauf

### Verfahrensablauf eines Spritzgießzyklus



### Zeitlicher Verlauf eines Spritzgießzyklus

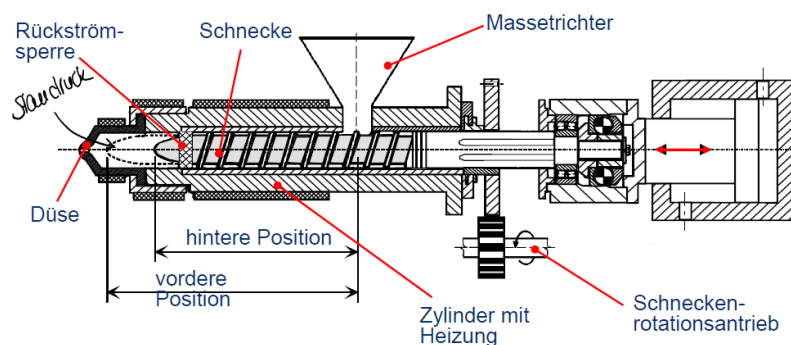


## Plastifizier- und Einspritzeinheit

### Einführung



### Aufbau und Aufgaben



### Aufgaben

- Fördern, aufschmelzen und homogenisieren des Kunststoffs
- Speichern der Kunststoffschmelze
- Einspritzen der Kunststoffschmelze in das Werkzeug
- Nachdrücken zur Schwindungskompensation des Formteils

### Anforderungen und Ablauf

- In der Einspritzphase wird das Werkzeug mit der Schmelze gefüllt!
- Das Einspritzen wird durch wegereguliertes axiales Verschieben der Schnecke im Plastifizierzylinder erreicht.
- Die Rückstromsperre verhindert ein Zurückfließen der Schmelze beim Einspritzen in die Schneckengänge.
- Die relativ hohe Viskosität des Kunststoffs erfordert hohe Drücke beim Füllen der Kavität!
- Die niedrige Wärmeleitfähigkeit erlaubt ein Fließen der heißen Schmelze im „kalten“ Werkzeug, bevor sie in der endgültigen Position erstarrt.
- Schon mit Beginn des Einspritzens beginnt die Kühlzeit!

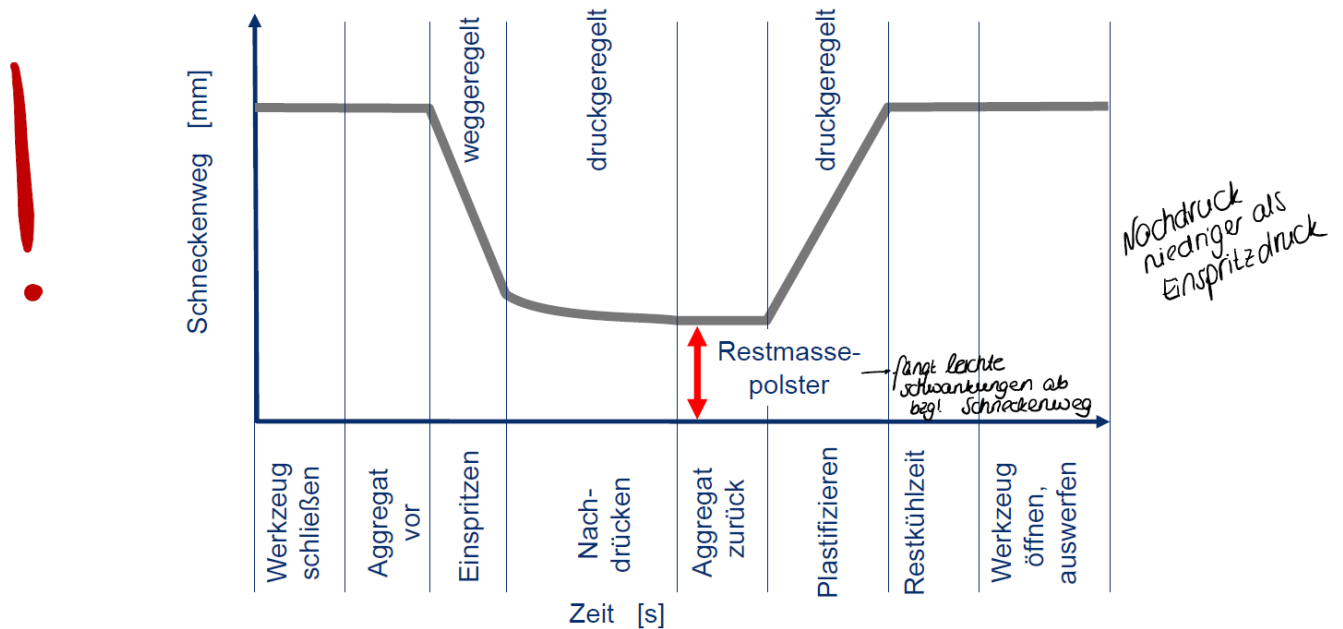
### Ablauf

- Wenn der Anguss eingefroren ist (Siegelzeitpunkt), ist die Nachdruckzeit beendet!
- Das Spritzaggregat wird von der Angussbuchse zurückgefahren (Wärmetrennung).
- Eine Verschlussdüse verhindert das Ausströmen der Schmelze aus dem Plastifizieraggregat.
- Zum Plastifizieren des Kunststoffes für den nächsten Schuss rotiert die Schnecke. Zugleich wirkt der Staudruck in axialer Richtung.

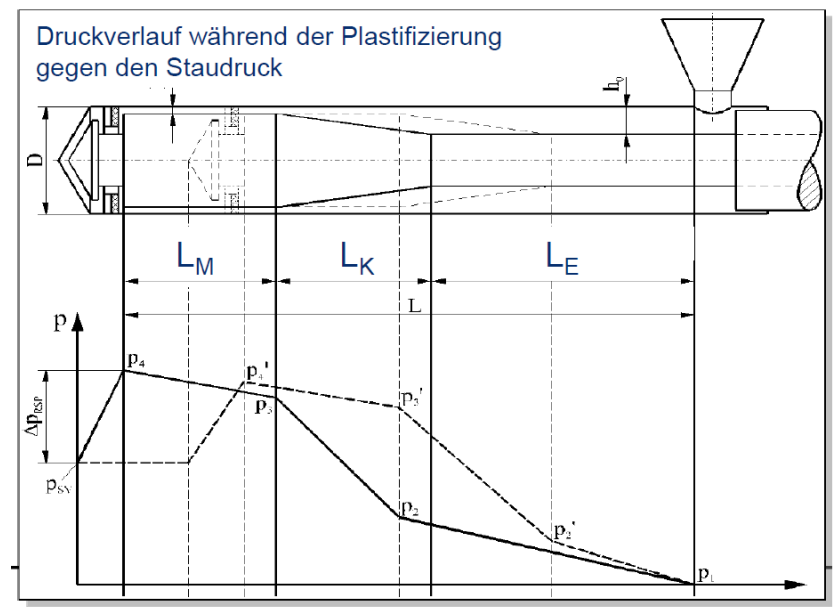


- Durch das Fördern der Kunststoffschmelze in den Schneckenorraum wird die Schnecke gegen den Staudruck zurückgeschoben.
- Bei Erreichen eines vorgegebenen Schneckenweges ist die Plastifizierungsphase beendet. Es liegt ausreichend Schmelze für den nächsten Schuss im Schneckenorraum.

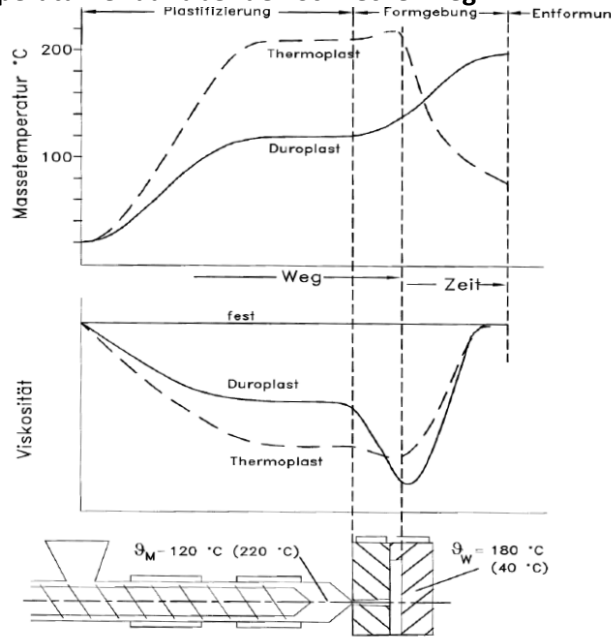
### Zeitlicher Verlauf des Schneckenweges über der Zykluszeit



### Druckverlauf während der Plastifizierung



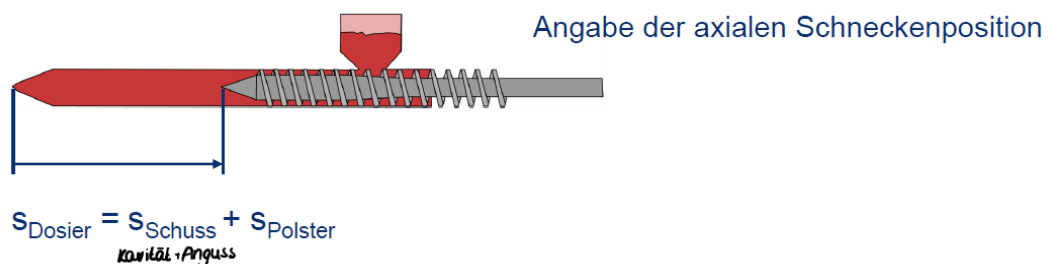
## Temperaturverlauf über den Schneckenweg



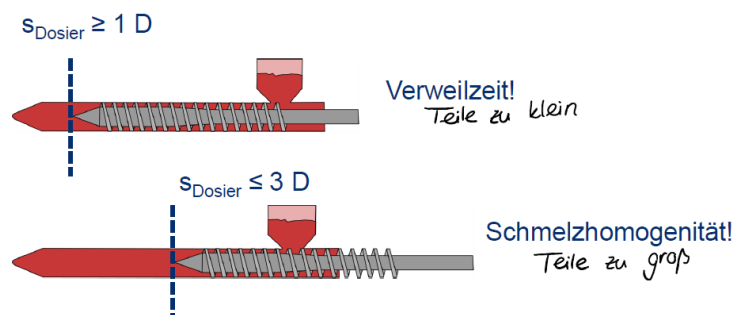
Temperaturführung und mittlere Viskosität bei der Spritzgussverarbeitung von reagierenden Massen im Vergleich zu Thermoplasten (schematisch); Klammerwerte gelten für Thermoplaste wie z.B. PS

## Hubvolumen von Plastifizieraggregaten

- Dosierweg (Dosiervolumen)



- Die Größe des Plastifizieraggregates sollte auf das Bauteil abgestimmt sein
- Bei einem Dosierweg (Hubvolumen) ab 3D ist eine deutliche Qualitätsabnahme zu verzeichnen und der spezifische Durchsatz nimmt ab!



- $1D \leq S_{\text{Dosier}} \leq 3 D$
- Umrechnung von Volumen auf Weg

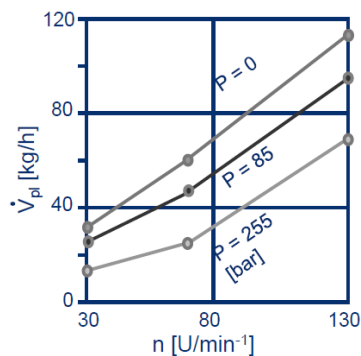
| Hub<br>[mm],<br>Geschw.<br>[mm/s] | Um-<br>schalt-<br>weg<br>[mm] | Hubvolumen [cm <sup>3</sup> ] bzw. Volumenstrom [cm <sup>3</sup> /s] bei Schneckendurchmesser [mm] |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |       |
|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
|                                   |                               | 18                                                                                                 | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    | 60    | 70    | 80    | 85    | 90     | 95     | 100    | 105    | 110   |
| 2                                 | 10,1                          | 0,5                                                                                                | 1,0   | 1,4   | 1,9   | 2,5   | 3,2   | 3,9   | 5,7   | 7,7   | 10,1  | 11,3  | 12,7   | 14,2   | 15,7   | 17,3   | 19,0  |
| 4                                 | 10,2                          | 1,0                                                                                                | 2,0   | 2,8   | 3,8   | 5,0   | 6,4   | 7,9   | 11,3  | 15,4  | 20,1  | 22,7  | 25,4   | 28,4   | 31,4   | 34,6   | 38,0  |
| 6                                 | 10,3                          | 1,5                                                                                                | 2,9   | 4,2   | 5,8   | 7,5   | 9,5   | 11,8  | 17,0  | 23,1  | 30,2  | 34,0  | 38,2   | 42,5   | 47,1   | 52,0   | 57,0  |
| 8                                 | 10,4                          | 2,0                                                                                                | 3,9   | 5,7   | 7,7   | 10,1  | 12,7  | 15,7  | 22,6  | 30,8  | 40,2  | 45,4  | 50,9   | 56,7   | 62,8   | 69,3   | 76,0  |
| 10                                | 10,5                          | 2,5                                                                                                | 4,9   | 7,1   | 9,6   | 12,6  | 15,9  | 19,6  | 28,3  | 38,5  | 50,3  | 56,7  | 63,6   | 70,9   | 78,5   | 86,6   | 95,0  |
| 15                                | 10,8                          | 3,8                                                                                                | 7,4   | 10,6  | 14,4  | 18,8  | 23,9  | 29,5  | 42,4  | 57,7  | 75,4  | 85,1  | 95,4   | 106,3  | 117,8  | 129,9  | 142,5 |
| 20                                | 11,0                          | 5,1                                                                                                | 9,8   | 14,1  | 19,2  | 25,1  | 31,8  | 39,3  | 56,5  | 77,0  | 100,5 | 113,5 | 127,2  | 141,8  | 157,1  | 173,2  | 190,1 |
| 25                                | 11,3                          | 6,4                                                                                                | 12,3  | 17,7  | 24,1  | 31,4  | 39,8  | 49,1  | 70,7  | 96,2  | 125,7 | 141,9 | 159,0  | 177,2  | 196,3  | 216,5  | 237,6 |
| 30                                | 11,5                          | 7,6                                                                                                | 14,7  | 21,2  | 28,9  | 37,7  | 47,7  | 58,9  | 84,8  | 115,5 | 150,8 |       |        |        |        |        |       |
| 35                                | 11,8                          | 8,9                                                                                                | 17,2  | 24,7  | 33,7  | 44,0  | 55,7  | 68,7  | 99,0  | 134,7 | 175,9 |       |        |        |        |        |       |
| 40                                | 12,0                          | 10,2                                                                                               | 19,6  | 28,3  | 38,5  | 50,3  | 63,6  | 78,5  | 113,1 | 153,9 | 201,1 | 227,0 | 254,5  | 283,5  | 314,2  | 346,4  | 380,1 |
| 45                                | 12,3                          | 11,5                                                                                               | 22,1  | 31,8  | 43,3  | 56,5  | 71,6  | 88,4  | 127,2 | 173,2 | 226,2 | 255,4 | 286,3  | 319,0  | 353,4  | 389,7  | 427,6 |
| 50                                | 12,5                          | 12,7                                                                                               | 24,5  | 35,3  | 48,1  | 62,8  | 79,5  | 98,2  | 141,4 | 192,4 | 251,3 | 283,7 | 318,1  | 354,4  | 392,7  | 433,0  | 475,2 |
| 55                                | 12,8                          | 14,0                                                                                               | 27,0  | 38,9  | 52,9  | 69,1  | 87,5  | 108,0 | 155,5 | 211,7 | 276,5 | 312,1 | 349,9  | 389,9  | 432,0  | 476,2  | 522,7 |
| 60                                | 13,0                          | 15,3                                                                                               | 29,5  | 42,4  | 57,7  | 75,4  | 95,4  | 117,8 | 169,6 | 230,9 | 301,6 | 340,5 | 381,7  | 425,3  | 471,2  | 519,5  | 570,2 |
| 65                                | 13,3                          | 16,5                                                                                               | 31,9  | 45,9  | 62,5  | 81,7  | 103,4 | 127,6 | 183,8 | 250,1 | 326,7 | 368,8 | 413,5  | 460,7  | 510,5  | 562,8  | 617,7 |
| 70                                | 13,5                          | 17,8                                                                                               | 34,4  | 49,5  | 67,3  | 88,0  | 111,3 | 137,4 | 197,9 | 269,4 | 351,9 | 397,2 | 445,3  | 496,2  | 549,8  | 606,1  | 665,2 |
| 75                                | 13,8                          | 19,1                                                                                               | 36,8  | 53,0  | 72,2  | 94,2  | 119,3 | 147,3 | 212,1 | 288,6 | 377,0 | 425,6 | 477,1  | 531,6  | 589,0  | 649,4  | 712,7 |
| 80                                | 14,0                          | 20,4                                                                                               | 39,3  | 56,5  | 77,0  | 100,5 | 127,2 | 157,1 | 226,2 | 307,9 | 402,1 | 454,0 | 508,9  | 567,1  | 628,3  | 692,7  | 760,3 |
| 85                                | 14,3                          | 21,6                                                                                               | 41,7  | 60,1  | 81,8  | 106,8 | 135,2 | 166,9 | 240,3 | 327,1 | 427,3 | 482,3 | 540,7  | 602,5  | 667,6  | 736,0  | 807,8 |
| 90                                | 14,5                          | 22,9                                                                                               | 44,2  | 63,6  | 86,6  | 113,1 | 143,1 | 176,7 | 254,5 | 346,4 | 452,4 | 510,7 | 572,6  | 637,9  | 706,9  | 779,3  | 855,3 |
| 95                                | 14,8                          | 46,6                                                                                               | 67,2  | 91,4  | 119,4 | 151,1 | 186,5 | 268,6 | 365,6 | 477,5 | 539,1 | 604,4 | 673,4  | 746,1  | 822,6  | 902,8  |       |
| 100                               | 15,0                          | 49,1                                                                                               | 70,7  | 96,2  | 125,7 | 159,0 | 196,3 | 282,7 | 384,8 | 502,7 | 567,5 | 636,2 | 708,8  | 785,4  | 865,9  | 950,3  |       |
| 110                               | 15,5                          | 54,0                                                                                               | 77,8  | 105,8 | 138,2 | 174,9 | 216,0 | 311,0 | 423,3 | 552,9 | 624,2 | 699,8 | 779,7  | 863,9  | 952,5  | 1045,4 |       |
| 120                               | 16,0                          | 58,9                                                                                               | 84,8  | 115,5 | 150,8 | 190,9 | 235,6 | 339,3 | 461,8 | 603,2 | 680,9 | 763,4 | 850,6  | 942,5  | 1039,1 | 1140,4 |       |
| 130                               | 16,5                          | 63,8                                                                                               | 91,9  | 126,1 | 163,4 | 206,8 | 255,3 | 367,6 | 500,3 | 653,5 | 737,7 | 827,0 | 921,5  | 1021,0 | 1125,7 | 1235,4 |       |
| 140                               | 17,0                          | 68,7                                                                                               | 98,8  | 137,2 | 179,5 | 222,7 | 274,9 | 395,8 | 538,8 | 703,7 | 794,4 | 890,6 | 992,4  | 1099,6 | 1212,3 | 1330,5 |       |
| 150                               | 17,5                          | 73,6                                                                                               | 105,9 | 148,3 | 195,6 | 243,6 | 299,0 | 427,1 | 577,3 | 754,0 | 851,3 | 954,3 | 1063,7 | 1178,1 | 1298,9 | 1425,5 |       |

Hub ≤ 1 D

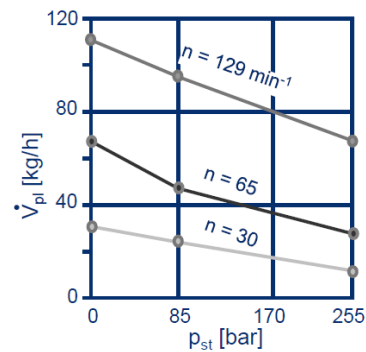
Hub ≥ 3 D

## Plastifizierleistung

- Als die (effektive) Plastifizierleistung  $\dot{V}_{pl}$  einer Plastifiziereinheit wird die in einem Arbeitszyklus hergestellte Menge warmplastischen Materials bezeichnet.
- Eine entsprechende Plastifikatqualität wird vorausgesetzt!!



Plastifizierleistung als Funktion der Schneckendrehzahl (Scherparameter: Staudruck); D = 58 mm, PS.



Plastifizierleistung als Funktion der Schneckendrehzahl (Scherparameter: Schneckendrehzahl n); D = 58 mm, PS.

- Eine Erhöhung des Staudruckes bewirkt einen Rückgang der Plastifizierleistung bei gleichzeitiger Erhöhung der Schmelzehomogenität.
- Die Plastifizierleistung verhält sich aufgrund der individuellen Strukturviskosität des verarbeiteten Polymers nichtlinear.
- In der Praxis wird die Plastifizierzeit auf den Zyklus angepasst. Bei der Herstellung von technischen Bauteilen ist in der Regel genügend Zeit während der Kühlphase um materialschonend zu plastifizieren.

## Komponenten von Plastifizier- und Einspritzaggregaten

Die Schnecke ist das Kernstück einer Plastifiziereinheit.



Ähnliche Erscheinung wie eine Extruderschnecke eines Einschneckenextruders.

### Anforderungen an Plastifizierschnecken

- Hohe Durchsatzleistung,
- gute thermische Schmelzeshomogenität,
- ausreichende Mischwirkung für z.B. eingefärbte Rohstoffe,
- konstante Materialförderung über den gesamten Schneckenhub,
- guter Einzug auch von z.B. Mahlgut,
- nicht zu hohe thermische Belastung,
- möglichst breiter Einsatzbereich, um Umbauarbeiten zu minimieren.

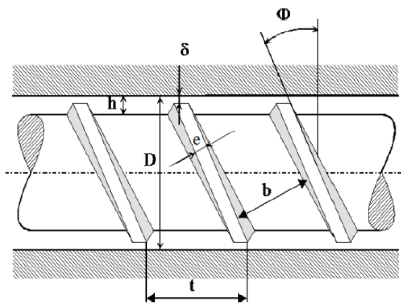
Die Zykluszeit wird durch die Kühlzeit bestimmt, jedoch gibt es heute auch immer mehr Prozesse bei denen die Plastifizierzeit die Zykluszeit bestimmt!

Mögliche Abhilfen:

- größere Plastifiziereinheiten,
- höhere Schneckendrehzahlen.

### Schnecken-Geometrieparameter

Geometrieparameter einer Plastifizierschnecke



D: Schneckendurchmesser  
d: Kerndurchmesser  
 $\delta$ : radiales Schneckenspiel  
H: Steghöhe (Gangtiefe)

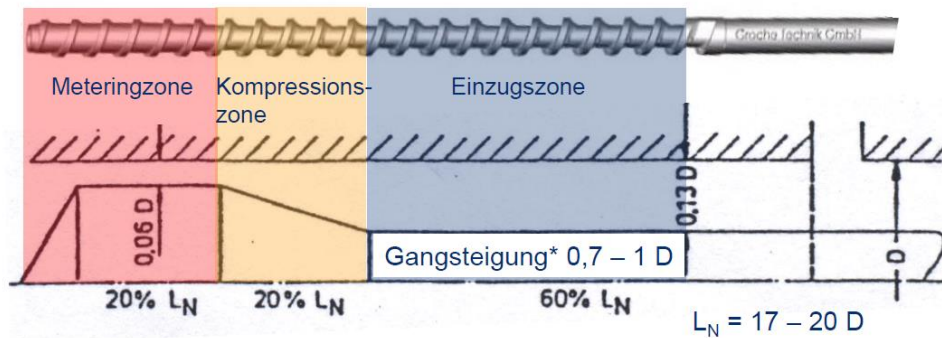
t: Gangsteigung  
e: Stegbreite  
b: Gangbreite  
 $\varphi$ : Gangsteigungswinkel

Die Gesamtlänge der Schnecke im Verhältnis zum Durchmesser ist ein sehr wichtiger Parameter. Man spricht hierbei vom **L/D** Verhältnis.

### Plastifizierschneckentypen

Meist verwendeter Schneckentyp beim Spritzgießen ist die Drei-Zonen-Standard Schnecke, da eine breite Materialpalette auf einer Maschine verarbeitet werden kann.

Es gibt jedoch für viele verarbeitungstechnische Besonderheiten eine spezielle Schnecke, mit welcher sich die Durchsätze auf Kosten der Materialflexibilität steigern lässt.

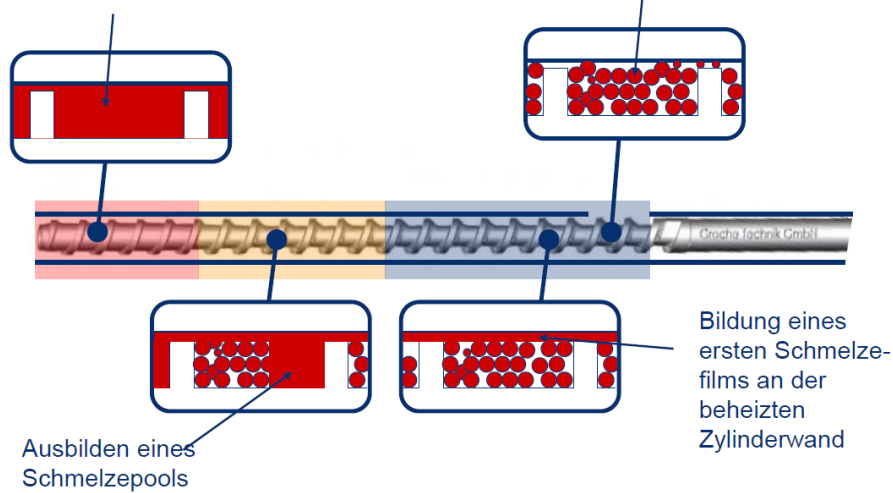


\*) kleine Gangsteigungswerte werden mit den kurzen Schneckenlängen  $L_N$  kombiniert

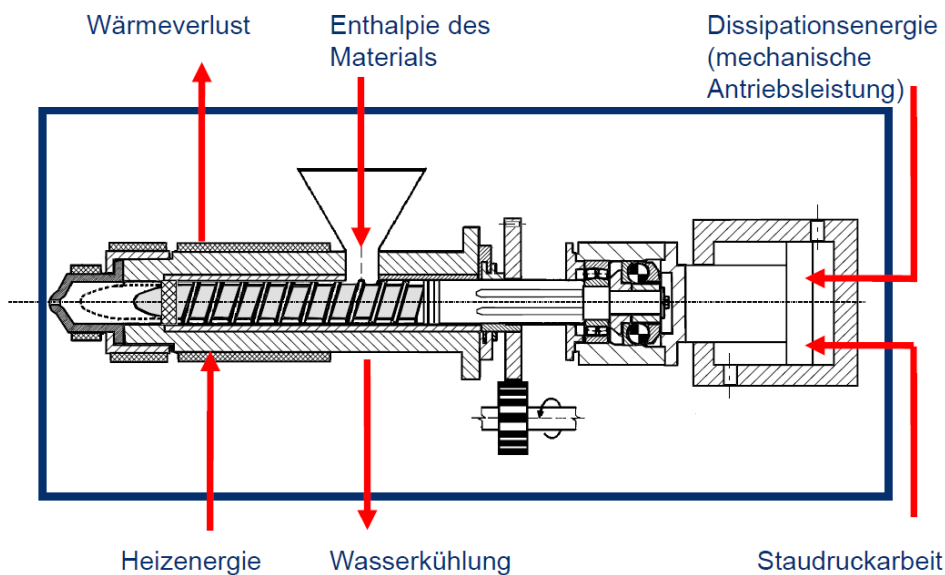
### Aufschmelzvorgang in Drei-Zonen-Schnecke

Vollständig plastifiziertes Material, Schmelzeströmung

Rohstoff liegt als Feststoff vor



### Enthalpiebilanz



### Plastifizierzeit

- Die Plastifizierzeit ist von vielen Faktoren, wie Drehzahl, Staudruck, Schneckenengeometrie etc. abhängig.

- In der Praxis werden Parameter wie z.B. Drehzahl und Staudruck an der Maschine eingestellt. Die Plastifizierzeit ergibt sich aufgrund dieser Parameter und ist nicht direkt einstellbar  
Mittlere Schneckenrücklaufgeschwindigkeit:

$$\bar{v}_s = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad \begin{array}{l} D = \text{Schneckendurchmesser} \\ V = \text{Durchsatz} \end{array}$$

- Da der Schneckendurchmesser konstant ist, wird die mittlere Schneckenrücklaufgeschwindigkeit nur vom Durchsatz bestimmt

### Plastifizierschneckentypen nach Werkstoff

Verarbeitung von PS, PE und PP zu Verpackungsteilen:

- Verpackungen → dünnwandige Teile → kurze Zykluszeit
- kurze Zykluszeiten erfordern hohe Plastifizierleistung: - längere Schnecken bis zu 26D - besondere Geometrie zur Materialschonung bei hohen Schneckendrehzahlen

Verarbeitung von PA, PBT, POM, PET:

- relativ flach geschnittene Schneckenkanäle
- geringere Scherung, damit geringere scherinduzierte Temperaturgradienten

Verarbeitung von PMMA, ABS und CA:

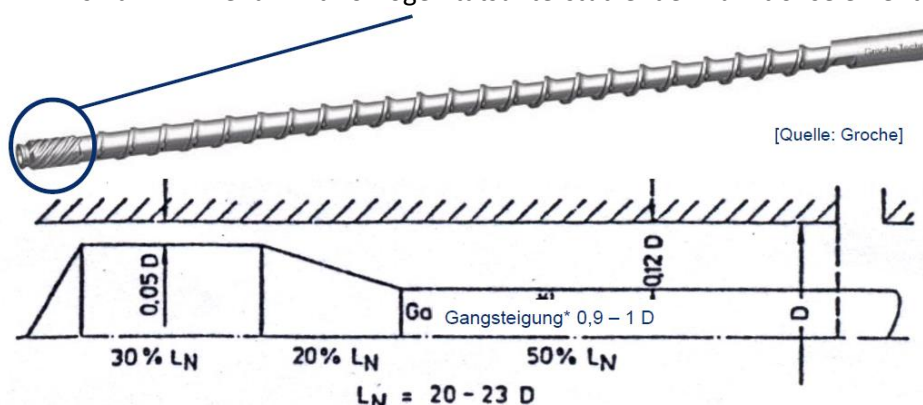
- Entgasen von Wasseranteilen bei hydrophilen Kunststoffen
- Nachteil: Ablagerungen von Abbauprodukten im Entgasungsbereich können im Bauteil sichtbar sein

→ Bei großen Losgrößen kann sich eine Optimierung der Schnecken geometrie auf das spezifische Material lohnen!

### Hochleistungsschnecken

Hochleistungsschnecken...

- sind besonders zur PE- und PS-Verarbeitung für hohe Umfangsgeschwindigkeiten ausgelegt
- erzielen bei maximalem Durchsatz eine ausreichende Schmelzehomogenität
- haben meist ein L/D-Verhältnis von 20-23
- sind im Einzelfall mit homogenitätsunterstützenden Funktionselementen ausgestattet



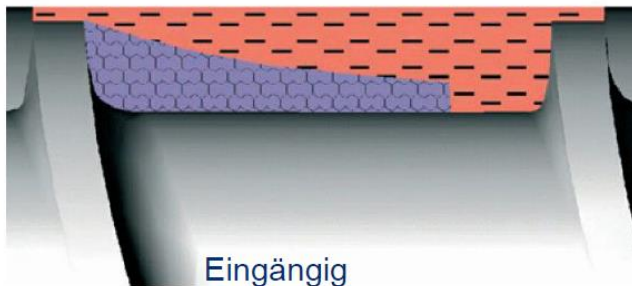
\*) kleine Gangsteigungswerte werden mit den kurzen Schneckenlängen  $L_N$  kombiniert

### Mehrgängige Schnecken

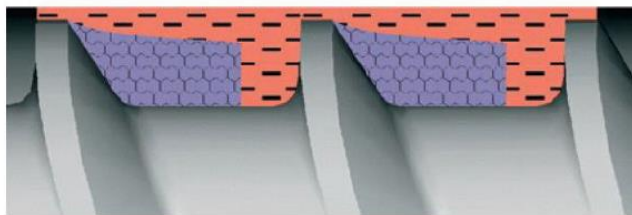
Der Wärmeübergang vom Zylinder in den Feststoff verhält sich umgekehrt proportional zur Schmelzefilmdicke. Mehrgängige Schnecken verteilen den Schmelzefilm auf mehrere Gänge und daher ist er dünner.

- Die Plastifizierleistung wird deutlich erhöht,

- die Dissipation im Schmelzefilm erhöht sich,
- besonders gut geeignet für Materialien mit schlechter Wärmeleitfähigkeit (z.B. PP)
- bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten kann es bedingt durch den geringeren Einsrieselquerschnitt zur Teilfüllung und somit zu Luft-einschlüssen kommen



Eingängig



Mehrgängig

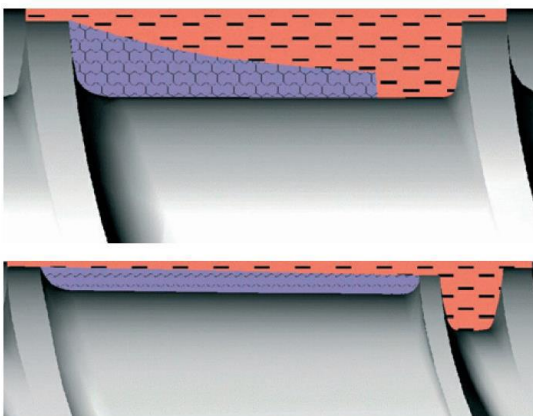
[Quelle: Kunststoffe]

### Barrierschnecke

Durch den sogenannten Barrieresteg wird das aufgeschmolzene Material vom Feststoff separiert. Es wird vermieden, dass die Zunahme des Schmelzepools auf der aktiven Stegflanke die Kontaktfläche zwischen Feststoff und Zylinderwand behindert.

- Geringe Scherbeanspruchung der Schmelze,
- Die Plastifizierleistung wird deutlich erhöht,
- die Dissipation im Schmelzefilm erhöht sich.

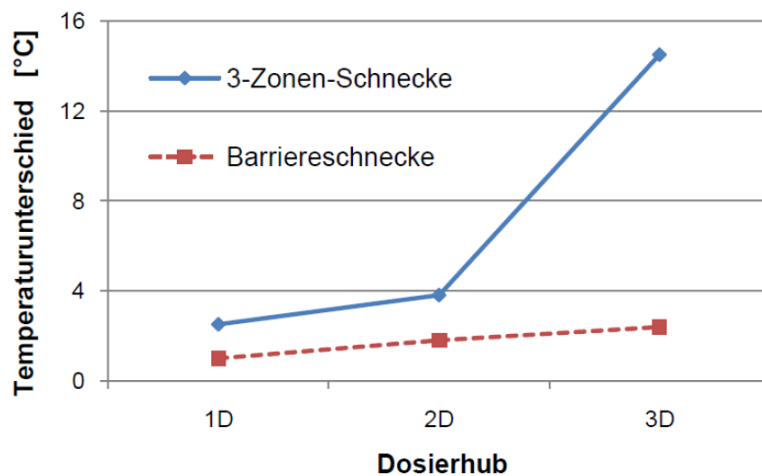
Eine neue Entwicklung bedient sich beider Vorteile und kombiniert diese neue Technik mit einer genuteten Einzugszone. Mit dieser Technik lässt sich teilweise die Plastifizierleistung um 50 % erhöhen!





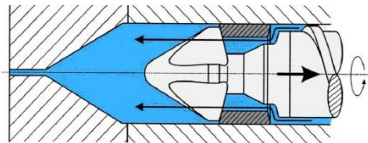
## Vergleich der Homogenität des Plastifikats

Der Temperaturunterschied innerhalb einer Schmelze in Abhängigkeit vom Dosierhub

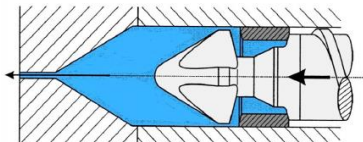


## Rückstromsperre

- Die Rückstromsperre soll verhindern, dass trotz des hohen Drucks (bis ~2500 bar) während des Einspritzens und Nachdrückens Schmelze zurück in die Schneckengänge gedrückt wird; sie muss geschlossen sein.
- Während des Dosiervorgangs hingegen muss die Schmelze möglichst ungestört in den Schneckenraum gelangen, die Rückstromsperre muss sich öffnen.

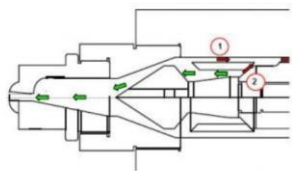
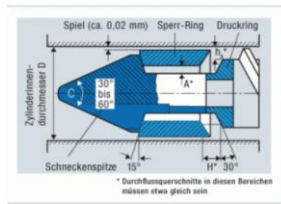


Ringrückstromsperre ist während des Dosierens geöffnet

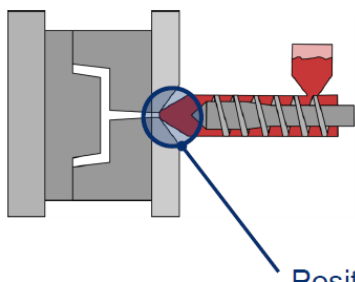


Durch die schnelle Vorwärtsbewegung und den hohen Druck im Schneckenraum wird die Rückstromsperre während des Einspritzens geschlossen





## Einspritzdüse



Position der Maschinen-Düse

- Verbindung zwischen Plastifizierzylinder und Werkzeug
- Ausgleich des Durchmesserunterschiedes zwischen Spritzzylinder und Angusskanal
- Dichtung zwischen den Spritzzylinder und Werkzeug
- Düsenanpresskraft bis  $120 \text{ N/mm}^2$  (1200 bar)
- ➔ Stähle für Düse und Angussbuchse mit Festigkeiten bis  $120\text{-}140 \text{ N/mm}^2$  (vergütete Stähle)

## Aufgaben von Einspritzdüsen/Maschinendüse

- Die im Schneckenraum gespeicherte Schmelze wird durch die Düse in das Werkzeug eingespritzt. Außerhalb der Einspritzphase und insbesondere in der Plastifizierphase soll kein Material aus der Düse austreten.
- Plastifizieren mit am Werkzeug anliegender Düse, nach dem Plastifizieren hebt die Einspritzeinheit vom Werkzeug ab, um das Werkzeug nicht weiter zu erwärmen.

## Ausführungsformen:

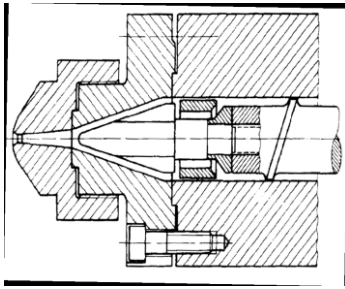
- Offene Düse
- Verschlussdüse

## Offene Einspritzdüse

- Für hochviskose und temperaturempfindliche Kunststoffe (PVC, PC)
- Düsenbohrung 3-8 mm (bis 15 mm bei großen Maschinen)

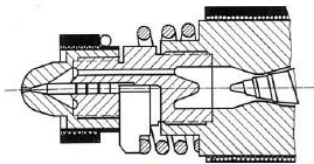
## Vorteil:

- Glatte Bohrung ➔ leicht zu reinigen und zu spülen, strömungstechnisch günstig, geringe Gefahr der thermischen Zersetzung

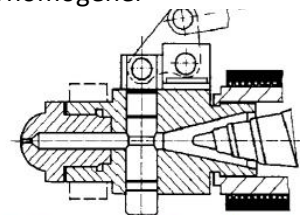


### Verschlussdüsen

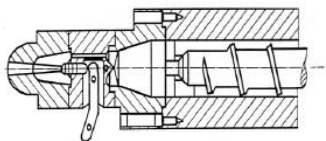
- Für niedrigviskose Schmelzen (z.B. PA)
- Dosieren kann auch nach Wegfahren der Plastifiziereinheit (Düse) von der Angussbuchse erfolgen.
- weniger Wärmeübertragung zum Werkzeug, das bedeutet:
- Energieeinsparung und die Werkzeuge sind temperaturhomogener



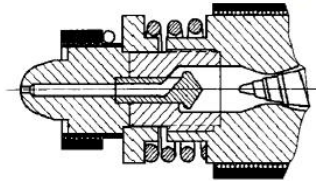
Nadelverschlussdüse (federbelastet)



Bolzenverschlussdüse (fremdbetätigt)



Nadelverschlussdüse (fremdbetätigt)



Schieberverschlussdüse (federbetätigt)

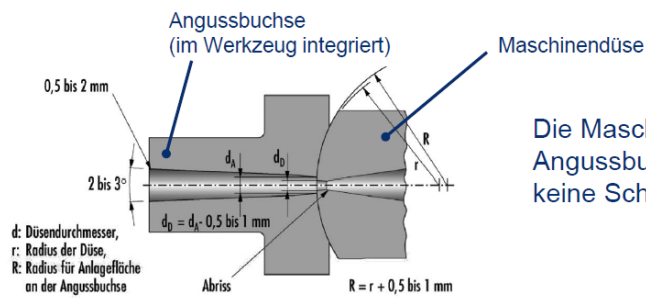
### Nadelverschlussdüse:

- Besteht aus Düseninnenkörper und Nadel
- Der Spritzdruck und Nachdruck müssen multipliziert mit der projizierten konischen Fläche größer sein als die Federkraft (welche die Nadel andrückt)
- Düse ist beheizt
- Die eingefrorene Partie an der Düsen Spitze wird beim Wegfahren der Plastifiziereinheit aus der Düse gezogen und mit dem Anguss entfernt

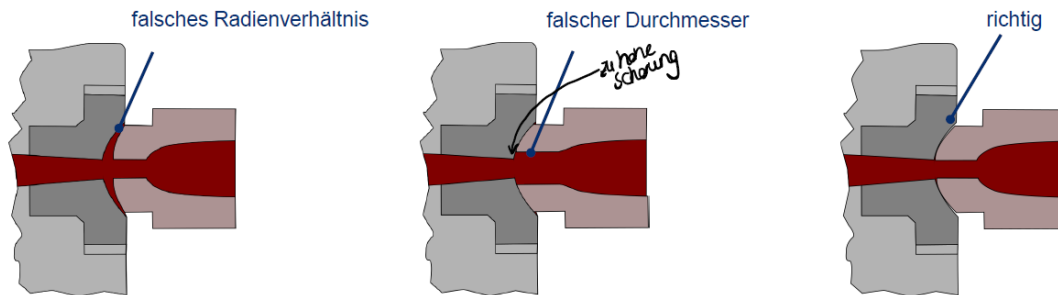
### Schieberverschlussdüse:

- Besteht aus Schieber mit Düsenkanal und Einströmöffnung, Düsenkörper und Feder
- Vorteil: beliebiger Staudruck und preisgünstiger
- Nachteil: tote Ecken und Winkel
- Gefahr der thermischen Schädigung des Materials

## Anpassung der Maschinendüse an die Angussbuchse



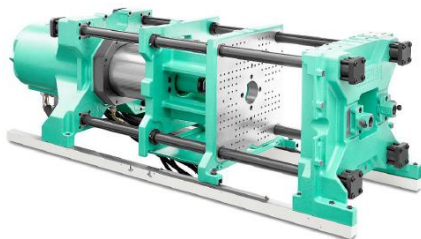
Die Maschinendüsen Spitze muss der Angussbuchse angepasst werden, damit keine Schmelze austritt.



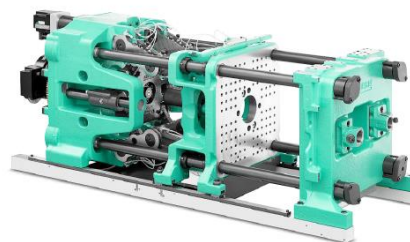
## Schließeinheit

### Hauptbewegungsachse

#### Vollhydraulische Schließeinheit



#### Schließeinheit mit Kniehebel (elektrisch oder hydraulisch)



### Aufgaben der Schließeinheit

- Aufnahme des geteilten Werkzeuges und dessen Zuhaltung gegen den Fülldruck und Nachdruck der eingespritzten Formmasse
- Ausführung der Öffnungs- und Schließbewegung des Werkzeuges zur Entfernung des Spritzlings

### Schließvorgang

Zwei aufeinanderfolgende Bewegungsphasen

- Schließbewegung  
Großer Weg in kurzer Zeit, bis zum drucklosen Berühren der Werkzeughälften mit geringer Kraft
- Schließkrafterzeugung  
Große Kraft über einen kurzen Weg Dehnung der Holme, Biegung und Stauchung der Aufspannplatte

Schließbewegung: mechanisch oder hydraulisch

Erzeugung der Schließkraft: mechanisch oder hydraulisch

→ Mechanischer Antrieb (meist Kniehebel) ist hydraulisch und elektrisch möglich

## Schließsysteme

### Kniehebelschließeinheit

#### Vorteile:

- Besonders günstige Kinematik
- Zunächst schnelles Schließen bei geringer Kraft
- Dann langsames Schließen bei großer Kraft

Durch langsames Schließen und Öffnen der Form werden Werkzeug und Maschine geschont.

#### Nachteile:

- Schlechtere Reproduzierbarkeit der Schließkrafteinstellung → Qualität!
- Gefahr der Überdehnung der Holme
- Sprungwirkung beim Lösen aus der Strecklage → Gelenkbelastung
- Einseitiger Verschleiß während der Schließkrafterzeugung

Werkzeug geöffnet



Schließbewegung



Werkzeug nahezu geschlossen



### Vollhydraulische Schließeinheit

#### Vorteile:

- Exakte Reproduzierbarkeit der Schließkraft -> reproduzierbare Formteilqualität
- Keine Überdehnung der Holme
- Kein nennenswerter Verschleiß

#### Nachteile:

- Steuerung „langsam – schnell – langsam“ erforderlich, beim Schließen und Öffnen sind große Ölmengen erforderlich.
- Verbesserung durch kleinere Zylinderflächen für Bewegungsvorgang
- Größere Zylinderflächen für Kraftaufbringung -> geringere Ölmengen

### Bestimmung der benötigten Schließkraft

Kenngößen einer Schließeinheit

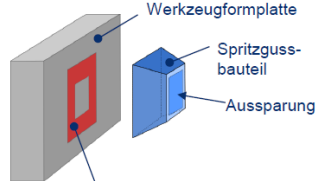
Die vom Schließsystem beeinflussbaren Größen einer Schließeinheit sind:

- Die Formschließ- und Zuhaltekraft und Formöffnungskraft
- Die Formschließ- und Formöffnungsgeschwindigkeit
- Der Formöffnungsweg

## Berechnung der benötigten Schließkraft/ Zuhaltkraft

Beispiel:

$$\text{Werkzeugaufreibkraft} = \frac{\text{projizierte Fläche [cm}^2\text{]} \times \text{mittlerer Werkzeuginnendruck [bar]}}{100}$$



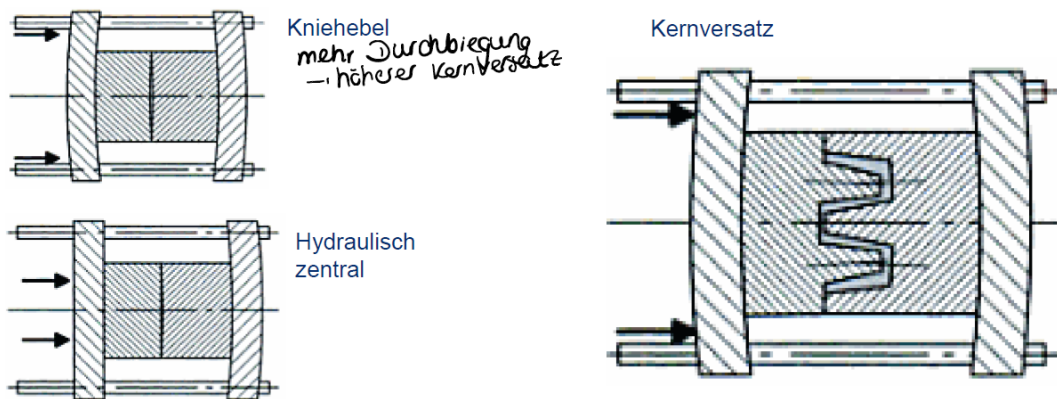
Zuhaltkraft  $\geq$  Werkzeugaufreibkraft [kN]  
 Faustformel: Zuhaltkraft = 1,2 x Werkzeugaufreibkraft

bei:  
 $P_E = 800 \text{ bar}$   
 $A = 50 \text{ cm}^2$  → min: 400 kN Zuhaltkraft

projizierte Fläche = Summe aller auf die Ebene der Aufspannplatten projizierten druckbeaufschlagten Formteillflächen

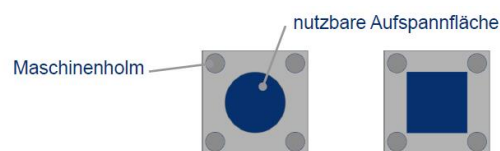
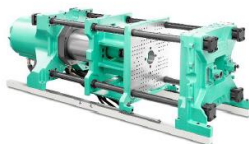
## Plattendurchbiegung/Kernversatz

Die hohe Zuhaltkraft führt zu Deformation der Aufspannplatten und des Werkzeuges und über die Lebensdauer zu Verschleiß am Werkzeug. Die maximale Plattendurchbiegung liegt zwischen 0,05-0,3 mm.

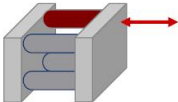


## Nutzbare Aufspannfläche

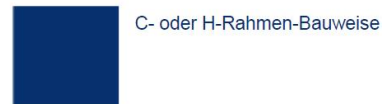
Schließereinheit mit stationären Holmen



Schließereinheit mit Zugholm



Holmlose Schließereinheit

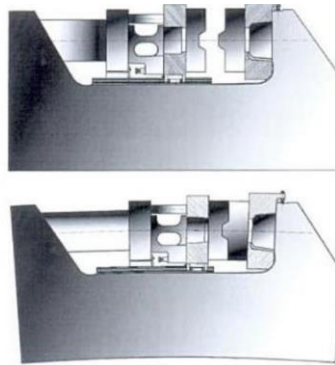
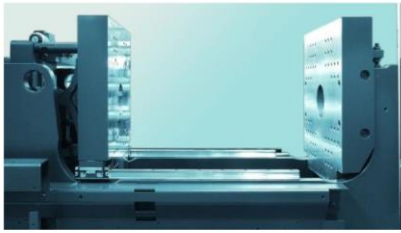


Alle Formnester müssen auf die maximale Aufspannfläche zwischen den Holmen, einschließlich der Zwischenabstände für Kühlung, mechanische Stabilität, Kernzüge, etc. passen.

## Holmlose Schließereinheit (z.B. Engel)

- + Keine Säulen (Bessere Zugänglichkeit, größeres Werkzeug, keine Kollisionen bei Handling und Roboter)
- Plattenparallelität fraglich





## Steuerung und Peripherie

### Maschinensteuerungen

- Bis in die frühen 80er gesteuerte Maschinen mit Nockensteuerung
- Ab den 80er geregelte Maschinensteuerungen
- Ab Mitte 90er frei programmierbare Maschinensteuerungen mit Symbolen
- Ab Mitte 2000er vereinfachte Bedienung mittels Touch Screen.



### Datensicherung

- Bis 80er Erfassung der Spritzdaten mittels Einstelldatenblatt
- 80er und 90er: Elektronische Erfassung der Spritzdaten mit Speicherkarten und Disketten.
- 90er und 2000er Erfassung der Spritzdaten über Massenspeicher wie USB oder über Leitrechner

### Leitrechner

In größeren Spritzereien ist eine Einführung eines Leitrechner Systems sinnvoll. Hierbei werden die Maschinendaten zentral erfasst und können von Terminals abgerufen werden. Informationen wie Produktionsfortschritt, Stückzahlen, Werkzeugwartung, Spritzdatensätze, werden automatisch zusammengeführt und stehen zur Auswertung bereit.

Durch freigegebene Spritzdatensätze wird so sichergestellt, dass immer der aktuelle Spritzdatensatz mit den zulässigen Toleranzen von Aufspannung zu Aufspannung verwendet wird.

### Temperiergeräte Qualitätsüberwachung

Moderne Temperiergeräte bieten die Möglichkeit neben der Werkzeugtemperatur den Durchfluss im Werkzeug zu messen und zu protokollieren. Diese Information kann je nach SGM über eine Schnittstelle in die Maschinensteuerung übertragen werden und online erfasst und überwacht werden.



Dadurch kann frühzeitig ein Zusetzen der Kühlkanäle erkannt werden und entsprechend vorgebeugt werden.



### Handling, Integralpicker

#### Integralpicker

- für zentralen Anguss
- platzsparend
- schnell

#### Linearhandling

- Kann mit Greiferkopf zur Teileentnahme bestückt werden
- hohe Gewichte fassbar
- viele Freiheitsgrade realisierbar (ablegen, drehen, etc...)



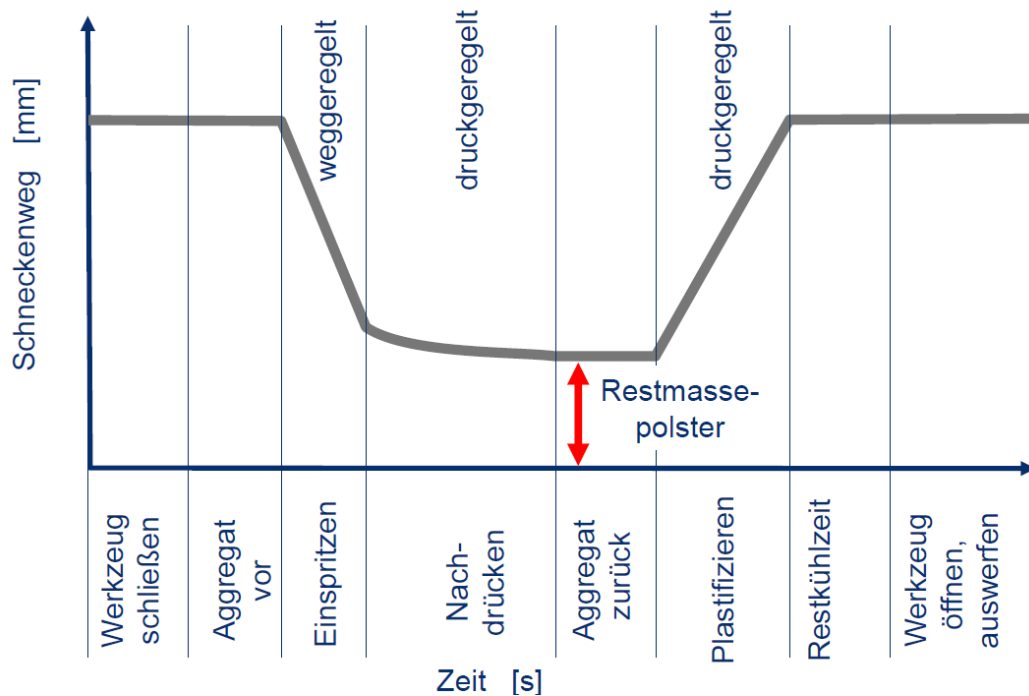
## 10. Spritzgießprozess Parameter

### Lernziele

- ein detailliertes Wissen über den Ablauf der Einspritz- und Nachdruckphase besitzen,
- verschiedene Werkzeuginnendruckkurven kennen und interpretieren können,
- wissen, wie sich die verschiedenen Parameter auf den Prozess auswirken,
- verstanden haben, was Lunker sind und wie man diese verhindern kann.

### Einspritzvorgang und Nachdruckphase

#### Zeitlicher Verlauf des Schneckenweges über die Zykluszeit



#### Einspritzen – Ablauf

- Das Einspritzen wird durch weggeregeltes axiales Verschieben der Schnecke im Plastifizierzylinder erreicht.
- Die Rückstromsperre verhindert ein Zurückfließen der Schmelze beim Einspritzen in die Schneckengänge.
- Möglichst schnelle Formfüllung bis ca. 95 % Volumenfüllung (Einspritzphase umfasst Einspritzen und Komprimierung)
- Geschwindigkeits geregelter Vorgang: Eingabe Schneckengeschwindigkeit, die Maschine holt sich den dafür benötigten Hydraulikdruck, bis zur eingestellten Spritzdruckgrenze
- Optimales Einspritzgeschwindigkeitsprofil hängt vom Bauteil und Material ab. (z. B. langsam-schnell-langsam)

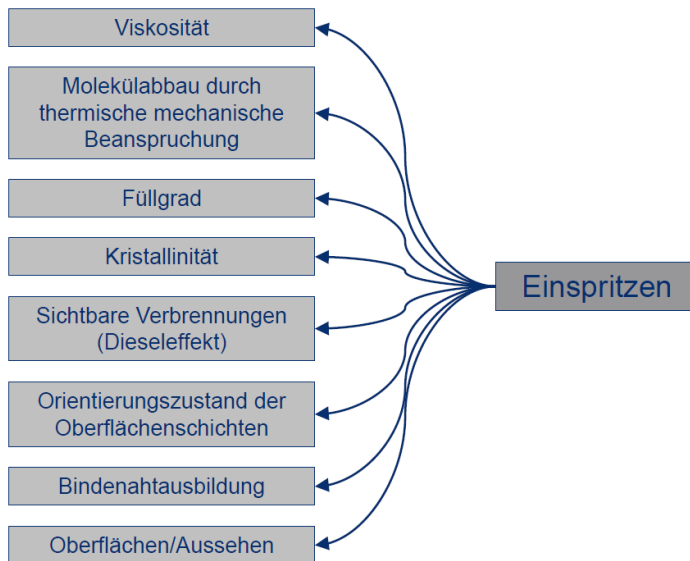
#### Umschaltpunkt

- Am Umschaltpunkt (Kavität gefüllt) wird von der Einspritzphase (geschwindigkeitsgeregelt) auf Nachdruckphase (druckgeregelt) umgeschaltet.

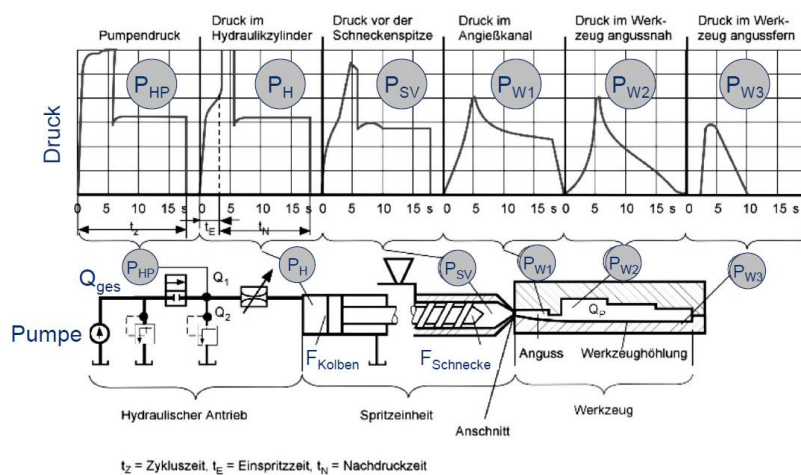
Mögliche Umschaltarten:

1. Wegabhängig: Umschaltung beim Erreichen der fest vorgegebenen Schneckenposition.
2. Druckabhängig: Umschaltung bei Erreichen eines vorgewählten Hydraulik- oder Werkzeuginnendrucks.
3. Temperatursprungabhängig: Über Werkzeugtemperaturfühler in der Kavität

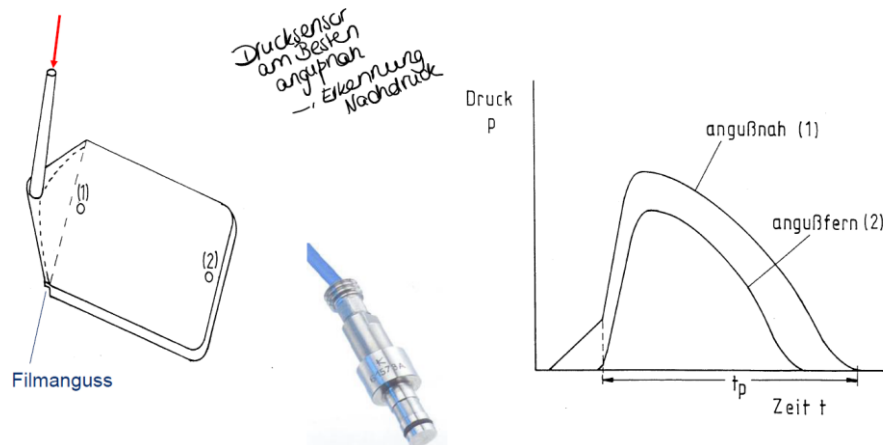
## Aktive Einflüsse des Einspritzens auf das Bauteil



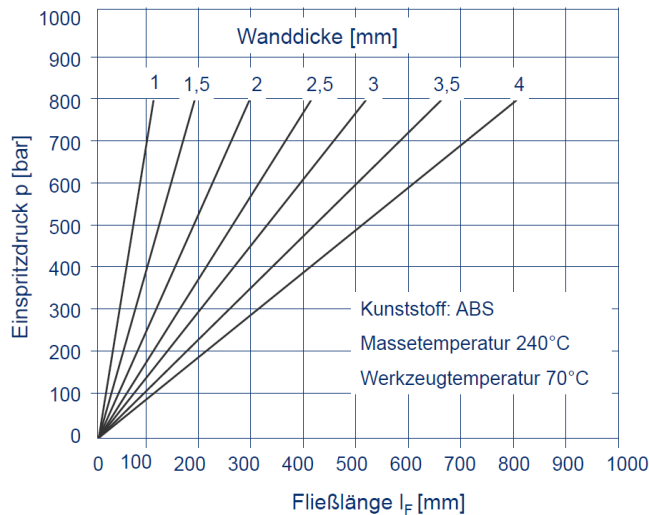
## Druckübertragung beim Spritzgießen



## Werkzeuginnendruckkurve

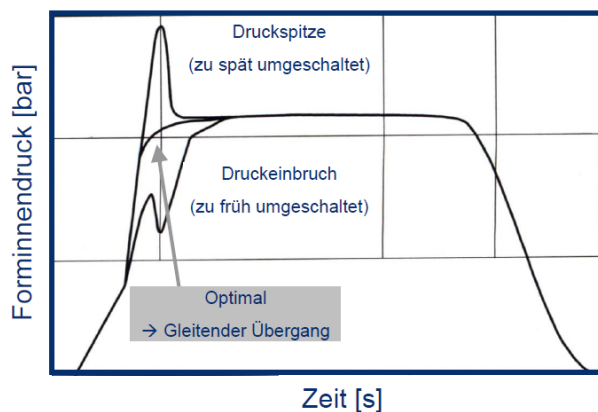
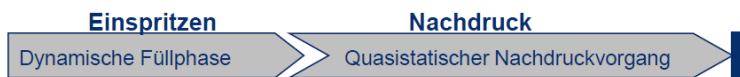


## Fließlänge in Abhängigkeit vom Einspritzdruck



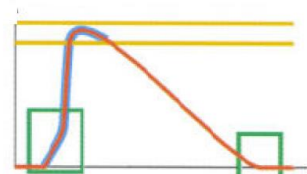
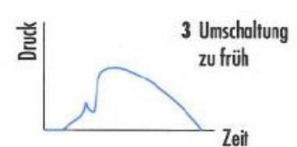
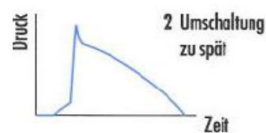
## Das Umschalten auf Nachdruck

Das exakte Umschalten von Einspritzen auf Nachdruck ist für einen Erfolgreichen Prozess äußerst wichtig (ca. 95 % Werkzeugfüllung)!



Bei zu frühem oder zu spätem Umschalten, kann es zu Fehlern am Spritzgussteil sowie zu Beschädigung an Maschine und Werkzeug kommen.

## Interpretation unterschiedlicher Forminnendruckkurven

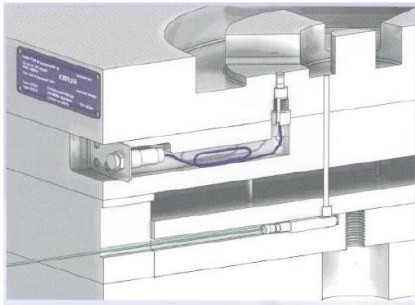


Prozessüberwachung durch Forminnendrucksensoren: Überwachen von:

- Umschaltbereich
- max. Forminnendruck
- Druckverlauf in der Nachdruckphase

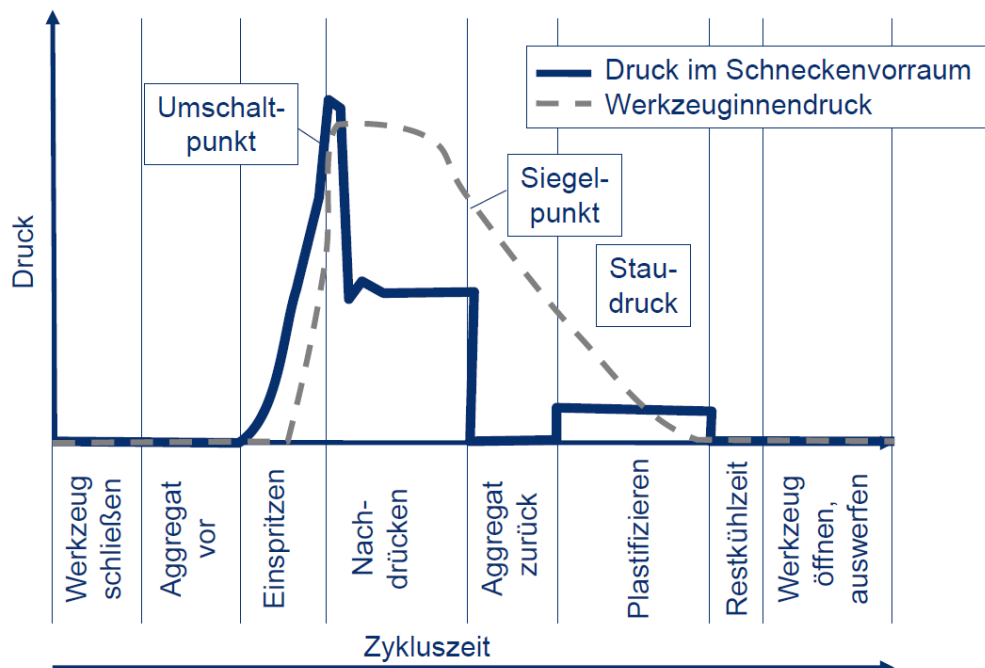
### Forminnendrucksensoren

1. Direkte Messung: sehr genaue Messung
2. Indirekte Messung: Kraftübertragung über (Auswerfer-)Stift; Messung fehlerbehaftet; System in Serienformen möglichst nicht einsetzen.



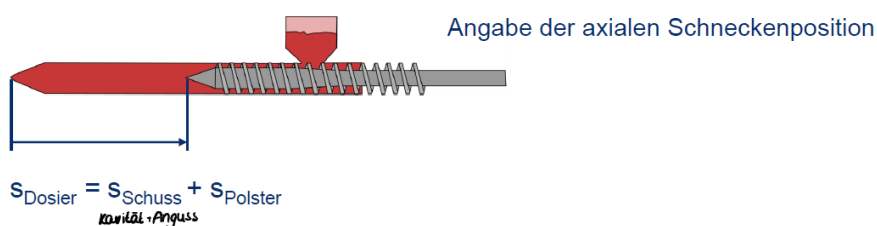
Forminnendrucksensoren werden mit Durchmesser 4 mm, 2,5 mm und (1 mm) angeboten.

### Verlauf von Druck im Schneckenorraum und Werkzeuginnendruck

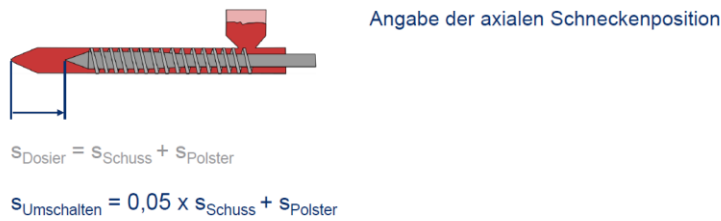


### Hubvolumen von Plastifizieraggregaten

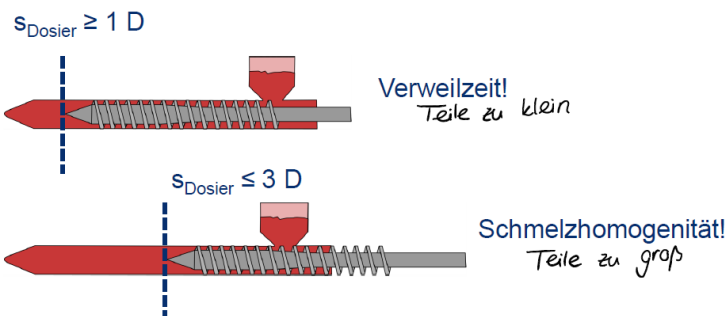
- Dosierweg (Dosiervolumen)



- Umschaltpunkt



- Die Größe des Plastifizieraggregates sollte auf das Bauteil abgestimmt sein
- Bei einem Dosierweg (Hubvolumen) ab 3D ist eine deutliche Qualitätsabnahme zu verzeichnen und der spezifische Durchsatz nimmt ab!



- $1D \leq s_{\text{Dosier}} \leq 3 D$
- Umrechnung von Volumen auf Weg

| Hub<br>[mm],<br>Geschw.<br>[mm/s] | Um-<br>schalt-<br>weg<br>[mm] | Hubvolumen [cm³] bzw. Volumenstrom [cm³/s] bei Schneekendurchmesser [mm] |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |  |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--|
|                                   |                               | 18                                                                       | 25   | 30   | 35    | 40    | 45    | 50    | 60    | 70    | 80    | 85    | 90    | 95    | 100    | 105    | 110    |  |
| 2                                 | 10,1                          | 0,5                                                                      | 1,0  | 1,4  | 1,9   | 2,5   | 3,2   | 3,9   | 5,7   | 7,7   | 10,1  | 11,3  | 12,7  | 14,2  | 15,7   | 17,3   | 19,0   |  |
| 4                                 | 10,2                          | 1,0                                                                      | 2,0  | 2,8  | 3,8   | 5,0   | 6,4   | 7,9   | 11,3  | 15,4  | 20,1  | 22,7  | 25,4  | 28,4  | 31,4   | 34,6   | 38,0   |  |
| 6                                 | 10,3                          | 1,5                                                                      | 2,9  | 4,2  | 5,8   | 7,5   | 9,5   | 11,8  | 17,0  | 23,1  | 30,2  | 34,0  | 38,2  | 42,5  | 47,1   | 52,0   | 57,0   |  |
| 8                                 | 10,4                          | 2,0                                                                      | 3,9  | 5,7  | 7,7   | 10,1  | 12,7  | 15,7  | 22,6  | 30,8  | 40,2  | 45,4  | 50,9  | 56,7  | 62,8   | 69,3   | 76,0   |  |
| 10                                | 10,5                          | 2,5                                                                      | 4,9  | 7,1  | 9,6   | 12,6  | 15,9  | 19,6  | 28,3  | 38,5  | 50,3  | 56,7  | 63,6  | 70,9  | 78,5   | 86,6   | 95,0   |  |
| 15                                | 10,8                          | 3,8                                                                      | 7,4  | 10,6 | 14,4  | 18,8  | 23,9  | 29,5  | 42,4  | 57,7  | 75,4  | 85,1  | 95,4  | 106,3 | 117,8  | 129,9  | 142,5  |  |
| 20                                | 11,0                          | 5,1                                                                      | 9,8  | 14,1 | 19,2  | 25,1  | 31,8  | 39,3  | 56,5  | 77,0  | 100,5 | 113,5 | 127,2 | 141,8 | 157,1  | 173,2  | 190,1  |  |
| 25                                | 11,3                          | 6,4                                                                      | 12,3 | 17,7 | 24,1  | 31,4  | 39,6  | 49,1  | 70,7  | 96,2  | 125,7 | 141,9 | 159,0 | 177,2 | 196,3  | 216,5  | 237,6  |  |
| 30                                | 11,5                          | 7,6                                                                      | 14,7 | 21,2 | 28,9  | 37,7  | 47,7  | 58,9  | 84,8  | 115,5 | 156   |       |       |       |        | 259,8  | 285,1  |  |
| 35                                | 11,8                          | 8,9                                                                      | 17,2 | 24,7 | 33,7  | 44,0  | 55,7  | 68,7  | 99,0  | 134,7 | 175   |       |       |       |        | 303,1  | 332,6  |  |
| 40                                | 12,0                          | 10,2                                                                     | 19,6 | 28,3 | 38,5  | 50,3  | 63,6  | 78,5  | 113,1 | 153,9 | 201,1 | 227,0 | 254,5 | 283,5 | 314,2  | 346,4  | 380,1  |  |
| 45                                | 12,3                          | 11,5                                                                     | 22,1 | 31,8 | 43,3  | 56,5  | 71,6  | 88,4  | 127,2 | 173,2 | 226,2 | 255,4 | 286,3 | 319,0 | 353,4  | 389,7  | 427,6  |  |
| 50                                | 12,5                          | 12,7                                                                     | 24,5 | 35,3 | 48,1  | 62,8  | 79,5  | 98,2  | 141,4 | 192,4 | 251,3 | 283,7 | 318,1 | 354,4 | 392,7  | 433,0  | 475,2  |  |
| 55                                | 12,8                          | 14,0                                                                     | 27,0 | 38,9 | 52,9  | 69,1  | 87,5  | 108,0 | 155,5 | 211,7 | 276,5 | 312,1 | 349,9 | 389,9 | 432,0  | 476,2  | 522,7  |  |
| 60                                | 13,0                          | 15,3                                                                     | 29,5 | 42,4 | 57,7  | 75,4  | 95,4  | 117,8 | 169,6 | 230,9 | 301,6 | 340,5 | 381,7 | 425,3 | 471,2  | 519,5  | 570,2  |  |
| 65                                | 13,3                          | 16,5                                                                     | 31,9 | 45,9 | 62,5  | 81,7  | 103,4 | 127,5 | 183,8 | 250,1 | 326,7 | 368,8 | 413,5 | 460,7 | 510,5  | 562,8  | 617,7  |  |
| 70                                | 13,5                          | 17,8                                                                     | 34,4 | 49,5 | 67,3  | 88,0  | 111,3 | 137,4 | 197,9 | 269,4 | 351,9 | 397,2 | 445,3 | 496,2 | 549,8  | 606,1  | 665,2  |  |
| 75                                | 13,8                          | 19,1                                                                     | 36,8 | 53,0 | 72,2  | 94,2  | 119,3 | 147,3 | 212,1 | 288,6 | 377,0 | 425,6 | 477,1 | 531,6 | 589,0  | 649,4  | 712,7  |  |
| 80                                | 14,0                          | 20,4                                                                     | 39,3 | 56,5 | 77,0  | 100,5 | 127,2 | 157,1 | 226,2 | 307,9 | 402,1 | 454,0 | 508,9 | 567,1 | 628,3  | 692,7  | 760,3  |  |
| 85                                | 14,3                          | 21,6                                                                     | 41,7 | 60,1 | 81,8  | 106,8 | 135,2 | 166,9 | 240,3 | 327,1 | 427,3 | 482,3 | 540,7 | 602,5 | 667,6  | 736,0  | 807,8  |  |
| 90                                | 14,5                          | 22,9                                                                     | 44,2 | 63,6 | 86,6  | 113,1 | 143,1 | 176,7 | 254,5 | 346,4 | 452,4 | 510,7 | 572,6 | 637,9 | 706,9  | 779,3  | 855,3  |  |
| 95                                | 14,8                          |                                                                          | 46,6 | 67,2 | 91,4  | 119,4 | 151,1 | 186,5 | 268,6 | 365,6 | 477,5 | 539,1 | 604,4 | 673,4 | 746,1  | 822,6  | 902,8  |  |
| 100                               | 15,0                          |                                                                          | 49,1 | 70,7 | 96,2  | 125,7 | 159,0 | 196,3 | 282,7 | 384,8 | 502,7 | 567,5 | 636,2 | 708,8 | 785,4  | 865,9  | 950,3  |  |
| 110                               | 15,5                          |                                                                          | 54,0 | 77,8 | 105,8 | 138,2 | 174,9 | 216,0 | 311,0 | 423,3 | 552,9 | 624,2 | 699,7 | 779,3 | 863,9  | 952,5  | 1045,4 |  |
| 120                               | 16,0                          |                                                                          | 58,9 | 84,8 | 115,5 | 150,8 | 190,9 | 235,6 | 339,3 | 461,8 | 603,2 | 680,9 | 763,4 | 850,6 | 942,5  | 1039,1 | 1140,4 |  |
| 130                               | 16,5                          |                                                                          |      | 91,9 | 125,1 | 163,4 | 206,8 | 255,3 | 367,6 | 500,3 | 653,5 | 737,7 | 827,0 | 921,5 | 1021,0 | 1125,7 | 1235,4 |  |
| 140                               | 17,0                          |                                                                          |      |      |       |       | 25,9  | 222,7 | 274,9 | 395,8 | 538,8 | 703,7 | 794,4 | 890,6 | 992,4  | 1099,6 | 1212,3 |  |
| 150                               | 17,5                          |                                                                          |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |  |

## Prozessparameter Spritzgießen

### Beispiel Prozesseinstellung

- Beispiel Bedienseite mit wichtigen Prozesswerten

|                  | DIM   | SOLL | IST |                     | DIM  | SOLL | IST |
|------------------|-------|------|-----|---------------------|------|------|-----|
| Einspritzen 1    | ccm/s | xxx  |     | Massepolster        | ccm  |      | xxx |
| Start Einspr. 2  | ccm   | xxx  |     | Kühlzeit            | s    | xxx  |     |
| Einspritzen 2    | ccm/s | xxx  |     | Plastifizierzeit    | s    |      | xxx |
| Start Einspr. 3  | ccm   | xxx  |     | Schneckenpos.       | ccm  |      | xxx |
| Einspritzen 3    | ccm/s | xxx  |     | Plastifizierweg     | ccm  | xxx  |     |
| Einspritzdr. max | bar   | xxx  | xxx | Dekompr.nach Plast. | ccm  | xxx  |     |
| Umschaltposition | ccm   | xxx  | xxx | Schneckenumfangsg.  | mm/s | xxx  | xxx |
| Umschaltzeit     | s     | xxx  | xxx | Staudruck           | bar  | xxx  |     |
| Umschalttdruck   | bar   | xxx  | xxx |                     |      |      |     |
| Umsch.Innendruck | bar   | xxx  | xxx | Schliesskraft       | kN   | xxx  | xxx |
| Nachdruck 1      | bar   | xxx  |     | Werkzeugöffnung     | mm   | xxx  | xxx |
| Nachdruckzeit 1  | s     | xxx  |     | Temperatur Düse     | °C   | xxx  | xxx |
| Nachdruck 2      | bar   | xxx  |     |                     |      |      |     |
| Nachdruckzeit 2  | s     | xxx  |     |                     |      |      |     |

*→ Dekompression: Kavitätsdruck entspannt, Schnecke geht zurück*

## Die Nachdruckphase

- Mit Ende der Formfüllung wird der Schnekenvorschub von der weggeregelten Einspritzphase auf die druckgeregelte Nachdruckphase umgeschaltet.
- Der Nachdruck kann mehrstufig oder einstufig erfolgen.
- Durch den Nachdruck wird die Schmelze in der Kavität komprimiert. Dadurch wird der Volumenkontraktion beim Abkühlen (Schwindung) entgegengewirkt!
- Achtung! Bei zu hohem Nachdruck kann die Schwindung überkompensiert werden. Dann lässt sich das Formteil ggf. nicht mehr entformen, da es sich in das Formnest einpresst.
- Durch den hohen Nachdruck kann das Werkzeug sich geringfügig öffnen (atmendes Werkzeug). Auch dies verringert die Schwindung. Zu hoher Nachdruck führt zu Überspritzen und Gratbildung (Achtung Werkzeug kann beschädigt werden!)

## Druckwerte

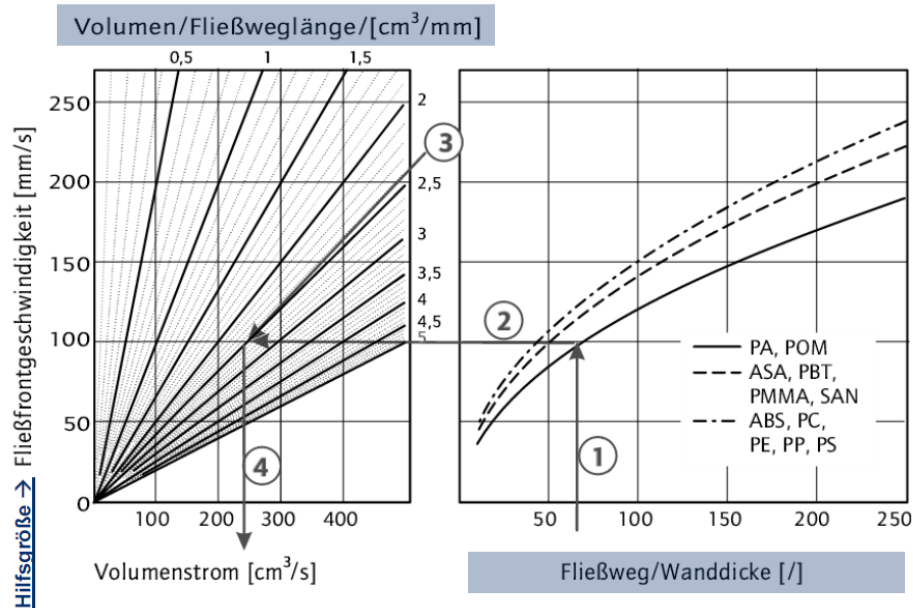
Der Nach- und Einspritzdruck sowie die Einspritzgeschwindigkeit müssen so hoch wie nötig und so niedrig wie möglich gewählt werden.

- Eine hohe Einspritzgeschwindigkeit wird bevorzugt:
  - > um kurze Einspritzzeiten zu realisieren (Wirtschaftlichkeit)
  - > um bessere Bindenahtfestigkeit zu erzielen
  - > um eine homogene Füllung der Kavität zu erhalten
  - > um bei teilkristallinem Material eine gleichmäßigere Kristallitbildung zu erhalten
- Eine niedrige Einspritzgeschwindigkeit wird bevorzugt:
  - > um die thermische scherbedingte Materialschädigung gering zu halten
  - > um bereits erkaltete Bereiche nicht zu verschieben
  - > um einen Quellfluss zu realisieren (Formteilqualität)

## Grundeinstellung Prozessparameter

- Bauteil/-Werkzeugkonstruktion liefert - Einspritzvolumen (inkl. Angussverteiler) - erforderliche Schließkraft - lichter Abstand zwischen den Maschinenholmen
- **Wichtig:**  $1D \leq s_{Dossier} \leq 3D$
- Materialdatenblatt liefert Empfehlungswerte für:
  - > Zylindertemperaturen der Plastifiziereinheit
  - > Werkzeugtemperatur
  - > i.d.R. Schneckendrehzahl (auch Geometrie) und Staudruck (Verweilzeit)
- Einspritzgeschwindigkeit: Verhältnis aus Fließweglänge/Wanddicke sowie Schussvolumen/Fließweglänge (Abschätzung)
- **Wichtig:** Erfahrungswerte





### Bestimmung Umschaltzeitpunkt und Nachdruckdauer/(-höhe)

- Faustformel Umschaltpunkt:  $s_{Umschalten} = 0,05 \cdot s_{Schuss} + s_{Polster}$
- Feinabstimmung Umschaltpunkt mittels Füllstudie
  - Einspritzen ohne Nachdruck (Teile sollten gefüllt sein)
  - optimal: Werkzeuginnendrucksensoren
- Nachdruckhöhe festlegen (< max. Einspritzdruck)
  - auf Maßhaltigkeit, Entformbarkeit und Gratbildung achten!
  - optimal: Füllsimulation mit ermitteltem Druckbedarf für Formfüllung
- Einstellung Nachdruckdauer
  - Teile wiegen bis Massekonstanz

### Füllstudie

#### Füllstudie

Ziel:

- Erkennen Fließwegende
  - Erkennen Bindenahtlage
  - Schmelzestagnation?
- } => kritische Füllbereiche

Vorgehen:

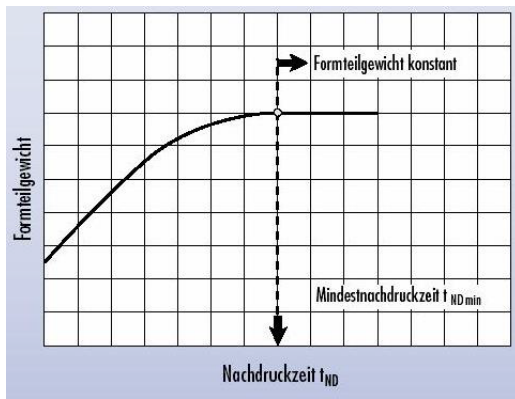
- Herabsetzen Dosiervolumen oder
- Umschaltpunkt anpassen (Wert erhöhen)
- immer OHNE Nachdruck, bei volumetrischem Umschalten!!



### Siegelpunktbestimmung

Bestimmung der Nachdruckzeit:

- Stufenweise Verlängerung der Nachdruckzeit und anschließendes Wiegen der Teile.
- Nimmt das Gewicht nicht mehr zu, ist der Anschnitt eingefroren und eine längere Nachdruckzeit nicht mehr wirksam.



### Massepolster

Abstand zwischen der vorderen Schneckenposition (Ende Nachdruckzeit) und der Nullposition der Schnecke.

Weshalb Massepolster

- Schneckenspitze fährt nicht auf Anschlag
- Ausgleich von Prozessschwankungen
- Überwachung des Spritzprozesses



### Dosieren

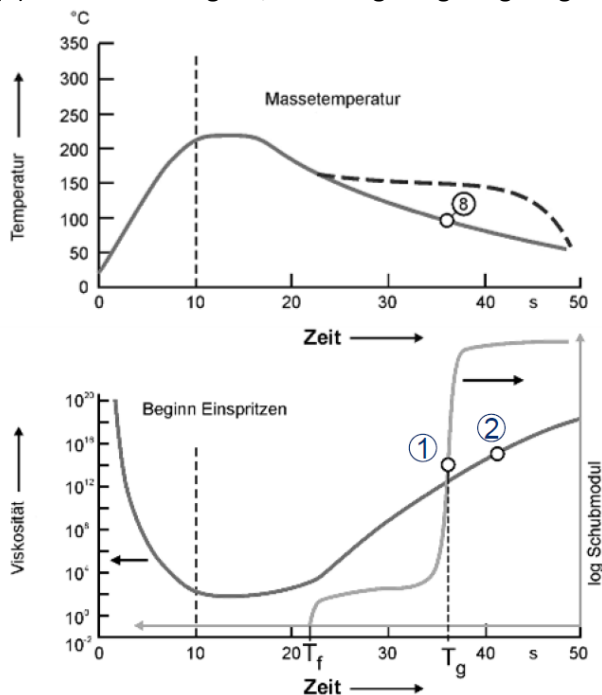
Wichtige Einstellungen für den Dosierprozess:

- möglichst geringe Schneckendrehzahl
- langsam dekomprimieren
- kleiner Dekompressionsweg, keine Luft einziehen!
- Dosierzeit < Restkühlzeit (Zykluszeit relevant)
- Staudruck

## Entformung: Temperatur und Viskositätsverlauf im Werkzeug (angussnah)

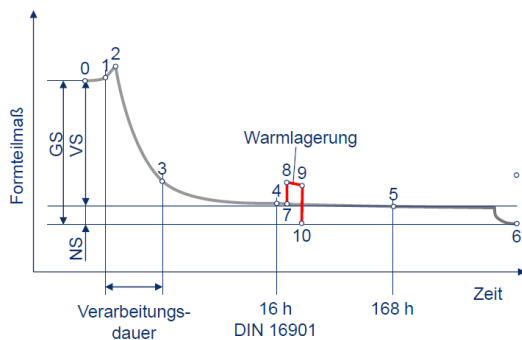
(1) Glastemperatur  $T_g$  mit Haupteweichungsbereich

(2) Entformen möglich, da Steifigkeit groß genug. Formteiltemperatur liegt unter  $T_g$ .



## Bauteilschwindung

$$S = \frac{l_w - l_{ft}}{l_w} \cdot 100\%$$



- 0 Maß des kalten Werkzeuges (23 °C)
- 1 Maß des aufgeheizten Werkzeuges
- 2 elast. Aufweitung des Werkzeuges durch Innendruck
- 3 Formteilmaß bei Entformen
- 4 - 5 Formteilmaß nach 16 h (168 h)
- 6 Maß nach sehr langer Lagerungszeit

- GS = Gesamtschwindung
- VS = Verarbeitungsschwindung
- NS = Nachschwindung

## Lunkerentstehung und -vermeidung

### Wie entstehen Lunker beim Spritzgießen?

Durch Volumenschwindung beim Abkühlvorgang

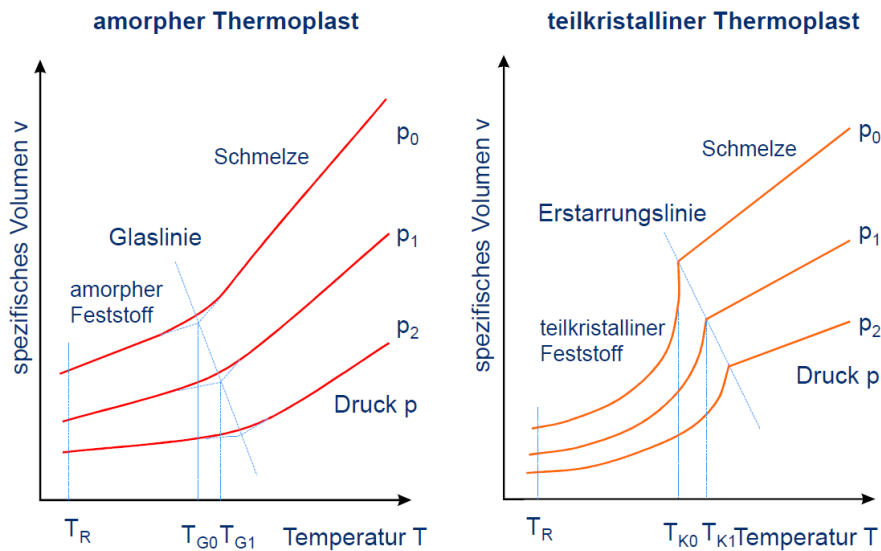
- > Schmelze erstarrt an der Werkzeugwand
  - > Randschicht wirkt isolierend zum Inneren/Kern des Bauteils
  - > Es entsteht ein Temperaturgradient in Richtung Querschnittmitte
  - > „plastische Seele“ hat ein größeres spezifisches Volumen, dessen Schwindung beim weiteren Abkühlen über den Nachdruck kompensiert werden muss (pvT-Diagramm)
  - > Darüber hinaus haben die Ketten mehr Zeit um sich zu organisieren, d.h. es stellt sich tendenziell auch ein homogeneres (besser gepacktes) Gefüge ein
- ➔ Beschreibung durch pvT-Diagramm

## pvT-Diagramm

Thermische Zustandsgleichung verknüpft die Zustandsgrößen

- Druck
- Temperatur
- spezifisches Volumen bzw. Dichte:  $v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$

➔ Wie aus pvT-Diagramm ersichtlich, ändert sich bei Thermoplasten die Dichte in Abhängigkeit von Temperatur und Druck sehr stark!



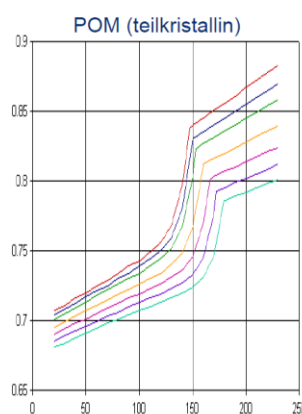
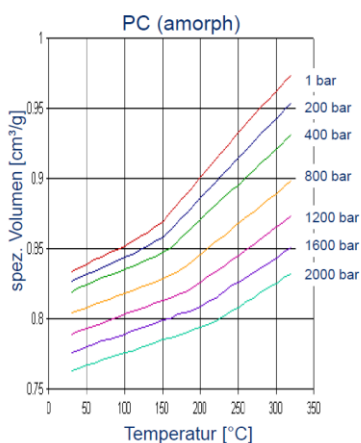
Schmelzbereich:

➔ steiler Verlauf der Kennlinie aufgrund der starken Änderung der spez. Dichte in Abhängigkeit von Temperatur und Druck!

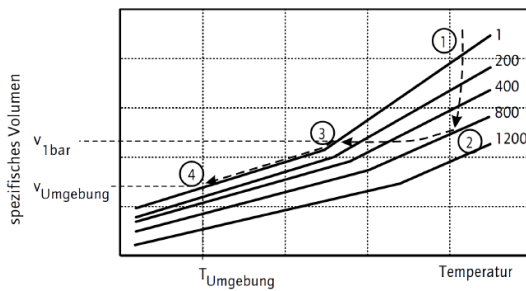
Feststoffbereich:

➔ amorph: lineare Steigung der Kennlinie (keine Phasenumwandlung)

➔ teilkristallin: Aufgrund von Kristallisationsprozess nichtlinearer Kurvenverlauf



### Bsp.: SG-Prozess amorpher Thermoplast



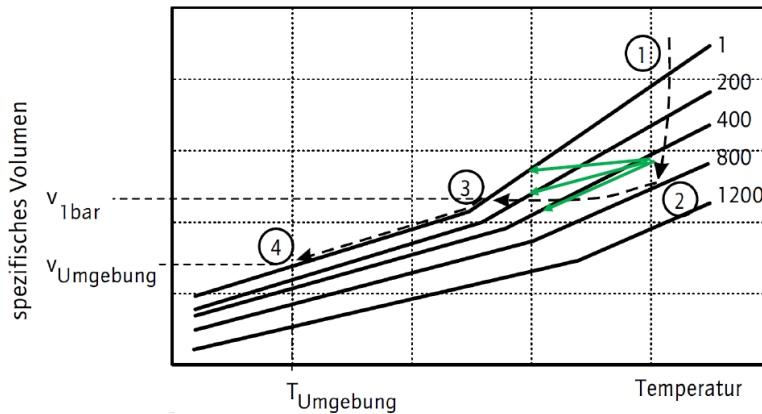
2) → 3a) - ohne Nachdruck

2) → 3b) - optimaler Nachdruck

- 1) Thermoplastschmelze nach Plastifizieren
- 1) → 2) Einspritzvorgang
- 2) → 3) Abkühlen im Werkzeug
- 3) Entformen
- 3) → 4) Abkühlen auf Umgebungstemperatur

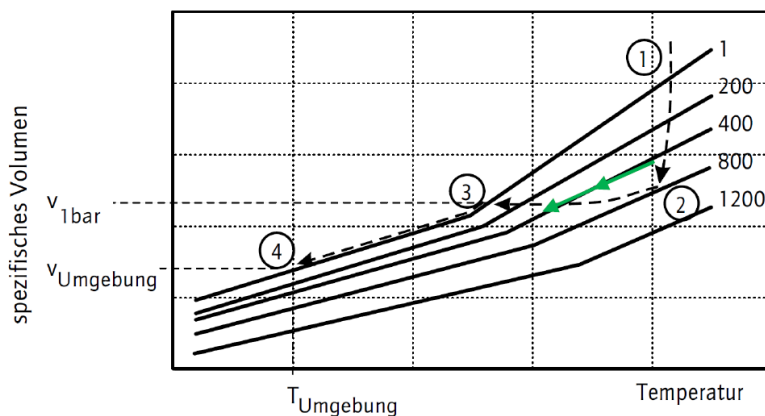
### Einfluss Prozessparameter auf Lunkerentstehung

- Nachdruckhöhe ↑, (Nachdruck < Einspritzdruck)



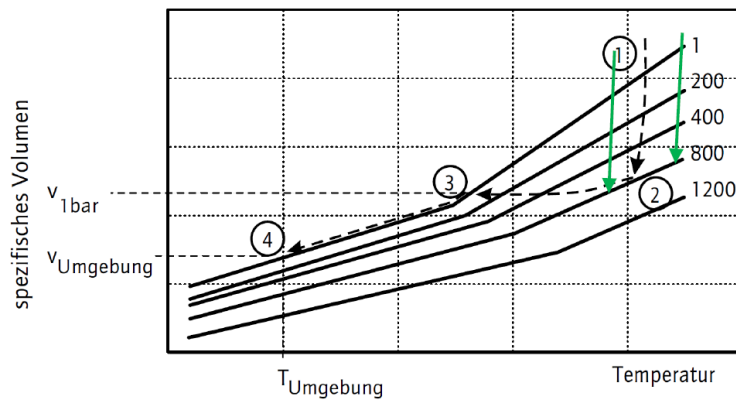
Auswirkung auf: Maßhaltigkeit, Gratbildung, Werkzeugaufleibung

- Nachdruckzeit ↑



Messgröße: Teilgewicht

- Schmelztemperatur ↓



Auswirkung auf: Einspritzdruck, mechanische Bauteileigenschaften

Weitere Prozessparameter:

- Werkzeugtemperatur  $\uparrow$
- In Kombination mit Schmelztemperatur  $\downarrow$  geringerer Temperaturgradient

Weitere Einflüsse auf Lunker:

- Schlechte Werkzeugentlüftung (insbesondere auch bei Bindenähten)
- Lufteinschlüsse, die bereits beim Plasitifizieren entstehen

**Grundregeln für Konstruktion:**

- Masseanhäufungen vermeiden (Entkernen)
- Waddickensprünge vermeiden (übliche Waddicken 2 - 4 mm)
- Rippendicke = 0,4 - 0,6 x Waddicke
- Anschnitt an der dicksten Stelle
- Anschnittquerschnitt (Durchmesser = 50 - 70 % der Waddicke) (für teilkristalline Thermoplaste tendenziell dicker als bei amorphen, für verstärkte Thermoplaste tendenziell dicker als bei unverstärkten)

Ideal: Simulation des Spritzgießprozesses

# 11. Spritzgießwerkzeuge I

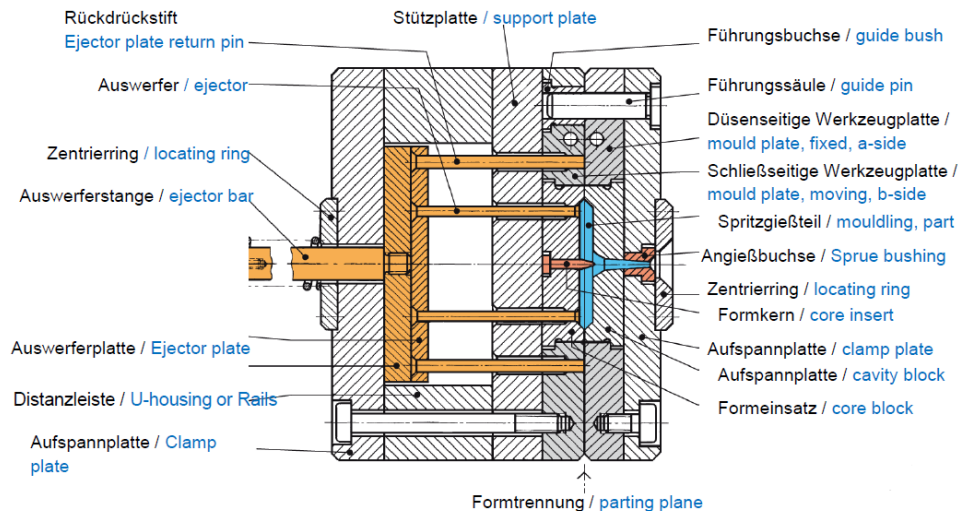
## Lernziele

Nach dieser Veranstaltung sollten Sie ...

- wissen, wie ein Spritzgießwerkzeug aufgebaut ist,
- die verschiedenen Werkzeugtypen kennen,
- sich die Grundlagen der rheologischen und thermischen Auslegung von Spritzgießwerkzeugen angeeignet haben.

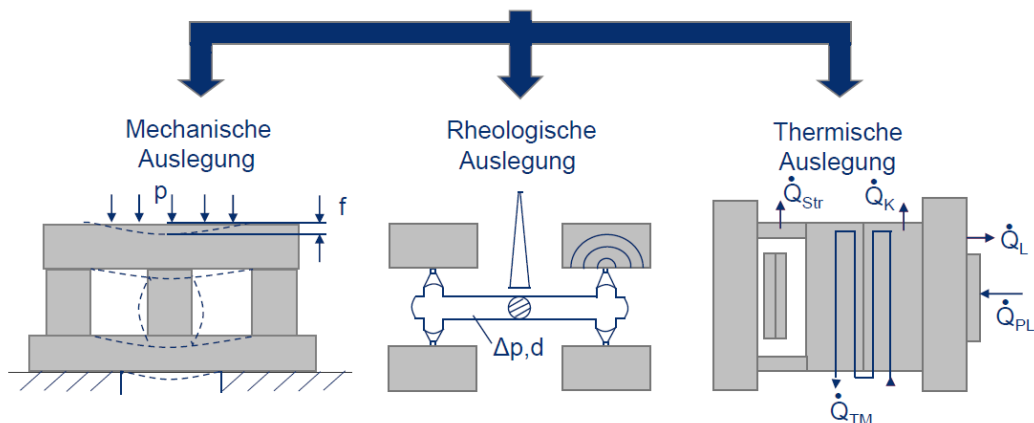
## Aufbau von Spritzgießwerkzeugen und Anforderungen

### Bezeichnungen der Bauelemente



### Anforderungen

#### Anforderungen an Spritzgießwerkzeuge



### Aufgaben eines Spritzgießwerkzeuges

Für die Herstellung von Formteilen (Spritzlingen) ist ein individuelles Werkzeug mit einem oder mehreren Formnestern (Kavität) notwendig.

Grundlegende Aufgaben:

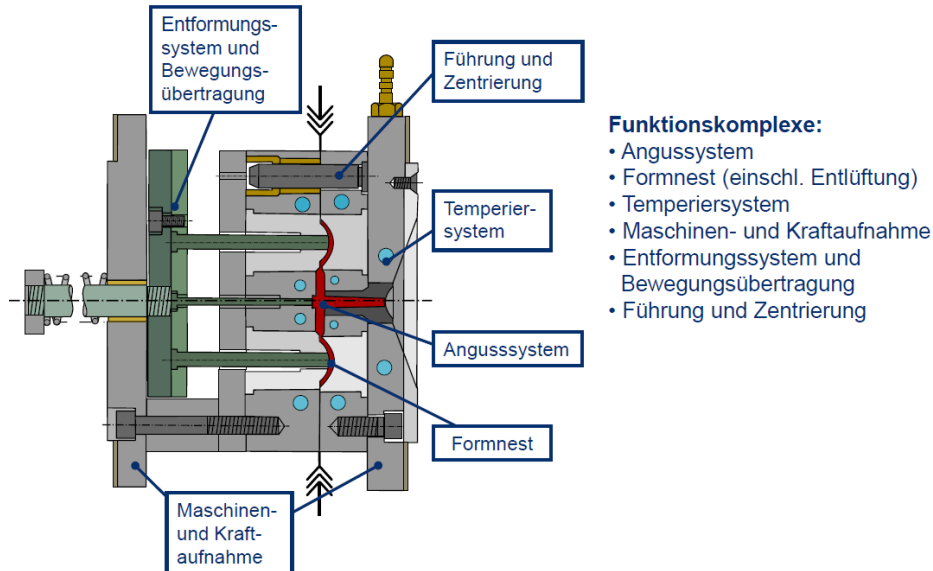
- Kunststoffschnelze aufnehmen,
- Kunststoffschnelze verteilen,
- Kunststoffschnelze ausformen,
- Kunststoffschnelze abkühlen (bei Thermoplasten) oder Aktivierungswärme zuführen (bei Duro- und Elastomeren),
- Kunststoffschnelze in einen festen Zustand überführen,
- das Spritzgussbauteil auswerfen.



Konstruktiv bedingten Aufgaben:

- Kräfte aufnehmen (Schließ- und Auftriebskräfte),
- Bewegungen übertragen (Form schließen, Auswerfersystem, Kernzüge),
- Werkzeugteile führen (Ober- und Unterteil zusammenpassen).

### Aufgliederung eines Linsenwerkzeuges in Funktionselemente



### Einteilung der Werkzeuge in Gruppen

Die gesamten Funktionskomplexe lassen sich einteilen nach:

- Konstruktionsabhängigen Merkmalen
- Spritzteilabhängigen Merkmalen

#### Konstruktionsabhängige Merkmale

- Bewegungsübertragung
- Entformungssystem (teilweise)
- Anzahl der Trennebenen
- Anzahl der Zwischenplatten
- Führung der Zentrierung
- Kraftaufnahme
- Maschinenaufnahme

#### Spritzteilabhängige Merkmale

- Formnest
- Formnestanordnung
- Angussystem (teilweise)
- Temperiersystem
- Art der Querzüge
- Entformungssystem (teilweise)

### Anforderungen an die Funktionskomplexe

Von diesen Funktionskomplexen muss dem Entformungssystem besonders Beachtung gegeben werden:

- Funktionskomplex „Entformungssystem“
  - > wirtschaftlicher Aspekt → kurze Zykluszeit, Werkzeugkosten
  - > qualitätsbezogener Aspekt → Entformung ohne Beschädigung

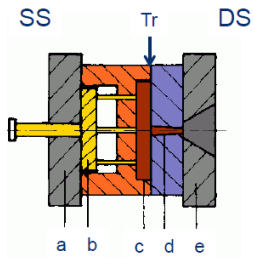
Entformungssystem = f (Art des Formteils)

- ohne Hinterschneidungen
- mit äußerer Hinterschneidung (z.B. Gewinde)
- mit innerer Hinterschneidung (z.B. Gewinde)

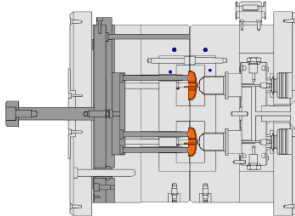


## Unterscheidung von Spritzgießwerkzeugen nach Entformungssystem

### Normalwerkzeug



Anwendungsbeispiel:



| Bezeichnung                    | Kriterien für die Bezeichnung                                                                                                                 |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| wichtige Elemente              | a: Aufspannplatte SS<br>b: Entformungssystem<br>c: Formnest<br>d: Angusskanal<br>e: Aufspannplatte DS                                         |
| charakteristische Beschreibung | einfachste Bauweise; zwei Werkzeughälften; eine Teilebene; Öffnungsbewegung in eine Richtung; Entformung durch Schwerkraft, Hülse oder Stifte |
| Formteile                      | für Formteile aller Art ohne Hinterschneidung                                                                                                 |
| Öffnungsrichtung               | (1) ←                                                                                                                                         |

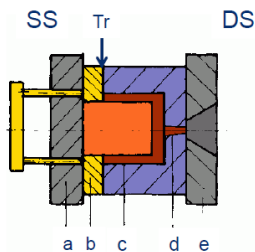
SS = Schließseite

DS = Düsenseite

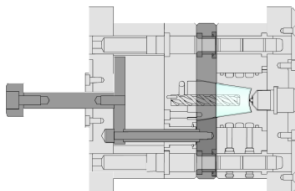
Tr = Trennebene

(1): Hauptöffnungsbewegung, Führungsbewegung

### Abstreiferwerkzeug



Anwendungsbeispiel:



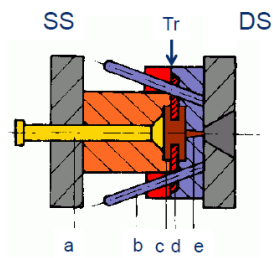
| Bezeichnung                    | Kriterien für die Bezeichnung                                                                        |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| wichtige Elemente              | a: Aufspannplatte SS<br>b: Abstreiferplatte<br>c: Formnest<br>d: Angusskanal<br>e: Aufspannplatte DS |
| charakteristische Beschreibung | Aufbau ähnlich dem Normalwerkzeug; jedoch Entformung durch Abstreiferplatte                          |
| Formteile                      | Für Becherförmige Bauteile ohne Hinterschneidung                                                     |
| Öffnungsrichtung               | (1) ←                                                                                                |

SS = Schließseite

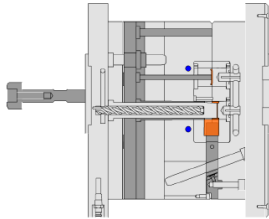
DS = Düsenseite

(1): Hauptöffnungsbewegung, Führungsbewegung

## Schieberwerkzeug



Anwendungsbeispiel:



*Kernzeug  
nur  
hydraulisch*

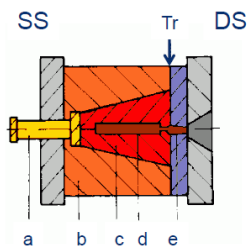
| Bezeichnung                    | Kriterien für die Bezeichnung                                                                           |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| wichtige Elemente              | a: Entformungssystem<br>b: Steuerfinger<br>c: Formnest<br>d: Schieber<br>e: Angusskanal                 |
| charakteristische Beschreibung | Aufbau ähnlich dem Normalwerkzeug; jedoch mit zusätzlichem Schieber und Steuerfinger für Seitenbewegung |
| Formteile                      | Für flache Bauteile mit Hinterschneidung oder äußeren Gewinde                                           |
| Öffnungsrichtung               |                                                                                                         |

(1): Hauptöffnungsbewegung, Führungsbewegung

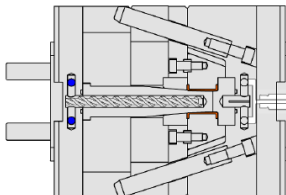
(2): Bewegung zwischen Führung und Seitenteil, Relativbewegung

(3): Bewegung des Seitenteils während der Entformung, Absolutbewegung

## Backenwerkzeug



Anwendungsbeispiel:



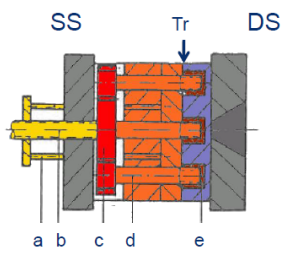
| Bezeichnung                    | Kriterien für die Bezeichnung                                                                                                             |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| wichtige Elemente              | a: Entformungssystem<br>b: Backenführungsplatte<br>c: Backe<br>d: Formnest<br>e: Angusskanal                                              |
| charakteristische Beschreibung | Aufbau ähnlich dem Normalwerkzeug; jedoch mit zusätzlichen Backen für Teile mit Hinterschneidung oder äußerem Gewinde sowie Kraftaufnahme |
| Formteile                      | Für längere und breite Teile mit Hinterschneidung                                                                                         |
| Öffnungsrichtung               |                                                                                                                                           |

(1): Hauptöffnungsbewegung, Führungsbewegung

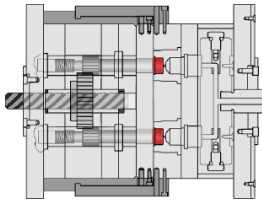
(2): Bewegung zwischen Führung und Seitenteil, Relativbewegung

(3): Bewegung des Seitenteils während der Entformung, Absolutbewegung

## Abschraubwerkzeug



Anwendungsbeispiel:

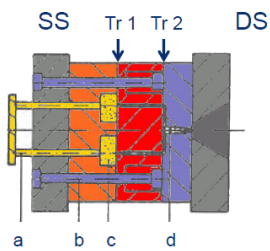


| Bezeichnung                    | Kriterien für die Bezeichnung                                                    |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| wichtige Elemente              | a: Entformungssystem<br>b: Spindel<br>c: Zahnrad<br>d: Formkern<br>e: Formnest   |
| charakteristische Beschreibung | Drehbewegung des Gewindeformkerns durch eingebautes Getriebe mechanisch betätigt |
| Formteile                      | Für Teile mit inneren oder äußerem Gewinde                                       |
| Öffnungsrichtung               | (4)  (1)                                                                         |

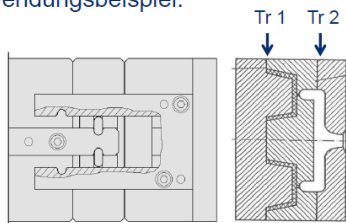
(1): Hauptöffnungsbewegung, Führungsbewegung

(4): Bewegung des Schraubkerns, Relativbewegung

## Abreißwerkzeug/Dreiplattenwerkzeug



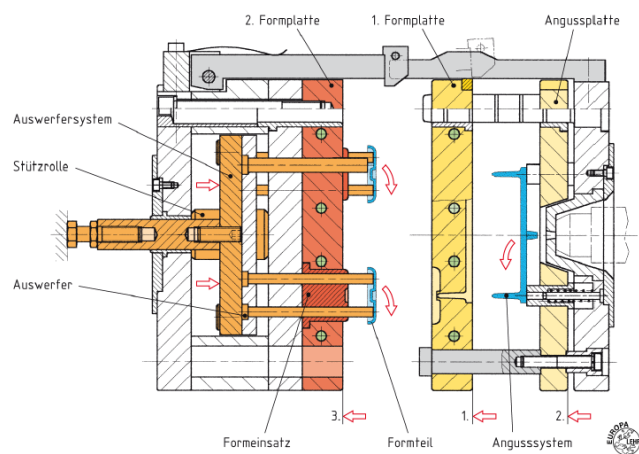
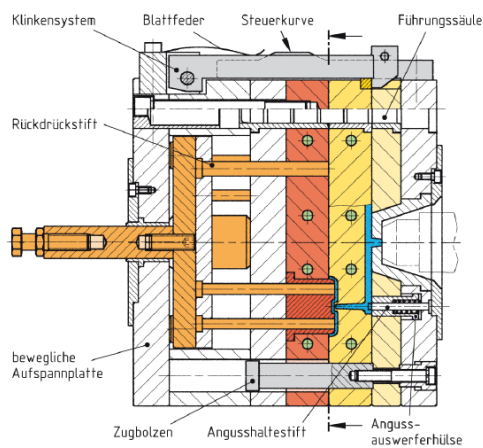
Anwendungsbeispiel:



| Bezeichnung                    | Kriterien für die Bezeichnung                                                                                |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| wichtige Elemente              | a: Entformungssystem<br>b: Zuganker<br>c: Formnest<br>d: Angusskanal                                         |
| charakteristische Beschreibung | Zwei Trennebenen; Betätigung der Zwischenplatte durch Klinkenzug oder Zuganker; unterteilte Öffnungsbewegung |
| Formteile                      | Für Teile mit automatischer Angussabtrennung                                                                 |
| Öffnungsrichtung               | (1) (1)                                                                                                      |

(1): Hauptöffnungsbewegung, Führungsbewegung

Tr = Trennebene

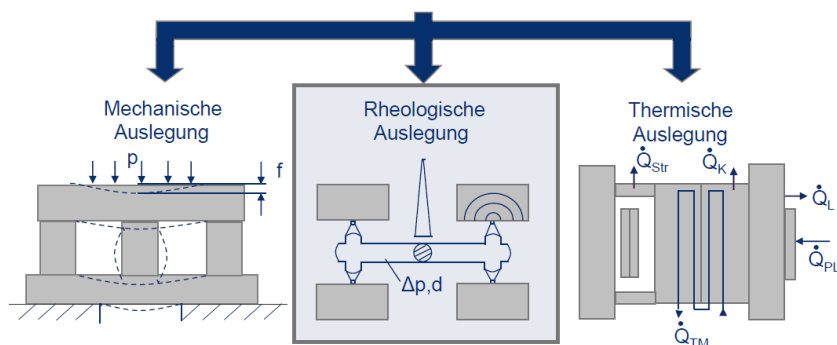


## Übersicht über die charakteristischen Bezeichnungen von Werkzeugen

| Bezeichnung             | Kriterien für die Bezeichnung                                                                                                                                               |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Normalwerkzeug       | Einfachste Bauform („normale“ Ausführung); eine Trennebene; Öffnungsbewegung in eine Richtung; Entformung hauptsächlich durch Schwerkraft, Ausdrückstifte, Ausdrückhülse    |
| 2. Abstreifwerkzeug     | Wie unter 1., jedoch Entformung durch Abstreifplatte                                                                                                                        |
| 3. Schieberwerkzeug     | Eine Trennebene; Öffnungsbewegung in Hauptrichtung und quer dazu durch auf Schrägstiften geführte Schieber                                                                  |
| 4. Abschneidwerkzeug    | Wie unter 1., jedoch Angussabschneidung vom Spritzteil durch zusätzliche Platte, die wie unter 3. Querbewegungen ausführt                                                   |
| 5. Backenwerkzeug       | Eine Trennebene; Öffnungsbewegung in Hauptrichtung und quer dazu durch auf schräger Ebene geführte Backen; Backen können Seitenkräfte aufnehmen                             |
| 6. Abschraubwerkzeug    | Mechanische Einleitung von Drehbewegungen zur automatischen Gewindeentformung                                                                                               |
| 7. Abreißwerkzeug       | Zwei Trennebenen zur getrennten Entformen von Anguss und Spritzteil, die voneinander abgerissen werden; Öffnungsbewegung in eine Richtung, in zwei Phasen                   |
| 8. Etagenwerkzeug       | Formteile etagenweise in mehreren Teilungsebenen angeordnet                                                                                                                 |
| 9. Isolierkanalwerkzeug | Zwei Trennebenen; kein konventionelles Angussystem, sondern Kanäle mit größerem Querschnitt, damit sich eine „plastische Seele“ innerhalb einer erstarrten Haut bilden kann |
| 10. Heißkanalwerkzeug   | Elektrisch beheizte Verteilerkanäle durch Zusatzeinrichtung                                                                                                                 |
| 11. Sonderwerkzeuge     | Kombination aus 2. bis 10. für spezielle Formteile mit besonderen Anforderungen, die eine „einfache“ Lösung unmöglich machen                                                |

## Rheologische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen

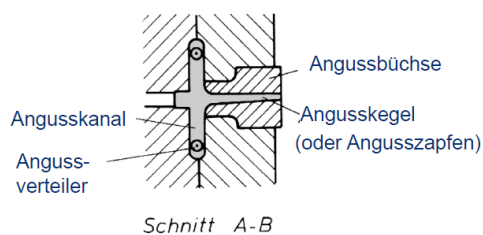
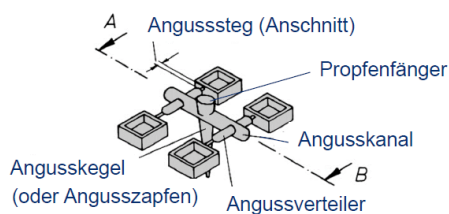
### Anforderungen an Spritzgießwerkzeuge



### Bezeichnungen am Angussystem

Lunkervermeidung - Grundregel für Anschnittsquerschnitt:

- $\varnothing = 50 - 70 \%$  der max. Wanddicke
- für teilkristalline Thermoplaste tendenziell dicker als bei amorphen
- für verstärkte Thermoplaste tendenziell dicker als bei unverstärkten
- wenn möglich Füllsimulation durchführen



### Aufbau vom Angussystem

Der Anguss (Angussystem) besteht in der Regel aus mehreren Segmenten

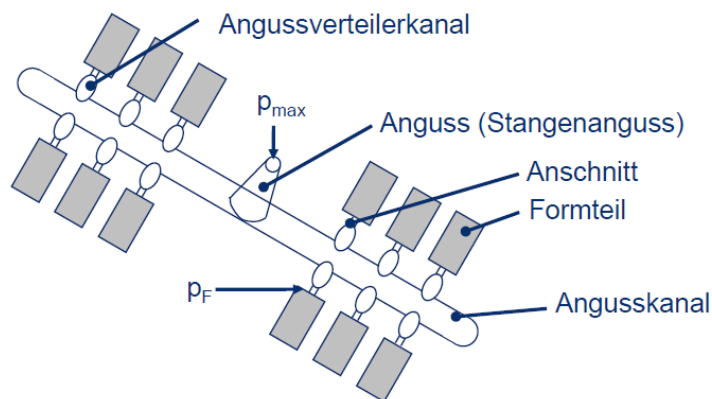
- Angusskegel (Angusszapfen, Angussstange), z.B. Einfachwerkzeug mit Stangenanguss
- Angusskanäle (Angussspinne, Angussverteiler)
- Angusssteg (Anschnitt, Anbindung)

Aufgaben der einzelnen Segmente:

- Angusskegel: Übernimmt die Schmelze von der Plastifiziereinheit und führt sie zur Trennebene oder zum Formteil (Stangenanguss)
- Angusskanäle: Verteilung der Schmelze bei Mehrfachwerkzeugen
- Angusssteg: Übergang vom Angusskanal zum Formnest (Formteil), (schwache Ausführung für einfache Trennung)

### Druckverlust im Angussystem

- Der maximal erreichbare Einspritzdruck der Spritzgießmaschine muss größer als der benötigte Fülldruck des Formnestes sowie der Druckverlust im Angussystem etc. sein.
- Die Differenz aus Maschinenspritzdruck  $p_{max}$  im Schneckenorraum und des Druckbedarfs zur Formfüllung  $p_F$  ( $\Delta p_F$ ) wird für den Druckbedarf in der Maschinendüse, im Anguss (z. B. Stangenanguss), in den Verteilerkanälen und im Anschnitt benötigt (Bild).



### Maximale Verteilerkanallänge

Mit dieser Druckdifferenz  $p_{max} - p_F = \Delta p_A$  lässt sich die maximale Verteilerkanallänge  $L_{max}$  berechnen:  $\Delta p_{A,ges} = \Delta p_{Düse} + \Delta p_{Angussstange} + \Delta p_{Verteiler} + \Delta p_{Anschnitt}$

Für runde Kanäle gilt (isotherm):

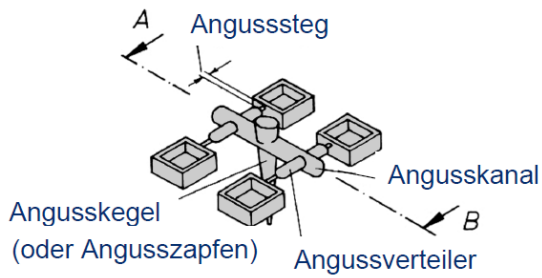
$$\Delta p = \frac{8\eta \cdot L \cdot \dot{V}}{\pi \cdot R^4}$$

$\eta$  = Viskosität

$L$  = Kanallänge

$\dot{V}$  = Volumenstrom = Schussvolumen/Spritzzeit

$R$  = Kanalradius



Hiermit kann  $\Delta p_{Düse} + \Delta p_{Angusstange} + \Delta p_{Anschnitt}$  bestimmt werden.

Für den verbleibenden Druck gilt:

$$\Delta p_{Verteiler} = \Delta p_{A,ges} - (\Delta p_{Düse} + \Delta p_{Angusstange} + \Delta p_{Anschnitt})$$

*Anguss-Größe  
50% - 60% der  
max. Wanddicke  
→ nicht sonst zu früh ein*

Durch Umstellung kann die maximale Verteilerkanallänge  $L_{max}$  berechnet werden:

$$L_{max} = \frac{\Delta p_{Verteiler} \cdot \pi \cdot R^4}{8 \eta \cdot l \cdot \dot{V}}$$

Mit  $L_{max}$  lassen sich die Formnester auf der vorhandenen Fläche zwischen den Holmen aufteilen.  
(siehe Folien Schließenheit)

### Einfluss des Anschnittpunktes

Lage, Anzahl und Durchmesser der Anschnittpunkte beeinflussen:

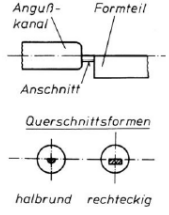
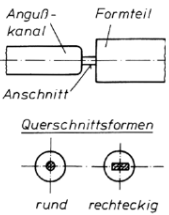
- Gleichmäßige Füllung zwischen den Formnestern
- Stoffabbau während des Einspritzens (Kürzung der Molekülketten)
- Glasfaserorientierung
- Schwindung und Verzug
- Druckwirkung im Werkzeug
- Bildung und Lage von Bindenähten

### Ausführungsformen des Angusskanals

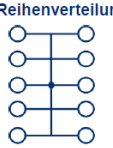
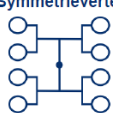
| Querschnittsform der Kanäle                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rundkanal</b><br><br>$D = s_{max} + 1,5 \text{ mm}$ | Vorteile: Geringe Oberfläche bezogen auf den Querschnitt, geringste Abkühlung, geringste Wärme- und Reibungsverluste, Masse erstarrt im Zentrum eines runden Kanals zuletzt, dadurch gute Nachdruckwirkung<br><br>Nachteile: Muss zu gleichen Teilen in beide Werkzeughälften eingearbeitet werden, dadurch schwierig und teuer. |
| <b>Parabelförmiger Kanal</b><br><br>$W = 1,25 \cdot D$ | Vorteil: Gute Annäherung an Rundkanal, einfachere Herstellung, da Einarbeitung nur in einer Werkzeughälfte (Schließseite aus Entformungsgründen) Anwendung, wenn Schieber relativ zur Trennebene bewegt werden müssen)<br><br>Nachteile: Wärmeverluste und Abfall etwas größer gegenüber Rundkanal                               |
| <b>Trapezförmiger Kanal</b><br><br>$W = 1,25 \cdot D$  | Alternativlösung zum parabelförmigen Kanal<br><br>Nachteile: Wärmeverluste und Abfall größer gegenüber parabelförmigen Kanal                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Rechteck-/ Halbkreiskanal</b><br>                   | Ungünstige Querschnitte sind zu vermeiden                                                                                                                                                                                                                                                                                        |



## Unterscheidung der Lage und Querschnitt von Anschnitten

| Anschnittvarianten                                                                                                  | Merkmale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Exzentrischer Anschnitt</b><br> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die exzentrische Lage des Anschnittes ist in der Herstellung einfacher.</li> <li>Ein weiterer Vorteil ist, dass dieser Anschnitt sich besser entformen und leichter vom Formteil abreißen lässt.</li> <li>Der Anschnitt mündet hier in der Flucht der Wand, so dass kein Freistrahл entstehen kann.</li> </ul> |
| <b>Zentrischer Anschnitt</b><br>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Rundkanal hier am günstigsten.</li> <li>Einarbeiten in beide Formhälften erforderlich. Die zentrische Lage erschwert Abreißen des Angusses und erfordert evtl. Nacharbeit. Der Anschnitt sollte besser auf der Höhe einer Wand in das Formnest münden, um Freistrahлbildung zu vermeiden.</li> </ul>           |

## Ausführungsformen des Angusskanals

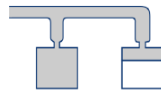
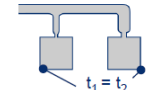
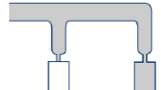
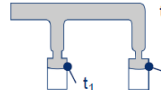
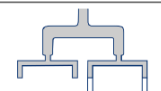
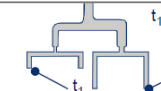
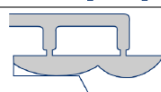
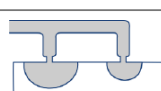
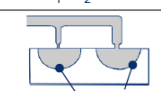
| Verteilervarianten                                                                                                | Vorteile:                                                                                                                                          | Nachteile:                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sternverteilung</b><br>      | Gleiche Fließwege zu allen Formnestern. Günstige Anordnung zur Entformung, besonders bei Teilen mit mechanisch betätigten Gewindeausdrehschnecken. | Anzahl der unterzubringenden Formnestern ist beschränkt                                                                                                                              |
| <b>Reihenverteilung</b><br>    | Unterbringung von mehr Formnestern als bei Sternverteilung                                                                                         | Ungleich lange Fließwege zu den einzelnen Formnestern. Gleichzeitige Füllung nur mit korrigierten Kanaldurchmessern (mit Hilfe von Computerprogrammen, z.B. MOLDFLOW, CADMOLD etc.). |
| <b>Symmetrieverteilung</b><br> | Gleich lange Fließwege zu allen Formnestern, keine Anschnittkorrektur nötig.                                                                       | Großes Angussvolumen, viel Abfall, Formmasse kühlt schneller ab.<br><i>Abhilfe:</i><br>Heißkanal- oder Isolierkanalverteiler                                                         |

natürliche  
Balancierung

Ausbalancieren des Verteilersystems, d. h. Unterschiedliche Querschnitte:  $\Delta p$  zu allen Formnestern gleich. „rheologische Balancierung“

natürliche  
Balancierung

## Rheologische Balancierung von Angusskanälen

| Anwendungsfall                                                                      | Kriterium                                                                                                               | Ergebnis                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <b>Mehrfachwerkzeug</b><br>Gleichzeitiges Füllende (große Anschnitte) (große Formteile) (scherempfindliche Materialien) |  |
|  | <b>Mehrfachwerkzeug</b><br>Gleichzeitiger Füllbeginn (kleine Anschnitte) (kleine Formteile) (Einfriereffekte)           |  |
|  | <b>Kombinationswerkzeug</b><br>Gleichzeitiges Füllende oder gleichzeitiger Füllbeginn                                   |  |
|  | <b>Mehrfachwerkzeug</b><br>Gleichzeitiges Füllende (Kaltkanal)                                                          |  |
|  | <b>Heißkanalwerkzeug</b><br>Gleiche Volumenströme (Heißkanal)<br>Fein-Balancierung über Düsentemperatur möglich         |  |

→ Füllbildstudie zur Visualisierung der Formnestfüllung durchführen!!

## Kräftegleichgewicht zwischen Werkzeug und Schließseinheit

Oberstes Konstruktionsgesetz:

Schwerpunkt der Auftriebskräfte im Werkzeug = Schwerpunkt aller Kräfte der Schließseinheit

im Zentrum des Angusskegels!!!

Folgen bei ungleichmäßiger Belastung

- Einseitige Öffnung der Trennebene → Schwimmhäute, Maßabweichung
- Unterschiedliche Flächenbelastung → Beschädigung der Dichtfläche
- Unterschiedliche Holmbelastung → Holmenbruch

Beispiele für Kräftegleichgewicht (Kräfteausgleich) zwischen Werkzeug und Schließseinheit:



Bild: Reihenanguss mit exzentrischem (links) und zentrischem (rechts) Angussverteiler

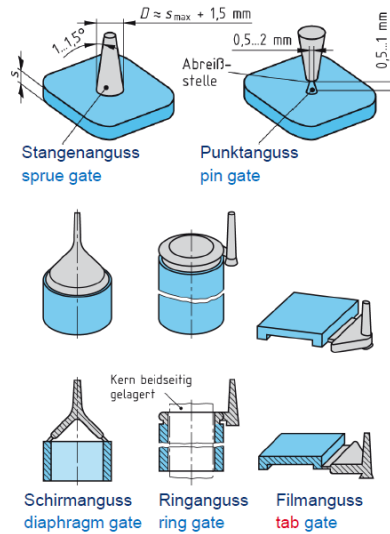
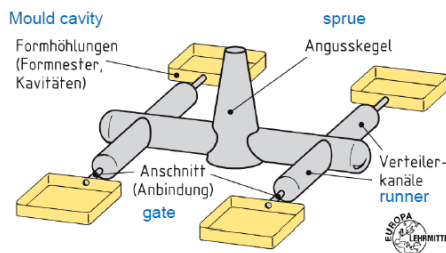
## Angussformen

Zur Abstimmung der Einflussgrößen mit den Aufgaben und Forderungen unterscheidet man folgende konstruktive Lösungsmöglichkeiten bei den Angüssen:

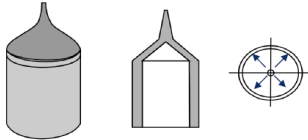
1. Angüsse, die bei der Entformung am Formteil bleiben und nachträglich spanend abgearbeitet werden müssen:
  - a. Stangenanguss
  - b. Band- und Filmanguss
  - c. Schirmanguss
  - d. Ringanguss
2. Angüsse, die beim Entformen automatisch vom Spritzling getrennt und separat entformt werden:
  - a. Tunnelanguss
  - b. Abreiß-, Punktanguss (Dreiplattenwerkzeug)
  - c. (Trennebene 1 zuerst geöffnet: Hinterschneidung notwendig)
  - d. Trennebene 2 zuerst geöffnet: Keine Hinterschneidung notwendig)
3. Angüsse, die beim Entformen automatisch vom Formteil getrennt werden und im Werkzeug verbleiben (Material im Anguss bleibt schmelzeförmig):
  - a. Heißkanalverteiler (beheizte Angussbuchsen und beheizte Düsen)
  - b. Mehretagenanguss mit Heißkanalverteiler; kann auch zu 2. gehören Entformung notwendig; großer Öffnungshub

## Beispiel diverser Angussformen

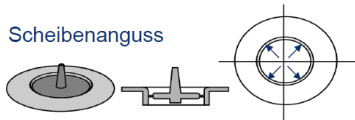
### Kaltkanalunterverteiler / cold runner



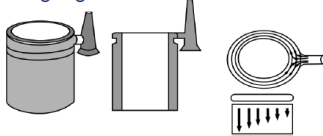
### Schirm- oder Trichteranguss



### Scheibenanguss



### Ringanguss



Beispiel:

Unterschiedliche Angussvarianten für symmetrisches Bauteil möglich

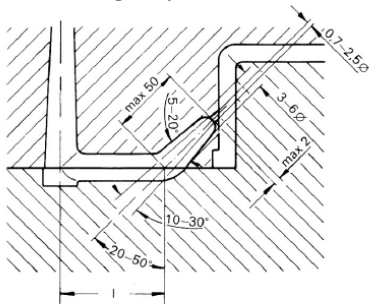
Vor-/ Nachteile sind für den jeweiligen Anwendungsfall abzuwägen z.B.

- Abfallvolumen (Angussvolumen)  
→ Abtrennungsvariante vom Anguss
- Sichtbarkeit von Bindenähten
- Füllstoff-/ Faserorientierungen  
→ Bauteilverzug

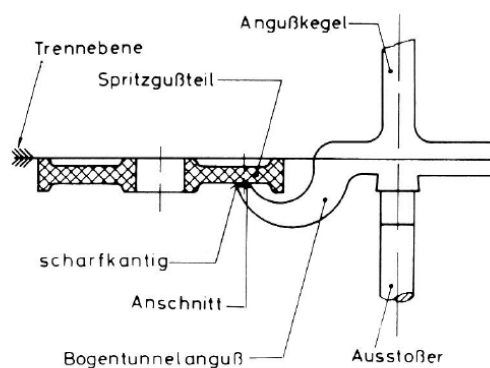


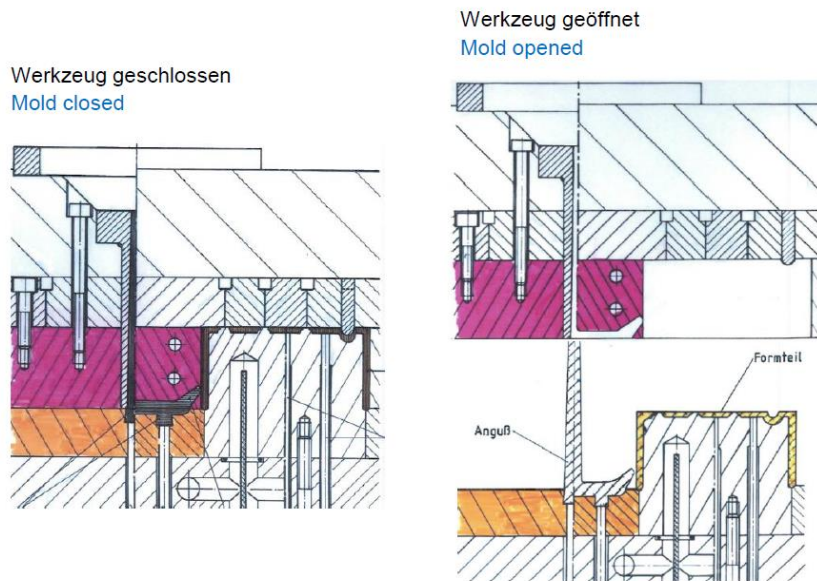
## Tunnelanguss

- Formteil und Anguss liegen in einer Werkzeuttrennebene (keine zusätzliche Trennebene)
- Durch die tunnelartige geführte Bohrung (Tunnel) entsteht eine scharfe Kante zwischen Werkzeutführung und Tunnel
- Angussystem wird beim Entformen des Spritzlings abgeschert



### Tunnelanguss mit spitzkegeliger Tunnelbohrung





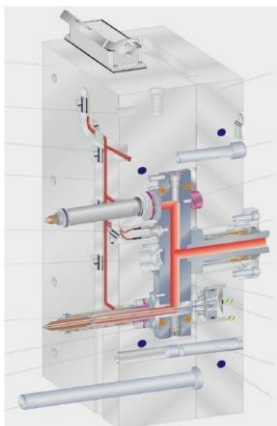
### Heißkanaltechnik

Im Heißkanalsystem wird die in den Verteilerkanälen enthaltene Masse durch Heizpatronen ständig auf Schmelztemperatur gehalten.

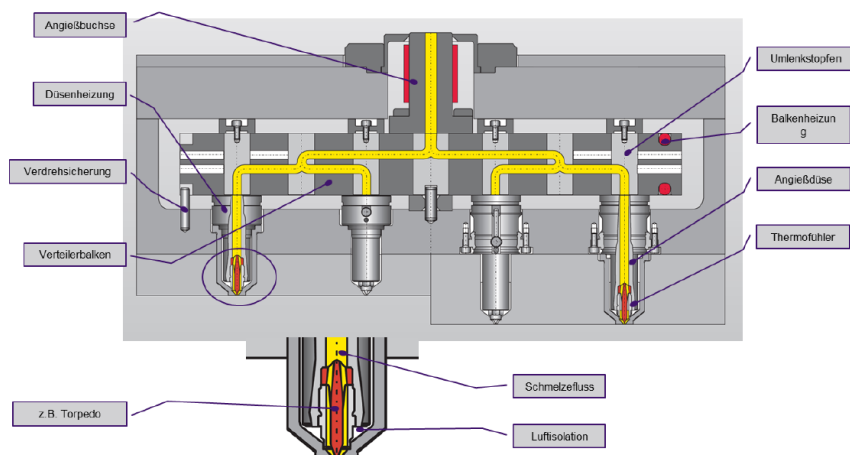
→ teuer + komplexere Prozesstechnik

Grundsätzlich wird unterschieden zwischen:

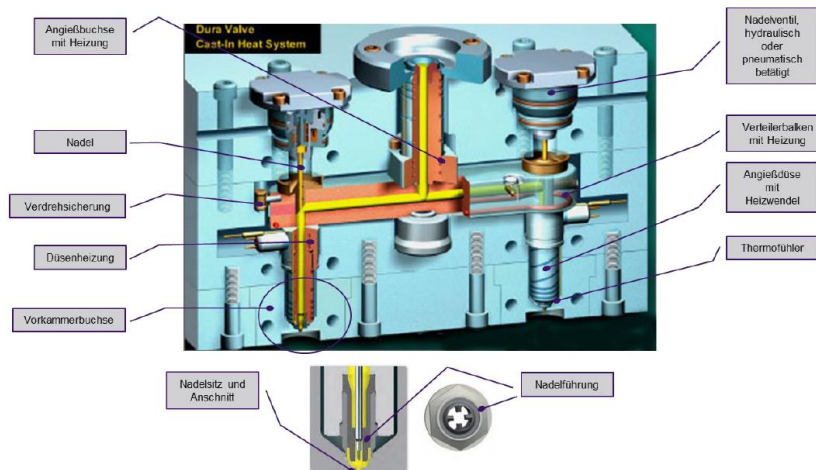
- Offener Heißkanal
- Nadelverschluss Heißkanal



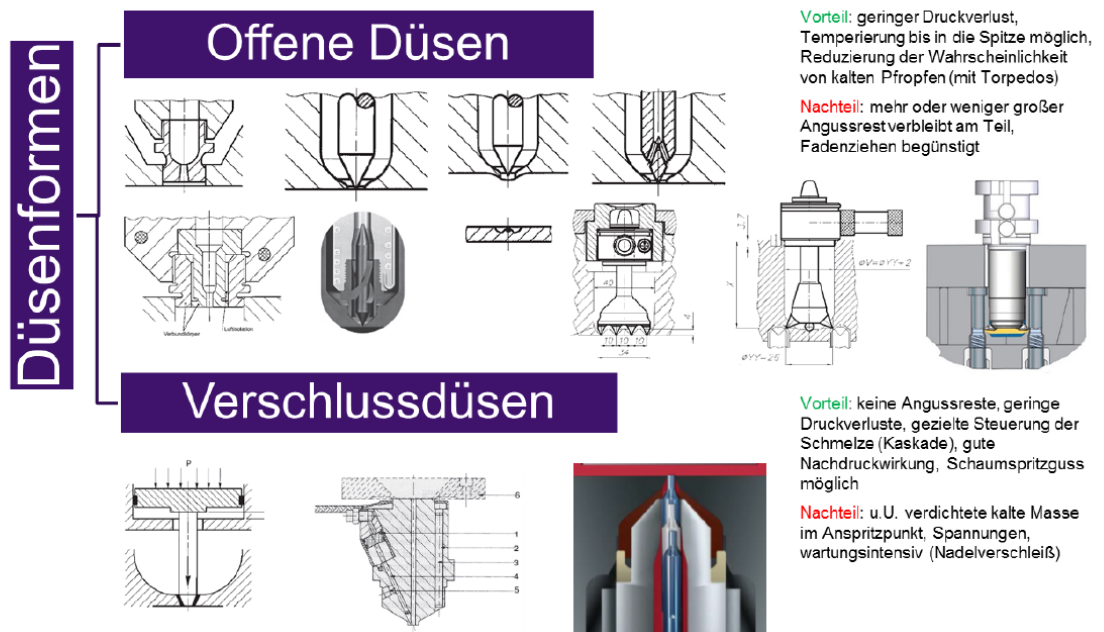
### Offener Heißkanal



## Nadelverschluss Heißkanal



## Düsenformen



## Heißkanaltechnik

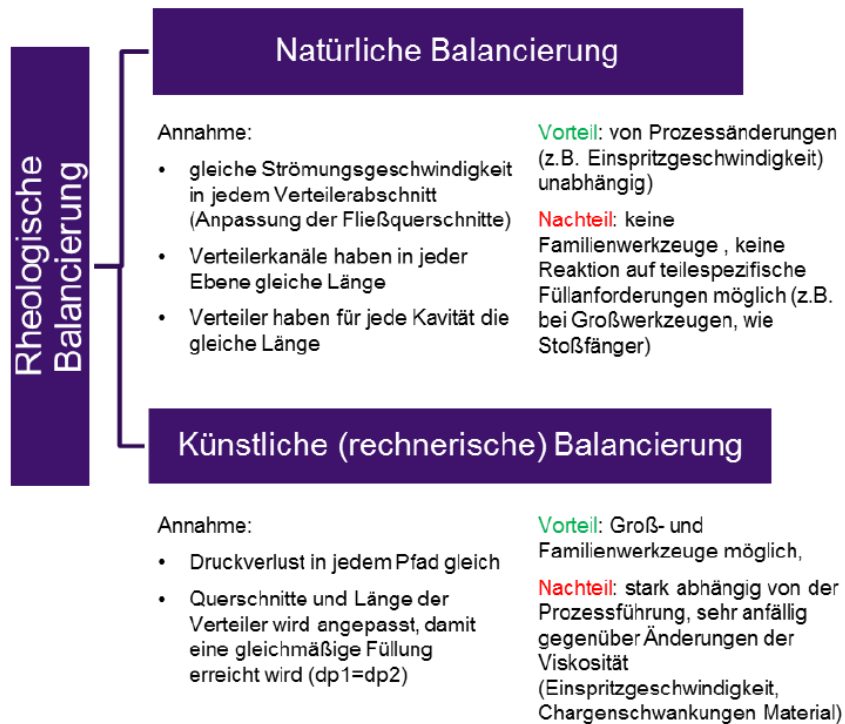
### Vorteile

- + Einsparung von Kunststoffmaterial
- + keine Angussentsorgung, keine Aufbereitung
- + Anspritzpunkte in großer Entfernung von der Plastifiziereinheit realisierbar
- + Etagenwerkzeug nur mit HK-Systemen möglich
- + Kaskadenschaltung möglich (HK-Verschlussdüsen zeitlich versetzt einspritzen)

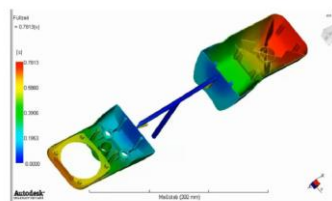
### Nachteile

- höhere Werkzeugkosten
- größere Werkzeugeinbauhöhe
- Anspritzpunkte eingeschränkt
- störanfälliger
- höherer Schulungsbedarf
- Prozessbeherrschung kritischer

## Heißkanaltechnik – Balancierung

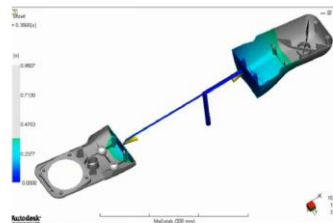


### Beispiel: Balancierung von Familienwerkzeug



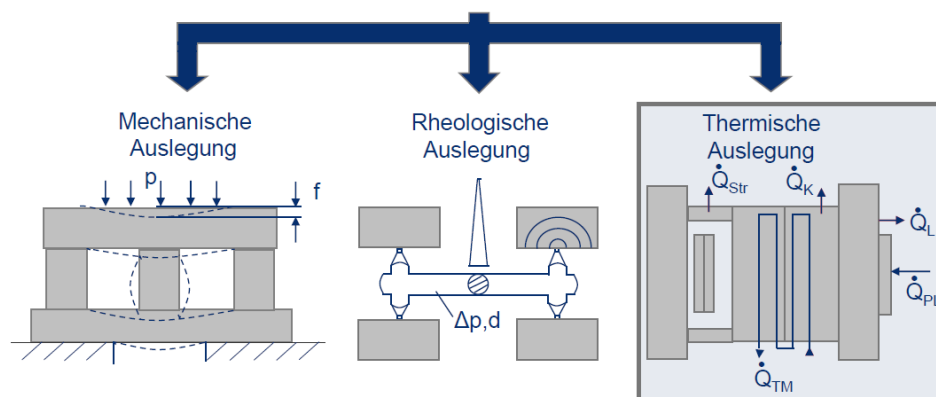
Anguss zwar natürlich balanciert, allerdings nicht optimal für Familienwerkzeuge

Anguss simulativ rechnerisch balanciert (Druckverhältnisse in den Teilen gleich)



## Thermische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen

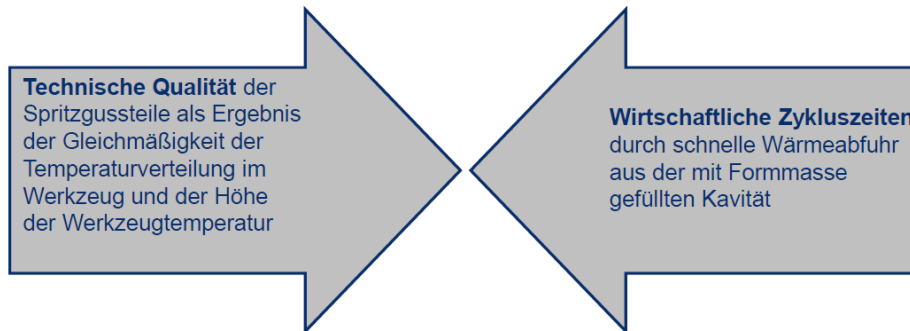
### Anforderungen an Spritzgießwerkzeuge





## Aufgaben und Forderungen eines Temperiersystems

- Aufbau einer gleichmäßigen Temperaturverteilung im Werkzeug
- Abführen der Wärme aus der mit Formmasse gefüllten Kavität



- Abkühlung soll dabei schnellstmöglich stattfinden  
→ kürzere Zykluszeit (Kostenersparnis)
- Eine homogene Abkühlung des Bauteiles ist entscheidend für das Schwindungs- und Verzugsverhalten

## Bestimmung der Kühl- und Zykluszeit von Thermoplasten

Zur Kostenvorhersage des zu fertigenden Formteils wird die Bestimmung der Zykluszeit benötigt.

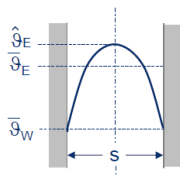
$t_{Zyk}$  = Zykluszeit

$t_K$  = Kühlzeit (Zeit von der Formfüllung bis zum Entformen des Formteils)

$t_N$  = Nebenzeit (Schließen der Form, Einspritzen, Entformen, etc.)

$$t_{Zyk} = t_K + t_N$$

Die Kühlzeit beginnt erst zum Zeitpunkt der volumetrischen Formfüllung, da während des Formfüllvorganges die abgeführte Wärmemenge mit der durch die innere Reibung (Dissipation) erzeugten nahezu im Gleichgewicht befindet.



$\vartheta_M$  = Massetemperatur nach Beendigung der Formfüllung  
 $\bar{\vartheta}_W$  = mittlere Werkzeugwandtemperatur  
 $\hat{\vartheta}_E$  = Entformungstemperatur in Formteilmite  
 $\bar{\vartheta}_E$  = mittlere Entformungstemp. über den Formteilquerschnitt  
 $s$  = Wanddicke

Für flächige Formteile (dünnwandige Platten) gilt:

teilkristalline Thermoplasten

$$t_K = \frac{s^2}{\pi^2 a_{eff}} \ln \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\hat{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right)$$

amorphe Thermoplasten

$$t_K = \frac{s^2}{\pi^2 a_{eff}} \ln \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right)$$

*nicht ausreichend*

$$\frac{\lambda}{\rho \cdot c} = a_{eff}$$

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit

$\rho$  = Dichte

$c$  = spezifische Wärmekapazität

$a_{eff}$  = Temperaturleitfähigkeit



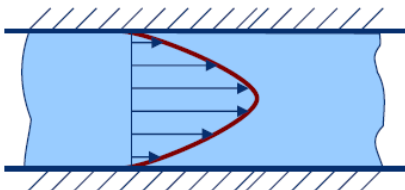
## Effektive Temperaturleitfähigkeit von Kunststoffen

| $\vartheta_w$<br>[°C] | Effektive Temperaturleitfähigkeit $a_{\text{eff}}$ [mm²/s] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------|------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                       | PP                                                         | PC     | HDPE   | LDPE   | PA 6.6 | SAN    | ABS    | PS     | PVC    | PMMA   | POM    |
| 10                    | 0,0685                                                     | 0,1065 | 0,1015 | 0,0965 | 0,0895 | 0,0858 | 0,0810 | 0,0890 | /      | 0,0798 | /1     |
| 20                    | 0,0674                                                     | 0,1069 | 0,0949 | 0,0923 | 0,0890 | 0,0856 | 0,0814 | 0,0871 | 0,0705 | 0,0782 | 0,080  |
| 30                    | 0,0664                                                     | 0,1074 | 0,0883 | 0,0881 | 0,0885 | 0,0855 | 0,0818 | 0,0851 | 0,0712 | 0,0766 | 0,0762 |
| 40                    | 0,0653                                                     | 0,1078 | 0,0817 | 0,0839 | 0,0880 | 0,0853 | 0,0822 | 0,0832 | 0,0718 | 0,0750 | 0,0724 |
| 50                    | 0,0643                                                     | 0,1083 | 0,0750 | 0,0797 | 0,0875 | 0,0852 | 0,0827 | 0,0813 | 0,0725 | 0,0734 | 0,0685 |
| 60                    | 0,0632                                                     | 0,1087 | 0,0684 | 0,0755 | 0,0870 | 0,0850 | 0,0831 | 0,0794 | /      | 0,0718 | 0,0647 |
| 70                    | 0,0621                                                     | 0,1092 | 0,0618 | /      | 0,0865 | 0,0849 | 0,0835 | 0,0774 | /      | 0,0702 | 0,0609 |
| 80                    | 0,0611                                                     | 0,1096 | 0,0552 | /      | 0,0860 | 0,0847 | /      | 0,0755 | /      | 0,0686 | 0,0571 |
| 90                    | 0,0600                                                     | 0,1101 | 0,0486 | /      | 0,0855 | 0,0846 | /      | /      | /      | 0,0670 | 0,0533 |
| 100                   | /                                                          | 0,1105 | 0,0420 | /      | 0,0850 | 0,0844 | /      | /      | /      | /      | 0,0494 |

### Anforderungen an den Temperiermittelfluss

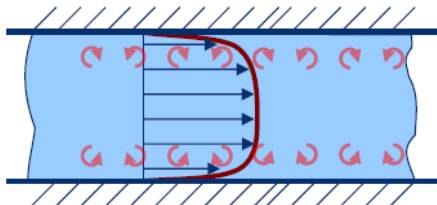
Bei laminarer Strömung: keine Quervermischung

- Wärmeübergang beruht hauptsächlich auf Wärmeleitung



Bei turbulenter Strömung: zusätzliche Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Strömungsrichtung

- bessere Quervermischung
- besserer Wärmeübergang



→ turbulente Strömung wird angestrebt!

Definition Reynoldszahl (Maß für die Turbulenz)

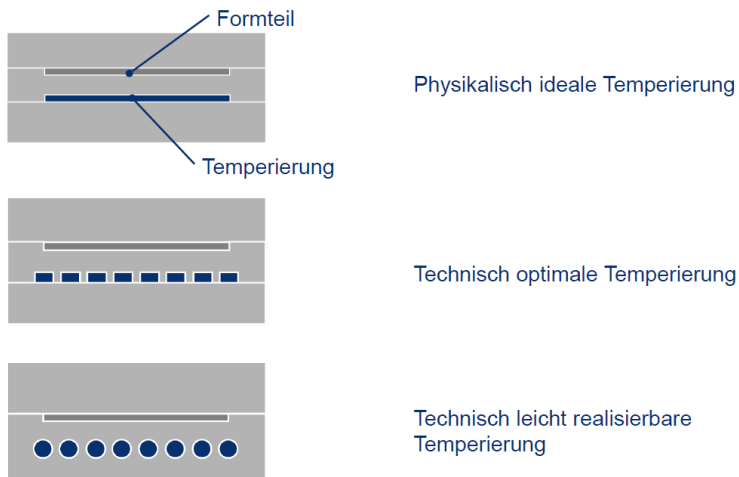
$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta}$$

$\rho$  = Dichte  
 $v$  = Geschwindigkeit  
 $d$  = charakteristische Länge  
 $\eta$  = Viskosität

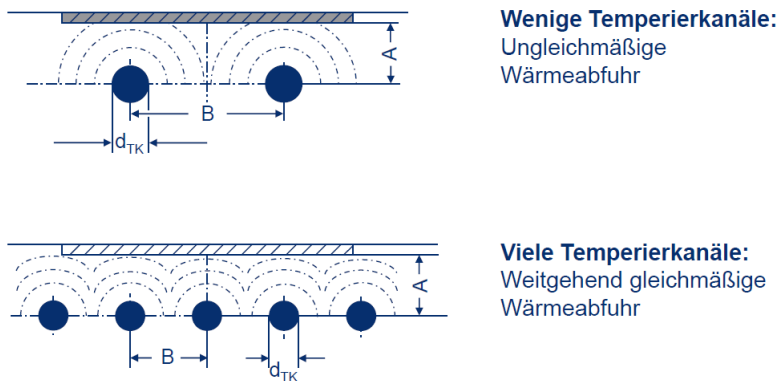
Maßnahmen zur Verbesserung des Wärmeübergangs:

- Hohe Strömungsgeschwindigkeiten
- Große durchströmte Querschnitte  
→ Achtung: Wechselwirkung mit Strömungsgeschwindigkeit!
- Niedrige Viskosität des Temperiermediums (Wasser besser als Öl)  
→ Achtung: Siedepunkt (max. 200°C mit Überdruck)!

## Ausführung von Temperierkanälen

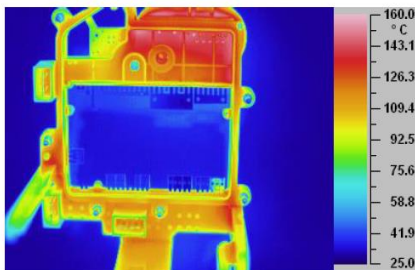


## Thermische Ausführung von Spritzgießformen

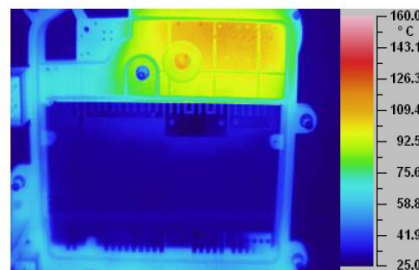


$$\text{Temperierfehler } j = f(A, B, d_{TK}, \alpha_{TM})$$

## Anwendungsbeispiel einer unzureichenden Temperierung



ca. 25-35 s nach der Entformung



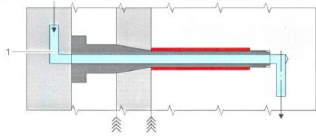
ca. 140 s nach der Entformung

- Wärmestau im spritzgegossenen Kunststoffbauteil
- Unzureichende Wärmeabfuhr kann zu schlechter Bauteilqualität oder sehr langen Zykluszeiten führen

## Temperierung von Formkernen

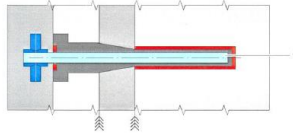
### Kleine Kerne (3-5 mm):

- Kühlung mit Luft



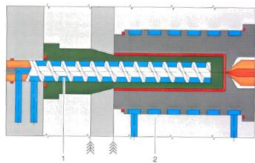
### Größere Kerne (ab 5 mm):

- Kühlung mit Kupferbolzen

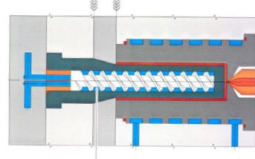


### Ab 20 mm: Einsätze aus Aluminium

- Eingängige Wendel mit Kernbohrung:

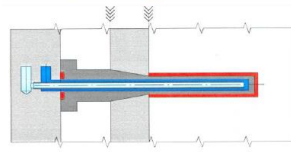


- Zweigängige Wendel:

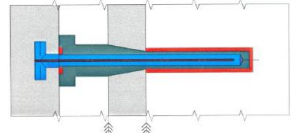


### Ab 8 mm:

- Brunnentemperierung

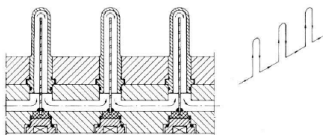


- Trennblech



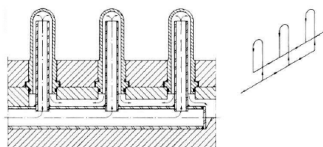
## Durchflussvarianten von Temperierkreisläufen

### Serienkühlung

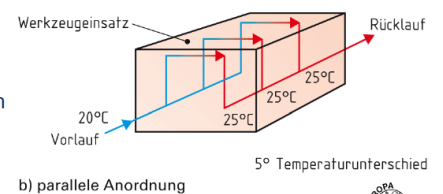
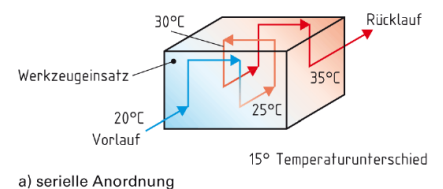


- + Sehr gute Durchflussüberwachung
- Hohe Druckverluste

### Parallelkühlung

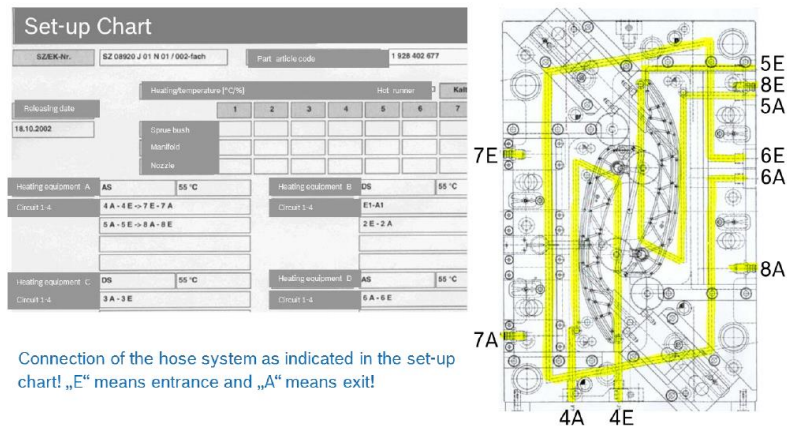


- + geringere Druckverluste
- Zusetzen von einzelnen Kreisläufen möglich



→ Wenn möglich Werkzeugtemperatur und Durchflußmenge der Temperiergeräte als Prozessüberwachung!!

## Beispiel: Kühlkreis Kennzeichnung und Anschlussplan



Thermoplastwerkzeuge haben in der Regel eine Vielzahl an Kühlkreisläufen. Daraus resultiert eine hohes Potenzial Kühlschläuche falsch anzuschließen!

→ Es muss ein Belegungsplan für das Anschließen der Kühlschläuche geben und eine eindeutige Beschriftung der Anschlüsse am Werkzeug.

## Temperierung in Formteilecken (Anpassung)

Allgemein:

Unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten führen zu unterschiedlichen Schwindungen und Eigenspannungen

Gründe:

- die verschiedenen Formteilbereiche erstarren bei verschiedenen Drücken
- die später erstarrenden Bereiche werden durch die früher erstarrenden Bereiche an der Schwindung gehindert.

## Positionierung der Kühlkanäle entlang der Werkzeugoberfläche

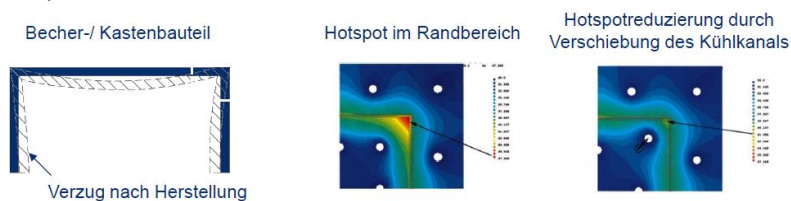
Kühlwasserbohrungen bei Werkzeugen sind geradlinig und können nicht „um die Ecke“ gebohrt werden.

→ Daher ungleichmäßige Werkzeugoberflächentemperatur

## Konturnahe Temperierung

- Homogenes Abkühlen des Bauteiles (geringerer Verzug/Spannungen)
- Temperierkanäle nahe von Bohrungen und Auswerferstiften
- Vermeidung von Hotspots bei Schiebern, langen Stempeln/Formkernen (Verkürzung der Zykluszeit)

## Beispiel



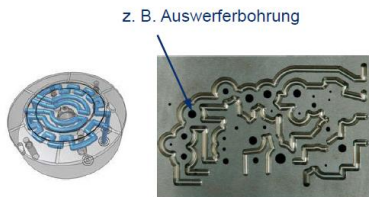
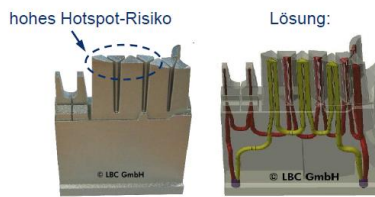
## Kontornahe Temperierung

### Rapid Tooling

- Lasergenerierter Schichtaufbau
- Sehr geringe Kühlkanalquerschnitte
- 3D-Geometrien möglich

## Vakuum Löttechnik

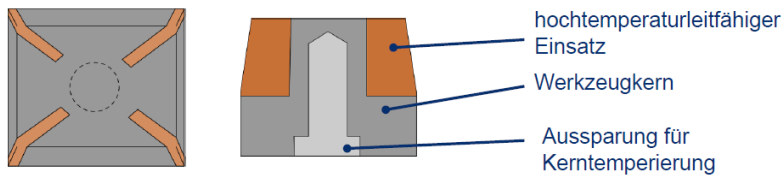
- Schichtweiser Aufbau von Metallplatten
- Sehr geringe Kühlkanalquerschnitte
- 2½D-Geometrien möglich



## Alternative Temperierlösungen

### Partielle Anpassung der Wärmeströme

- Wärmeleitfähigkeit in dem Bereich zwischen der Ecke und der Temperierkanalwand verbessern (z.B. Kupfer-Berillium-Einsätze)



- Veränderung der Bauteilgeometrie  
→ Vermeidung des Verzugs durch Änderung der Eckengeometrie



## 12. Spritzgießwerkzeuge II

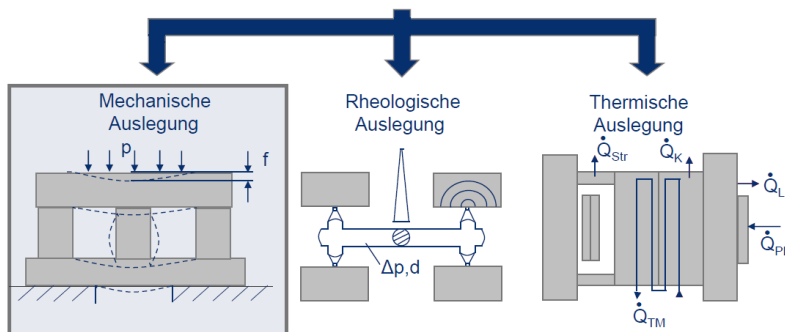
### Lernziele

Nach dieser Veranstaltung sollten Sie ...

- Sich mit der mechanischen Auslegung von Spritzgießwerkzeugen auskennen,
- einfache Füllbilder selbst anfertigen können,
- die Möglichkeiten zur Entlüftung erlernt haben,
- das generelle Vorgehen einer Werkzeugkonstruktion kennen.

### Mechanische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen

#### Anforderungen an Spritzgießwerkzeuge



#### Belastungsursachen während des Spritzgießzyklus

| Belastungsart                                    | Zyklusphase(n)                                                |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Schließkraft<br>Düsenanpresskraft                | Schließen, Aggregat vorfahren<br>Einspritzen<br>Nachdruckzeit |
| Forminnendruck                                   | Einspritzen<br>Nachdruckzeit                                  |
| Reibungskräfte zwischen<br>Formteil und Werkzeug | Öffnen<br>Entformung                                          |

→ Die Hauptbelastungen (Formteillinnendruck, Schließkraft) wirken während des Einspritzens und der Nachdruckzeit.

→ Die Schließkraft muss das Auftreiben des Werkzeugs durch den Formteillinnendruck verhindern und ist somit immer die größte angreifende Kraft.

#### Einfluss der Belastungen auf Werkzeug und Maschine

##### Werkzeugbeschädigungen

- Bleibende (plastische) Verformungen im Bereich der Trennebene
- Flächenpressung bei Schwimmhäuten
- Beschädigung durch Überlastung
- ➔ Überschreiten Dehngrenze von Stahl bei  $\epsilon = 0,2 \%$  durch
  - hohe Forminnendrucke
  - hohe Schließkräfte
  - asymmetrische Werkzeugbelastungen
  - extreme thermische Inhomogenitäten

##### Maschinenverschleiß

- Holmdehnung
- Verkipfung des Werkzeugs zur Aufspannplatte, asymmetrische Belastungen

→ *Oberstes Konstruktionsprinzip*: Resultierende der Auftriebskräfte muss im Schwerpunkt der Maschinenaufspannplatte liegen!

### Einfluss der Belastungen auf das Formteil

Formteilfehler durch zu hohe Belastungen

- Entstehung von Trennebenenspalten  
→ Gratbildung / Schwimmhäute  
→ zulässige Spaltenweiten für
- teilkristalline Thermoplaste: 0,015 bis 0,020 mm
- amorphe Thermoplaste: 0,025 bis 0,030 mm
- Duroplaste: < 0,015 mm
- Schwindung > Werkzeugverformung in Querrichtung  
→ Entformungsprobleme  
→ Oberflächenfehler (Auswerferabdrücke, Auszugslinien)
- Restdruck im noch nicht erstarrten Bauteilinneren (plastische Seele)  
→ Aufblähen des Formteils  
→ Zugeigenspannungen in den Oberflächenschichten
- Maßabweichungen bei großer Werkzeugverformung

### Mechanische Belastungen

Spritzgießwerkzeuge sind hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt.

- Formteillinnendrucke von bis zu 2.000 bar  
→ treiben Werkzeughälften auseinander

#### Füllphase:

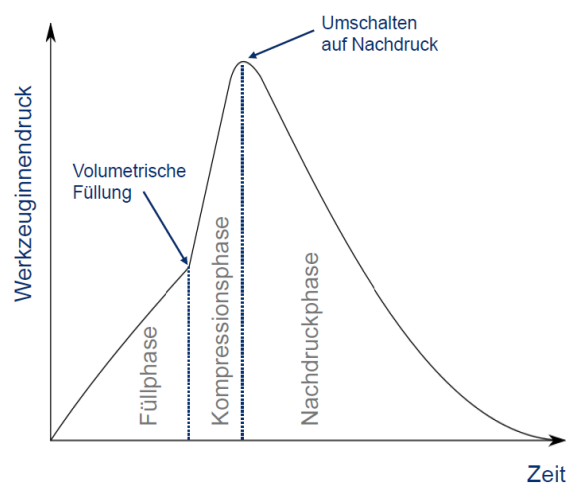
- Schmelzebeanspruchung
- Determination von Oberflächenqualität, Kristallisation, Orientierungen

#### Kompressionsphase:

- Determination der Maßgenauigkeit
- Gratbildung
- Werkzeugschäden

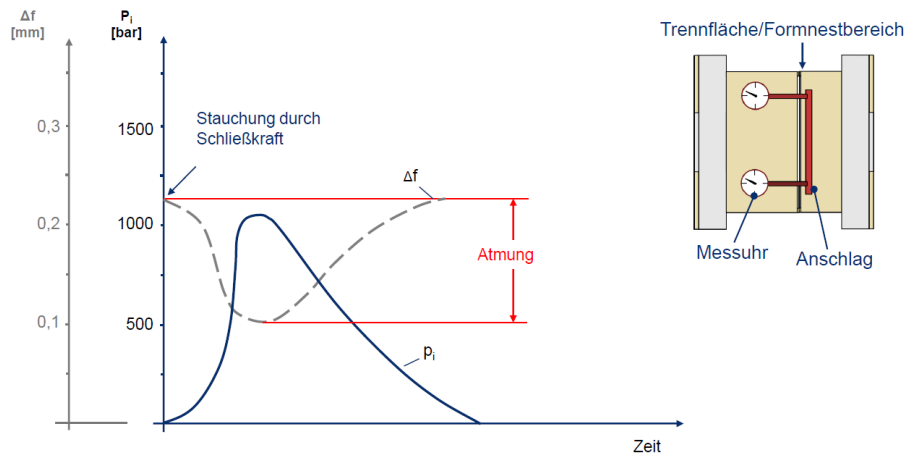
#### Nachdruckphase:

- Verdichtung
- Vorbeugung von Einfallstellen, Verzug, Schwindung





## Druck-Verformungs-Schaubild

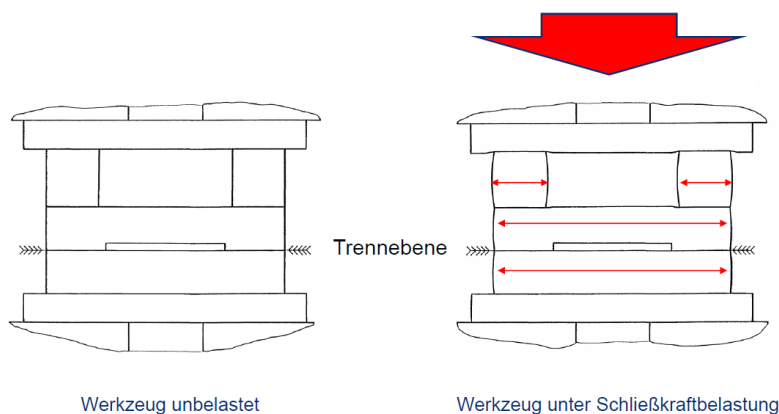


## Mechanische Belastung

Spritzgießwerkzeuge sind hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt

- Formteilinnendrucke von bis zu 2000 bar  
→ treiben Werkzeughälften auseinander
- Entsprechende Schließkraftaufbringung, um Werkzeug geschlossen zu halten

## Werkzeugverformung durch Schließkraft



## Mechanische Belastungen

Spritzgießwerkzeuge sind hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt

- Formteilinnendrucke von bis zu 2000 bar  
→ treiben Werkzeughälften auseinander
- Entsprechende Schließkraftaufbringung, um Werkzeug geschlossen zu halten
- Resultierende Verformung parallel und quer zur Fließrichtung
- Anwendung der allgemeinen Formeln und Methoden der Festigkeitslehre  
→ Belastungsgrundfälle  
→ Federersatzmodelle (Hook'sches Gesetz:  $\sigma = E \times \epsilon$ )  
→ Superposition
- Üblicherweise kein Erreichen der Festigkeitsgrenzen von Stahl  
→ Dimensionierung gegen Verformung genügt  
→ zulässige Spannungen im Werkzeug müssen i.d.R. nicht berücksichtigt werden

## Abschätzen der Belastungen

### Schließkraft

- Die Schließkraft muss größer sein, als die Auftriebskraft durch den maximalen Werkzeuginnendruck zum Umschaltzeitpunkt auf Nachdruck:

$$F_{\text{schlie\ss}} \geq p_{\text{umschalt}} \times A_{\text{proj}}$$

- Nach oben hin lässt die maximal nötige Schließkraft sich anhand des Drucks im Schneckenorraum abschätzen:

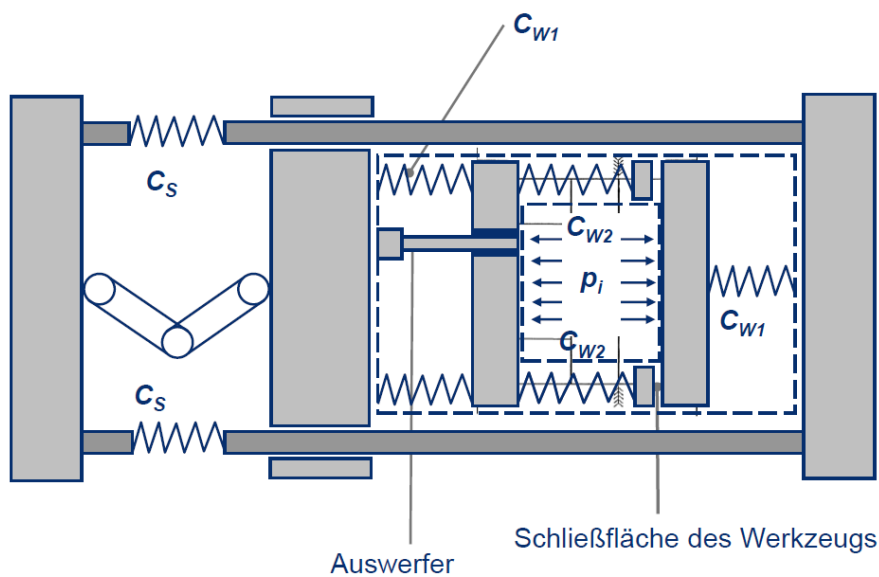
$$F_{\text{schlie\ss}} \leq p_{\text{sv}} \times A_{\text{proj}}$$

### Allgemeine Festigkeitslehre

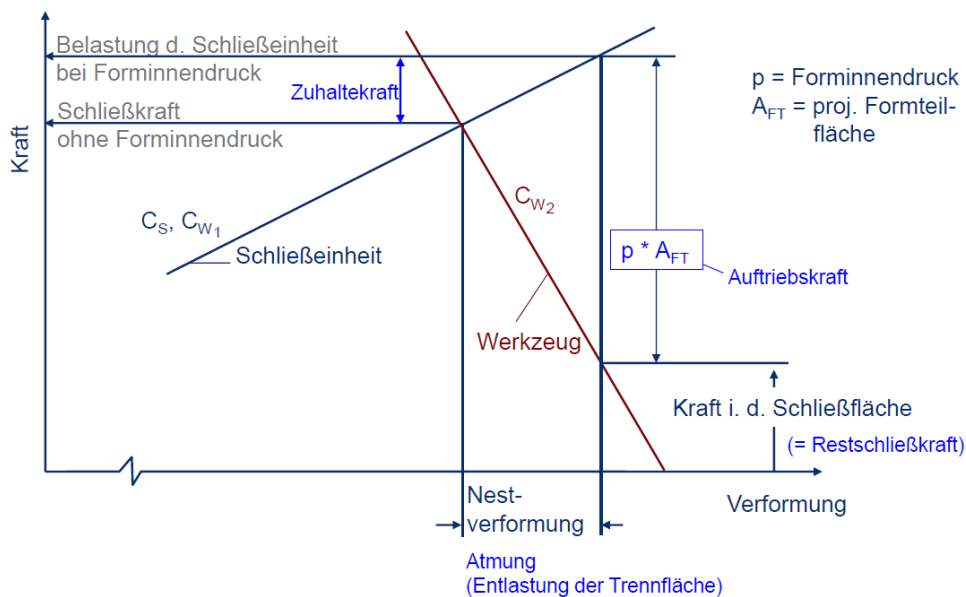
- Stahl verhält sich ideal elastisch -> Anwendung von Federersatzmodellen
- Das Hook'sche Gesetz stellt einen Zusammenhang zwischen wirkender Kraft  $F$ , Federkonstante  $C$  und resultierender Verformung  $\Delta l$  her:

$$F = C \cdot \Delta l$$

### Schematische Darstellung der belasteten Komponenten



### Kraft-Verformungs-Diagramm



## Füllbildermittlung

### Antizipation des Füllvorgangs bei der Werkzeuggestaltung

- Einfluss der Formteilkfüllung auf die Qualität von Spritzgussbauteilen
- Entstehung von Bindenähten
- Einschluss von Luft (Diseleffekt, sog. „Brenner“)

→ Kritische Stellen vorher identifizieren und geeignete konstruktive Maßnahmen ergreifen!

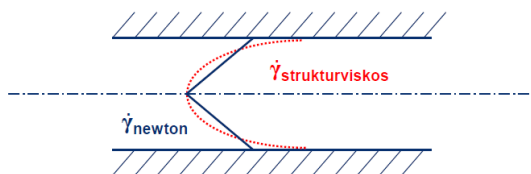
### Anwendung des Huygens'schen Prinzips

- Vereinfachte Annahme: Füllvorgang verhält sich wie Wellenausbreitung
- Huygens'sches Prinzip: jeder Punkt einer Wellenfront ist Ursprung einer neuen Welle.
- Konsequenz: gleichmäßige Ausbreitung der Wellen- bzw. Fließfront in konzentrischen Kreisen
- „Brechungseffekte“ bei Geometrieänderungen durch unterschiedliche Strömungswiderstände

### Vereinfachte Konstruktion des Füllvorgangs

#### Vereinfachende Annahmen

- Verwendung Newton'scher Strömungsformeln
- Isothermer Füllvorgang
- Auswirkung der seitlichen Kanalwände bei rechteckigen Querschnitten ist vernachlässigbar
- Druckverlust durch Dehnströmung ist vernachlässigbar



### Fließfrontverlauf bei Ausbreitung durch zwei Geometrien

- Das Hagen-Poiseuille-Gesetz gibt den Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Druckgradienten einer Strömung an:

$$\Delta p = \frac{12 \times \dot{V} \times \Delta l \times \eta}{B \times s^3} \quad \text{bzw.} \quad \Delta p = \frac{8 \times \dot{V} \times \Delta l \times \eta}{\pi \times r^4}$$

(rechteckiger Querschnitt)

(Kreisquerschnitt)

- Einführung der mittleren Fließgeschwindigkeit über dem Kanalquerschnitt:

$$\dot{V} = \bar{v}_x \times B \times s \quad \text{bzw.} \quad \dot{V} = \bar{v}_x \times \pi \times r^2 \quad \text{mit} \quad \bar{v}_x = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

### Fließfrontverlauf bei Ausbreitung durch zwei Geometrien

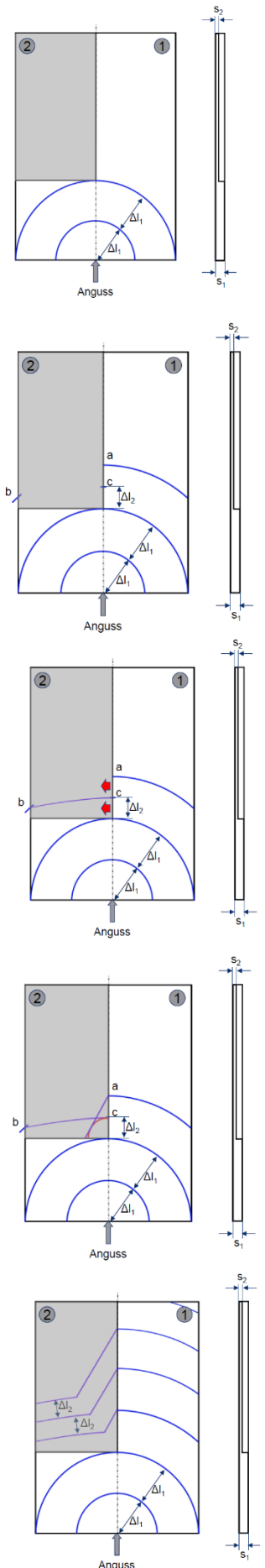
$$\Rightarrow \Delta p \sim \frac{\bar{v}_x \times \Delta l \times \eta^{g-1}}{s^2} \quad \text{bzw.} \quad \Delta p \sim \frac{\bar{v}_x \times \Delta l \times \eta^{g-1}}{r^2}$$

- Annahme gleichen Druckverlusts ( $\Delta p_1 = \Delta p_2$ ) in alle Fließrichtungen für  $\Delta t$ :

$$\Rightarrow \frac{\Delta l_1}{s_1} = \frac{\Delta l_2}{s_2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta l_1}{r_1} = \frac{\Delta l_2}{r_2}$$

### Beispiel für Fließfrontkonstruktion bei einfachen, abwickelbaren Teilen

- Ebene Platte mit Bereichen unterschiedlicher Wanddicke
- Ausbreitung der Fließfront im Bereich 1 in konzentrischen Kreisen (Mittelpunkt = Anguss) mit jeweiligem Abstand  $\Delta l_1$
- Die Schnittpunkte des nächsten Kreises in Bereich 1 mit dem Bereich 2 ergeben die Stützstellen a und b.
- Der Fließweg  $\Delta l_2$  aus ergibt Stützstelle c.
- Konstruktion eines Kreissegments durch b und c. Der Mittelpunkt für diesen Kreis liegt auf der Mittel- senkrechten der Strecke bc und der Symmetrieachse durch den Anguss.
- Bislang noch Vernachlässigung des Schmelzefflusses aus Bereich 1 in Bereich 2 von der Seite
- Kreis mit Radius  $\Delta l_2$  um Berührungspunkt der alten Fließfront mit Bereich 2
- Tangente aus Stützpunkt a mit diesem Kreis ergibt Fließfront der seitlich eintretenden Schmelze
- Für den weiteren Verlauf der Fließfront wird das Verfahren entsprechend wiederholt.
- Bei allen abwickelbaren Teilen kann mit dieser vereinfachten Methode ein Füllbild in guter Näherung konstruiert werden.
- Bei benachbarten Seiten, die durch die ebene Abwicklung nicht mehr nebeneinander liegen, muss das Überströmen berücksichtigt werden!

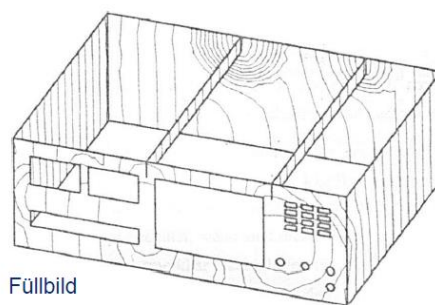
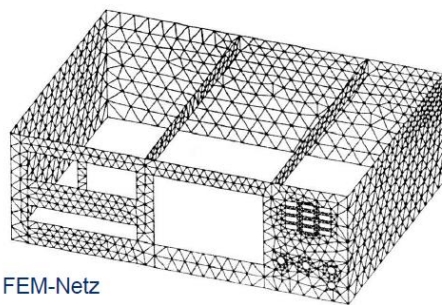


### Anwendungsgrenzen

- Keine Berücksichtigung der Kontinuität durch die Annahme gleicher Druckgradienten  
→ unkritisch bei geringen Wanddickenunterschieden  
→ Bei Bauteilen mit großen Wanddickensprüngen müssen die Änderung der Druckgradienten und die Kontinuität berücksichtigt werden (hoher Rechenaufwand).
- Einfriereffekte in unterschiedlichen Geometrien können nicht ausreichend erfasst werden  
→ ebenfalls vor allem für Bauteile mit hohen Wanddickensprüngen problematisch
- Füllbilder sind nicht gleichzusetzen mit Simulationen! Sie dienen vor allem einer ersten Abschätzung kritischer Bereiche im Werkzeug und sind nicht exakt.

### Füllbildermittlung mit Rechnern

- Füllbildermittlung auf Basis exakter Berechnungen auf Basis am Rechner möglich.
- Finite-Elemente-Methode auf Basis von Energie-, Impuls- und Massenerhaltungssatz.
- Schnelle Variation von Angusszahl und -lage möglich zur Optimierung des Füllverhaltens.



### Entlüftung von Werkzeugen

#### Grundsätzliches

Eingespritzte Schmelze muss die Luft in der Kavität verdrängen können!

Probleme bei unzureichender Entlüftung:

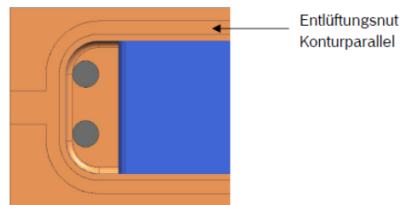
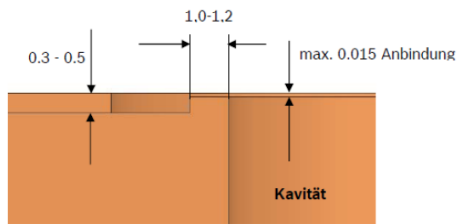
- Brandstelle
- Lunker
- Partiiell nicht voll ausgespritzte Formteile
- Oberflächenänderungen
- Beeinträchtigung Formteilstärke (z. B. Bindenahtfestigkeit)

Kritische Stellen, die entlüftet werden sollten

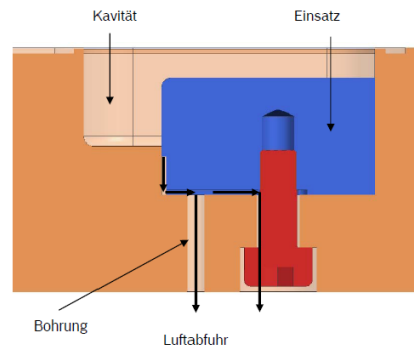
- Werkzeugtrennebene
- Fließwegende
- Zusammenflussstellen
- Vertiefungen (Sacklöcher, Rippen)
- Auswerfer

## Designregeln

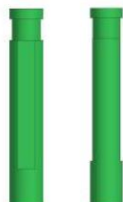
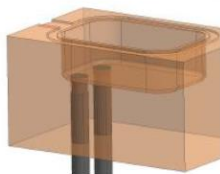
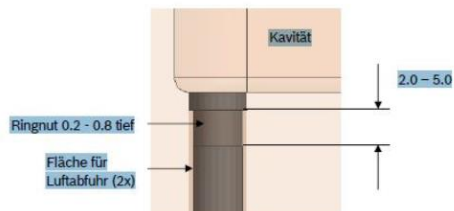
- Entlüftung der Kavität



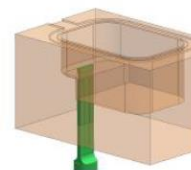
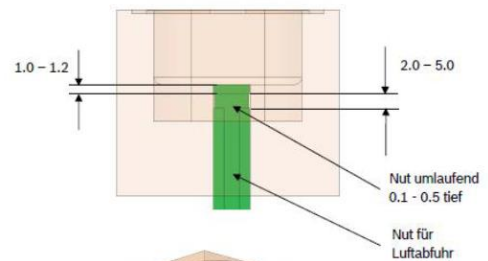
- Entlüften der Kavität über Einsatz



## Designregeln – Entlüften von Auswerfern

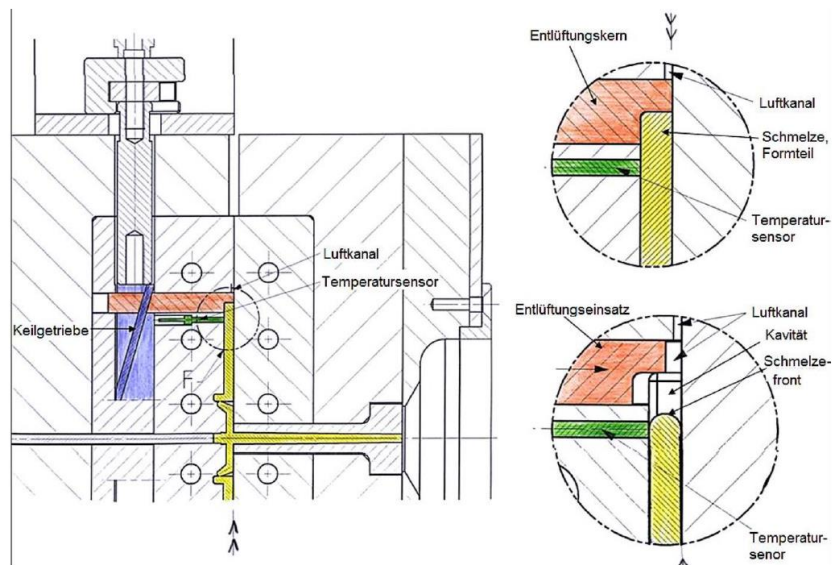


Auswerfer (rund)

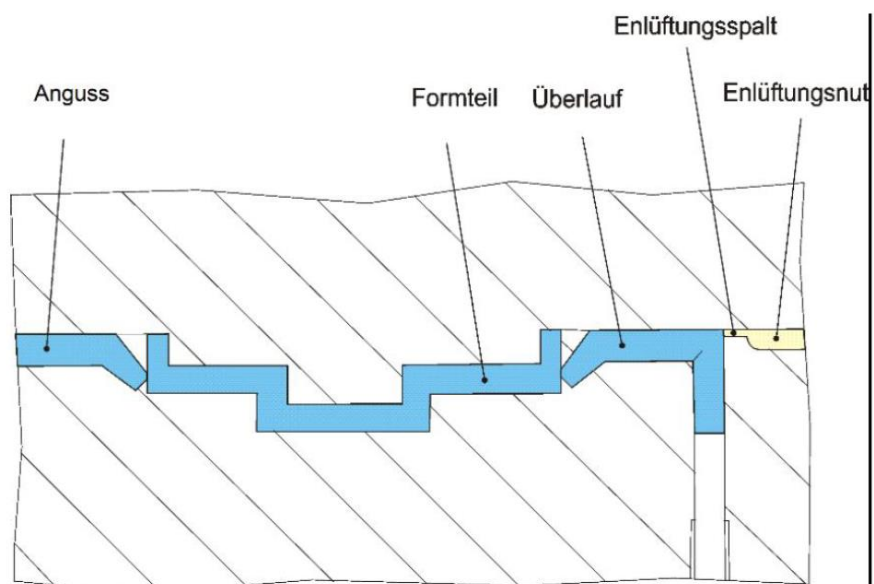


Flachauswerfer

## Aktive Entlüftung



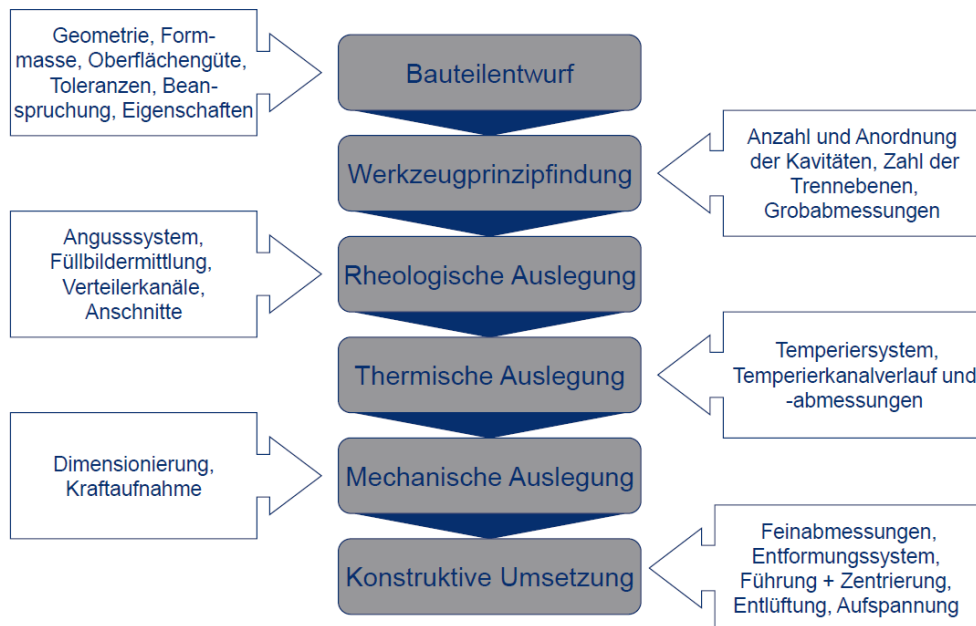
## Selbsttrennender Überlauf (Tunnelanguss)



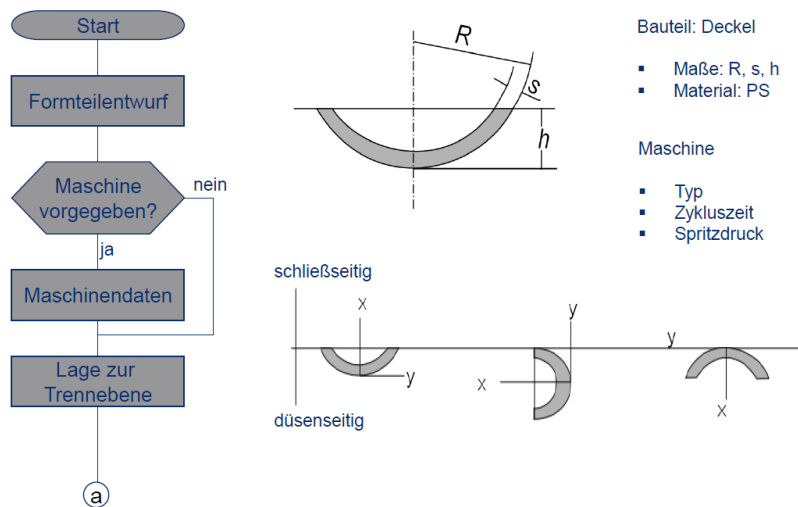


## Entwicklungsschritte bei der Konstruktion von Spritzgießwerkzeugen

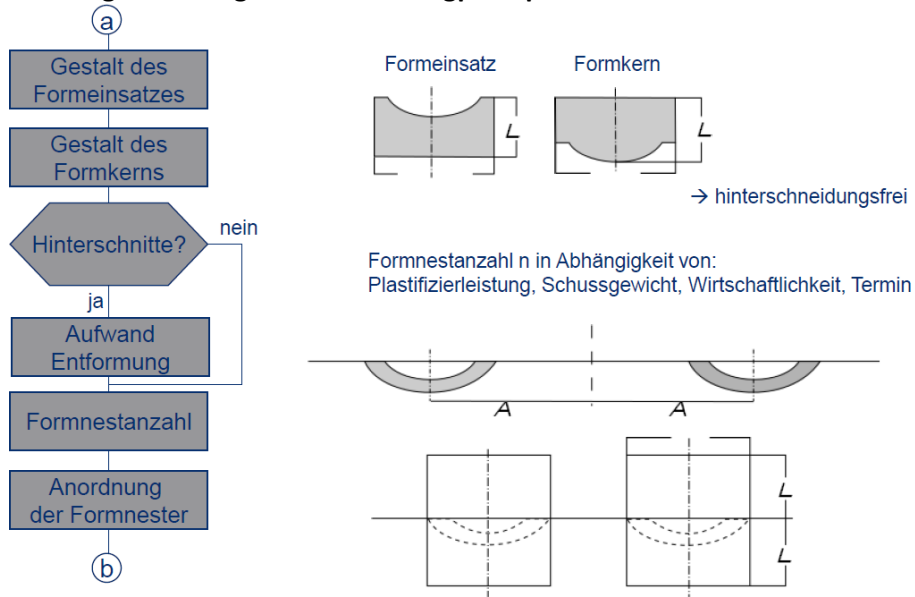
### Übersicht Entwicklungsschritte



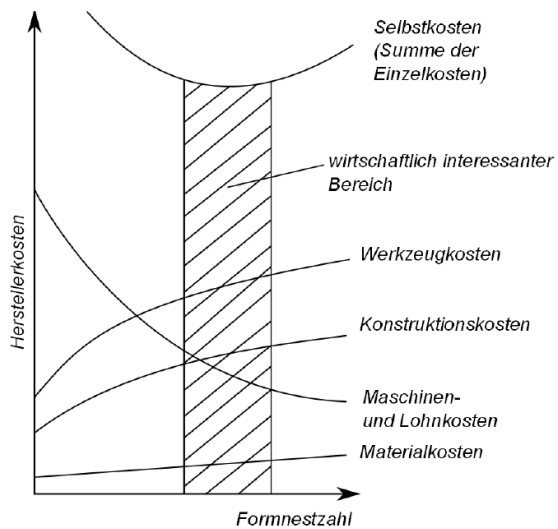
### Entwicklungs-Flussdiagramm: Bauteilentwurf



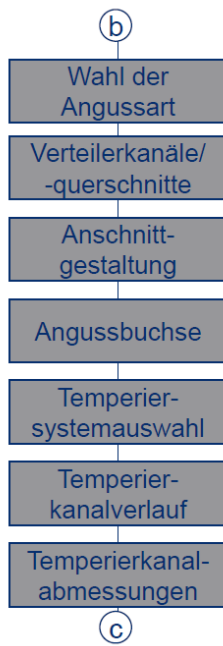
## Entwicklungs-Flussdiagramm: Werkzeugprinzip



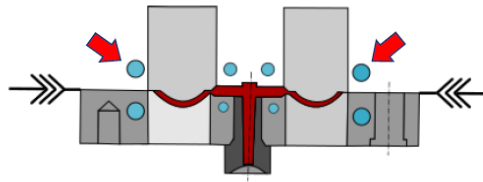
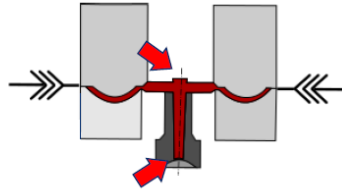
## Anzahl Formnester: Auswahlkriterien



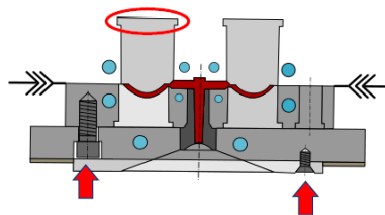
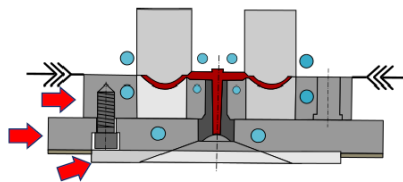
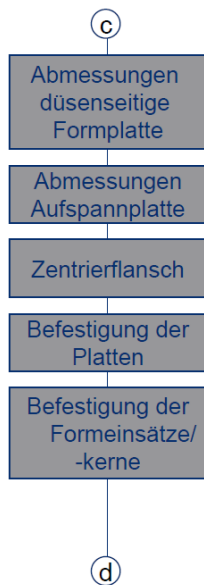
## Entwicklungs-Flussdiagramm: rheologische + thermische Auslegung



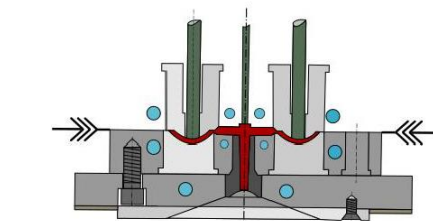
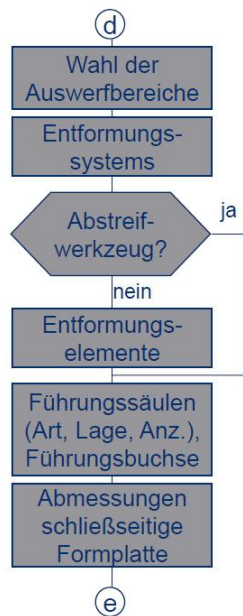
→ Stangenanguss mit Punktanschnitt



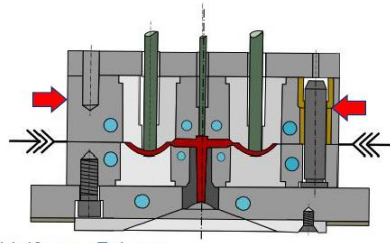
## Entwicklungs-Flussdiagramm: mechanische Auslegung



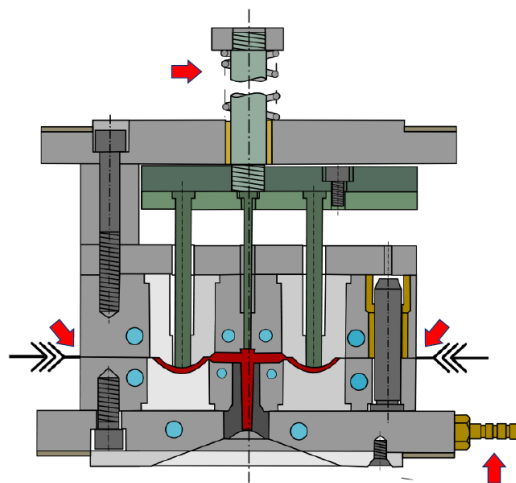
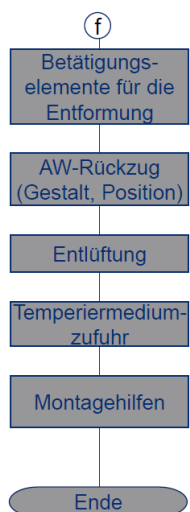
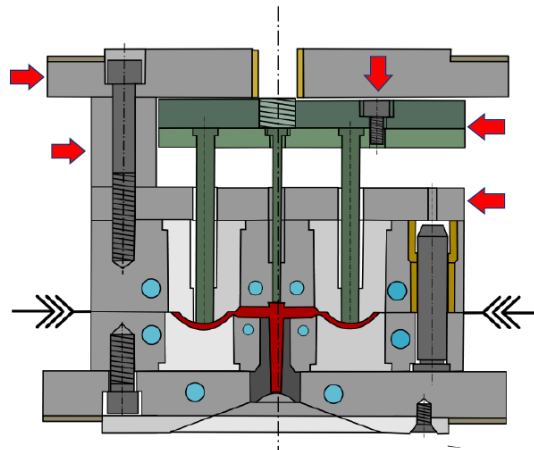
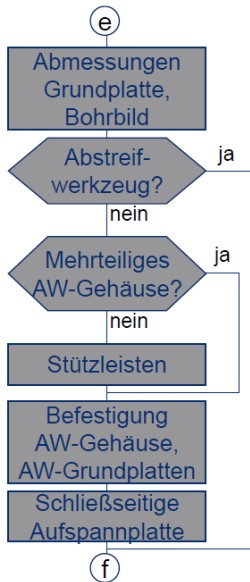
## Entwicklungs-Flussdiagramm: konstruktive Umsetzung



- Kriterien:
- Auswerfermarkierungen
  - Stark haftende Bereiche
  - Aufwand Entformungssystem



Verschleißarme Führung  
z.B. Messinghülse mit gehärteter Führungssäule



## Zusammenfassung

### Anforderungen an Spritzgießwerkzeugen

- Aufnehmen, Verteilen und Ausformen der Schmelze
- Abkühlen und Auswerfen des Bauteils
- Kräfte aufnehmen, Bewegungen übertragen, Werkzeugteile führen

### Aufbau/ Funktionskomplexe

- Angussystem
- Formnest
- Temperiersystem
- Führung und Zentrierung
- Entformungssystem
- Bewegungsübertragung
- Maschinen- und Kraftaufnahme

### Rheologische Auslegung

- Einspritzdruck > Druckverluste in Anguss und Werkzeug
- Ausbalancierung des Verteilersystems: gleicher Druckverlust für alle Verteilerwege
- Kräftegleichgewicht zwischen Werkzeug und Schließereinheit: Schwerpunkt der Auftriebskräfte = Schwerpunkt der Kräfte i.d. Schließereinheit
- Auslegung der Kavität durch Zerlegung in Basisgeometrien

### Thermische Auslegung

- Aufgaben des Temperiersystems:
- Gleichmäßiges Temperaturprofil für verzugsfreie Bauteile
- Rasches Abführen der Schmelzewärme
- Zielkonflikt: Bauteilqualität vs. Zykluszeit

### Mechanische Auslegung

- Auslegung gegen Verformung durch Werkzeuginnendruck und Schließkraft
- Anwendung der klassischen Festigkeitslehre

### Füllbilder

- Fließfrontverlauf nach Wellenausbreitungstheorem nach Huygens
- Füllbilder erlauben eine vorherige Abschätzung kritischer Stellen (Bindenähte, Brenner) bei der Werkzeugplanung

### Heißkanäle

- Temperierung des Angussystems → Material verbleibt in Schmelzeform
- Materialeinsparung und geringere Nachbearbeitung, da Anguss nicht entformt und entsorgt werden muss

### Entwicklungsschritte

- Bauteilentwurf
- Werkzeugplanung
- Rheologische Auslegung
- Thermische Auslegung
- Mechanische Auslegung
- Konstruktion

## 13. Konstruktion Prozesssimulation Spritzgießen

### Lernziele

Nach dieser Veranstaltung sollten Sie ...

- wissen, welche Dinge es bei der Bauteilkonstruktion zu beachten gilt,
- Toleranzen und Abnahmebedingungen anwenden können,
- den Nutzen der Prozesssimulation erkannt haben,
- verstanden haben, wie die Prozesssimulation im Allgemeinen funktioniert,
- die am häufigsten auftretenden Spritzgießfehler kennen und wissen, wie man sie verhindern kann.

### Konstruktionsrichtlinien

#### Wanddicke

- Einfallstellen: Bei der Verfestigung des Kunststoffs in der Form härtet dieser von außen (von der Formseite) nach innen aus. Aufgrund des Zusammenziehens führt dies in dickwandigen Abschnitten zu einer nach innen gerichteten Zugbelastung, die zu Einfallstellen in der Oberfläche des Teils führen kann.
- Teilverformung: Spannungen zwischen dick- und dünnwandigen Abschnitten führen zur Verformung des Teils, da die dünnwandigeren Abschnitte schneller Erstarren als dickwandigere.

#### Materialanhäufungen vermeiden

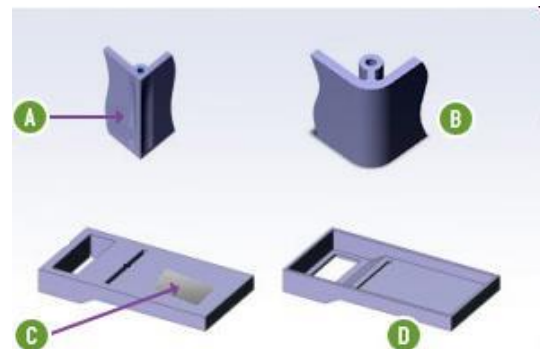
Der Einsatz von geringeren, einheitlichen Wandstärken schränkt das Auftreten von Einfallstellen ein.

**A** Anschlussteil in der Ecke führt zur Einsinkung

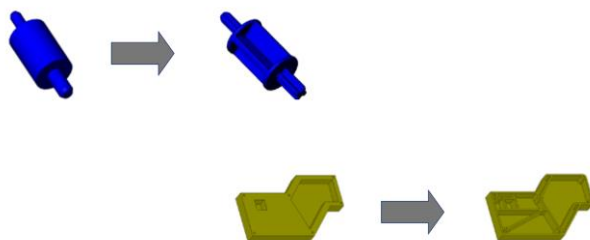
**B** Dünnere Wände am Anschlussteil verhindern Einfallstellen

**C** Dicke Wände führen zu Einfallstellen, Verformung und übermäßiger Schwindung

**D** Dünnere Wände ergeben präzise Teile



#### Entkernen



#### Verformungen

- Verformungen durch Spannungen in Übergangsstufen zwischen Wandstärken können durch die Verwendung einer Rampe verbessert werden.

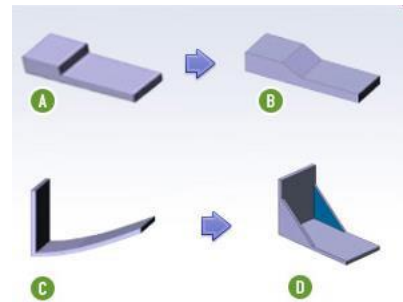
- Versteifungen in Ecken und Winkeln können die Vermeidung von Verformungen unterstützen.

**A** Hohe Spannungs-konzentrationen

**B** Reduzierte Spannungs-konzentrationen

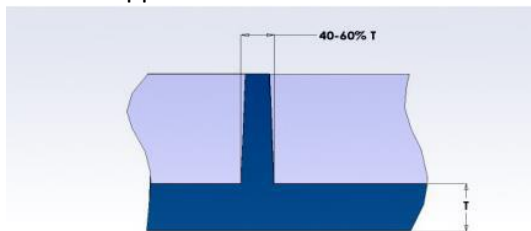
**C** Dünnere Wände führen zur Schwindung beim Abkühlen

**D** Versteifungen bringen zusätzliche Stabilität und minimieren Verformungen



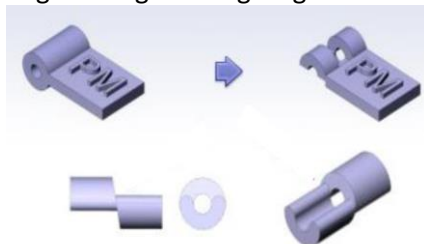
### Verrippungen

- Dünne Rippen an dickeren Wänden erhöhen möglicherweise die Formsteifigkeit, gleichzeitig können diese jedoch auch zu Einfallstellen an der Wandaußenseite führen.
- Rippen/Wandstärke-Verhältnisse beachten - Um Einfallstellen zu verhindern, sollte die Rippenstärke etwa die Hälfte der Wandstärke betragen.



### Hinterschneidungen vermeiden

Bei einem Teil mit Hinterschneidungen sind Formteile notwendig, die seitlich und abgewinkelt zur Zugrichtung herausgezogen werden.

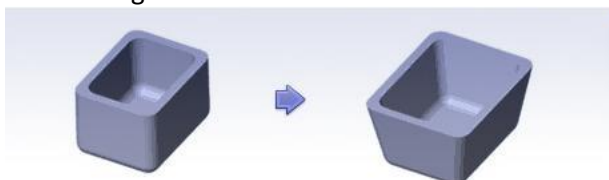


### Verrundungen, Formschrägen

- Abrundungen von Ecken verringern Spannungen im Bauteil und erleichtern den Fluss der Kunststoffschmelze



- Formschrägen Erleichtern den Teileauswurf und Verringern den Werkzeugverschleiß





## Kunststoff-Formteile – Toleranzen und Abnahmebedingungen (DIN 16742)

### Einleitung

Bei den Kooperationsbeziehungen zwischen Formteilentwicklung, Formteilmontage und Werkzeugbau ist folgende sachlogische Bearbeitungsfolge einzuhalten:

- a) Der Formteilkonstrukteur entscheidet bei Berücksichtigung der Formteilanforderungen über die funktional erforderlichen Toleranzen, die sich aus den Anwendungsbedingungen und der Montage ergeben.
- b) Der Formteilhersteller bestätigt zur Einhaltung der Relation

„funktional bedingte Toleranz  $\geq$  fertigungstechnisch mögliche Toleranz“

die fertigungstechnisch möglichen Toleranzen für die Abnahmebedingungen der Formteilmontage, wobei wirtschaftliche Vereinbarungen (z. B. Preiszuschläge) u. U. einzubeziehen sind. In der Konstruktionsdokumentation sind immer die funktional erforderlichen Toleranzen zu fixieren. Dadurch werden unsinnig genaue und unwirtschaftliche „Angst- oder Gewohnheitstoleranzen“ vermieden.

- c) Mit Auftragsvergabe wird durch den Formteilkonstrukteur der Werkstoff des Formteils verbindlich festgelegt. Damit legt er die Grundlage für die Festlegung der Verarbeitungsschwindigkeit. Nach Auftragserteilung sind zwischen Formteilhersteller und Werkzeugbau bzw. Werkzeugkonstrukteur Rechenwerte der Verarbeitungsschwindigkeit zu vereinbaren, wobei u. U. externe Erfahrungen (z. B. vom Formmassehersteller) genutzt werden.

Es muss dadurch beim Formteil mit unvermeidbaren verfahrensbedingten Abweichungen gerechnet werden. Die Vorgehensweise, wie bei Abweichungen zu verfahren ist, ist von der Funktion des Formteils abhängig und vereinbarungspflichtig:

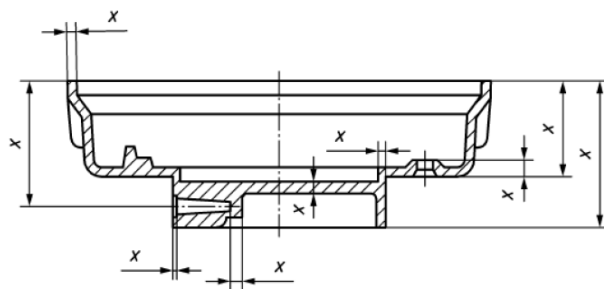
- Abweichung durch gestalterische Maßnahmen (Versteifungsrippen, Materialverdickung, Formveränderungen, etc.) eliminieren;
- Abweichung durch festgelegte Vorhaltung im Werkzeug korrigieren;
- Abweichung belassen und durch Grenzmustervereinbarung bzw. Zeichnungskorrektur dokumentieren;
- Abweichung belassen und durch "Fertigungsabweichung" dokumentieren.

ANMERKUNG Verfahrensbedingte Abweichungen können sowohl durch günstige Gestaltung des Formteils als auch durch Optimierung des Fertigungsprozesses reduziert werden.

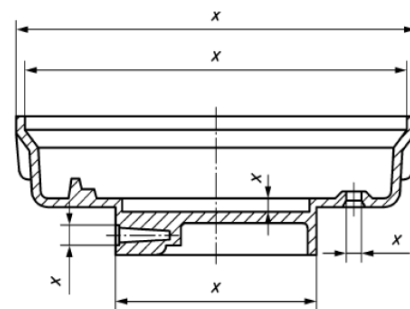
## Toleranzgruppe für Nennmaße

| Toleranzgruppe |    | Grenzabmaße (GA) für Nenngrößenmaßbereiche                                                                                                                                                                                                           |           |            |             |             |             |             |              |               |               |               |               |             |  |
|----------------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|--|
|                |    | 1 bis 3                                                                                                                                                                                                                                              | > 3 bis 6 | > 6 bis 10 | > 10 bis 18 | > 18 bis 30 | > 30 bis 50 | > 50 bis 80 | > 80 bis 120 | > 120 bis 180 | > 180 bis 250 | > 250 bis 315 | > 315 bis 400 | > 400 bis ∞ |  |
| TG1            | W  | ± 0,007                                                                                                                                                                                                                                              | ± 0,012   | ± 0,018    | ± 0,022     | ± 0,026     | ± 0,031     | ± 0,037     | ± 0,044      | –             | –             | –             | –             | –           |  |
|                | NW | ± 0,012                                                                                                                                                                                                                                              | ± 0,018   | ± 0,022    | ± 0,026     | ± 0,031     | ± 0,037     | ± 0,044     | ± 0,050      | –             | –             | –             | –             | –           |  |
| TG2            | W  | ± 0,013                                                                                                                                                                                                                                              | ± 0,020   | ± 0,029    | ± 0,035     | ± 0,042     | ± 0,050     | ± 0,060     | ± 0,090      | ± 0,13        | ± 0,15        | ± 0,16        | ± 0,18        | ± 0,20      |  |
|                | NW | ± 0,020                                                                                                                                                                                                                                              | ± 0,029   | ± 0,035    | ± 0,042     | ± 0,050     | ± 0,060     | ± 0,090     | ± 0,13       | ± 0,15        | ± 0,16        | ± 0,18        | ± 0,20        | ± 0,22      |  |
| TG3            | W  | ± 0,020                                                                                                                                                                                                                                              | ± 0,031   | ± 0,05     | ± 0,06      | ± 0,07      | ± 0,08      | ± 0,10      | ± 0,15       | ± 0,20        | ± 0,23        | ± 0,26        | ± 0,29        | ± 0,40      |  |
|                | NW | ± 0,031                                                                                                                                                                                                                                              | ± 0,050   | ± 0,06     | ± 0,07      | ± 0,08      | ± 0,10      | ± 0,15      | ± 0,20       | ± 0,23        | ± 0,26        | ± 0,29        | ± 0,40        | ± 0,55      |  |
| TG4            | W  | ± 0,03                                                                                                                                                                                                                                               | ± 0,05    | ± 0,08     | ± 0,09      | ± 0,11      | ± 0,13      | ± 0,15      | ± 0,23       | ± 0,32        | ± 0,35        | ± 0,41        | ± 0,45        | ± 0,63      |  |
|                | NW | ± 0,05                                                                                                                                                                                                                                               | ± 0,08    | ± 0,09     | ± 0,11      | ± 0,13      | ± 0,15      | ± 0,23      | ± 0,32       | ± 0,35        | ± 0,41        | ± 0,45        | ± 0,63        | ± 0,88      |  |
| TG5            | W  | ± 0,05                                                                                                                                                                                                                                               | ± 0,08    | ± 0,11     | ± 0,14      | ± 0,17      | ± 0,20      | ± 0,23      | ± 0,36       | ± 0,50        | ± 0,58        | ± 0,65        | ± 0,70        | ± 1,00      |  |
|                | NW | ± 0,08                                                                                                                                                                                                                                               | ± 0,11    | ± 0,14     | ± 0,17      | ± 0,20      | ± 0,23      | ± 0,36      | ± 0,50       | ± 0,58        | ± 0,65        | ± 0,70        | ± 1,00        | ± 1,40      |  |
| TG6            | W  | ± 0,07                                                                                                                                                                                                                                               | ± 0,12    | ± 0,18     | ± 0,22      | ± 0,26      | ± 0,31      | ± 0,37      | ± 0,57       | ± 0,80        | ± 0,93        | ± 1,05        | ± 1,15        | ± 1,60      |  |
|                | NW | ± 0,12                                                                                                                                                                                                                                               | ± 0,18    | ± 0,22     | ± 0,26      | ± 0,31      | ± 0,37      | ± 0,57      | ± 0,80       | ± 0,93        | ± 1,05        | ± 1,15        | ± 1,60        | ± 2,20      |  |
| TG7            | W  | ± 0,13                                                                                                                                                                                                                                               | ± 0,20    | ± 0,29     | ± 0,35      | ± 0,42      | ± 0,50      | ± 0,60      | ± 0,90       | ± 1,25        | ± 1,45        | ± 1,60        | ± 1,80        | ± 2,60      |  |
|                | NW | ± 0,20                                                                                                                                                                                                                                               | ± 0,29    | ± 0,35     | ± 0,42      | ± 0,50      | ± 0,60      | ± 0,90      | ± 1,25       | ± 1,45        | ± 1,60        | ± 1,80        | ± 2,60        | ± 3,50      |  |
| TG8            | W  | ± 0,20                                                                                                                                                                                                                                               | ± 0,31    | ± 0,45     | ± 0,55      | ± 0,65      | ± 0,80      | ± 0,95      | ± 1,40       | ± 2,00        | ± 2,30        | ± 2,60        | ± 2,85        | ± 4,00      |  |
|                | NW | ± 0,31                                                                                                                                                                                                                                               | ± 0,45    | ± 0,55     | ± 0,65      | ± 0,80      | ± 0,95      | ± 1,40      | ± 2,00       | ± 2,30        | ± 2,60        | ± 2,85        | ± 4,00        | ± 5,50      |  |
| TG9            |    | ± 0,30                                                                                                                                                                                                                                               | ± 0,49    | ± 0,75     | ± 0,90      | ± 1,05      | ± 1,25      | ± 1,50      | ± 2,25       | ± 3,15        | ± 3,60        | ± 4,05        | ± 4,45        | ± 6,20      |  |
| ANMERKUNG 1    |    | W: werkzeuggebundene Maße; NW: nicht werkzeuggebundene Maße.                                                                                                                                                                                         |           |            |             |             |             |             |              |               |               |               |               |             |  |
| ANMERKUNG 2    |    | Für TG9 ist die Differenzierung von W- und NW-Maßen nicht erforderlich.                                                                                                                                                                              |           |            |             |             |             |             |              |               |               |               |               |             |  |
| ANMERKUNG 3    |    | Als Nenngrößenmaße für Formteilzeichnungen gelten Toleranzmittenmaße ( $M_p = C_p$ ). Zur Tolerierung des Abstandes paralleler Flächen, die sich nicht direkt angeordnet sind, ist als Nenngrößenmaß das $D_p$ -Maß nach 7.2 dieser Norm anzuwenden. |           |            |             |             |             |             |              |               |               |               |               |             |  |
| ANMERKUNG 4    |    | Maße unter 1 mm und über 1 000 mm sind vereinbarungspflichtig.                                                                                                                                                                                       |           |            |             |             |             |             |              |               |               |               |               |             |  |

## Werkzeuggebundene und nicht werkzeuggebundene Maße



(NW)



(W)

## Bestimmung der Toleranzgruppen

Der erforderliche Genauigkeitsgrad der Formteilmontage wird mit der entsprechenden Toleranzgruppe nach Tabelle 1 festgelegt. Ein orientierendes Zuordnungsschema mittels Punktbewertung von fünf Einzeleinflüssen  $P_i$  mit der Gesamtpunktzahl  $P_g$  ergibt die Toleranzgruppe nach Tabelle 3:

$$P_g = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \quad (5)$$

Dabei ist

$P_g$  die Gesamtpunktzahl;

$P_i$  die Punktbewertung der Einzeleinflüsse.

Tabelle 3 — Punktezuordnung der Toleranzgruppen

| TG    | TG1 | TG2 | TG3 | TG4 | TG5 | TG6 | TG7 | TG8 | TG9 |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $P_g$ | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | ≥ 9 |

| Fertigungsverfahren                       | $P_1$ |
|-------------------------------------------|-------|
| Spritzgießen, Spritzprägen, Spritzpressen | 1     |
| Formpressen, Fließpressen                 | 2     |

| Formstoffsteifigkeit bzw. -härte |                |               | $P_2$ |
|----------------------------------|----------------|---------------|-------|
| E-Modul<br>N/mm <sup>2</sup>     | Shore D        | Shore A; IRHD |       |
| über 1 200                       | über 75        | –             | 1     |
| über 30 bis 1 200                | über 35 bis 75 | –             | 2     |
| 3 bis 30                         | –              | 50 bis 90     | 3     |
| unter 3                          | –              | unter 50      | 4     |

| Verarbeitungsschwindigkeit (Rechenwert)                                                      | $P_3$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| unter 0,5 %                                                                                  | 0     |
| 0,5 % bis 1 %                                                                                | 1     |
| über 1 % bis 2 %                                                                             | 2     |
| über 2 %                                                                                     | 3     |
| Bei Schwindungsanisotropie ist der maximale Schwindungskennwert für die Zuordnung maßgebend. |       |

Die Verarbeitungsschwindigkeit (VS) ist die relative Differenz zwischen Werkzeugkonturmaß  $L_W$  bei 23 °C ± 2 K und den entsprechenden Formteilmaßen  $L_F$  16 h bis 24 h nach der Fertigung, gelagert bis zur Messung und gemessen bei 23 °C ± 2 K und 50 % ± 10 % Luftfeuchte. Sie berechnet sich nach Gleichung (1).

$$VS = \left( 1 - \frac{L_F}{L_W} \right) \times 100 [\%]$$

$L_F$  das Formteilmaß; (1)

$L_W$  das Werkzeugkonturmaß.

### Verarbeitungsschwindigkeit Beispiele

|         | PA 6            | PA 6 GF                   | PA 6,6                  | PA 6,6 GF                 | PBT                        | PBT GF                     | PC                    | PC GF                    | PC/PBT                   | PE-HD                               | PE-LD                             | PES                     | PES                       | PET GF                        | PMMA                       |
|---------|-----------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|
|         | Ultramid<br>B3K | BASF<br>Ultramid<br>B3WG7 | BASF<br>Ultramid<br>A3K | BASF<br>Ultramid<br>A3WG7 | LANXESS<br>Pocan<br>B 1505 | LANXESS<br>Pocan<br>B 4235 | SABIC<br>Lexan<br>101 | SABIC<br>Lexan<br>3413 R | SABIC<br>Xenoy<br>CL 101 | Lyons-Basell<br>Hostalen<br>GC 7260 | Lyons-Basell<br>Lupolen<br>1800 S | SABIC<br>Ultram<br>1000 | SABIC<br>Ultrason<br>2010 | DUPONT<br>Rynite<br>530 NC010 | EVONIK<br>Phenoglas<br>7 N |
|         | -               | 35 GF                     | -                       | 35 GF                     | -                          | 30 GF                      | -                     | Blend                    | -                        | -                                   | -                                 | -                       | -                         | -                             | -                          |
| TLK     | TLK             | TLK                       | TLK                     | TLK                       | TLK                        | TLK                        | A                     | A                        | TLK                      | TLK                                 | A                                 | A                       | A                         | TLK                           | A                          |
| 1,15    | 1,41            | 1,13                      | 1,41                    | 1,41                      | 1,5                        | 1,65                       | 1,2                   | 1,44                     | 1,22                     | 0,957                               | 0,917                             | 1,27                    | 1,37                      | 1,56                          | 1,19                       |
| 220     | 220             | 260                       | 260                     | 225                       | 225                        | 145                        | 145                   | 225                      | 130                      | 106                                 | 217                               | 225                     | 252                       | 110                           | 110                        |
| 204     | 220             | 250                       | 250                     | 180                       | 210                        | 144                        | 147                   | 155                      | 72                       | 80                                  | 211                               | 215                     | 228                       | 103                           | 103                        |
| 123     | 130             | 105                       | 124                     | 414                       | 382                        | 576                        | 421                   | 391                      | 156                      | 60                                  | 478                               | 315                     | 168                       | 196                           | 196                        |
| 250     | 280             | 250                       | 250                     | 250                       | 250                        | 300                        | 300                   | 260                      | 240                      | 210                                 | 375                               | 360                     | 280                       | 240                           | 240                        |
| 1,7     | 1,7             | 1,5                       | 1,7                     | 3,9                       | 3,7                        | 5,2                        | 4                     | 3,8                      | 1,9                      | 1,2                                 | 4,4                               | 5,2                     | 2                         | 2,2                           | 2,2                        |
| 120/510 | 120/500         | 130/560                   | 120/510                 | 50/220                    | 50/230                     | 40/160                     | 50/210                | 50/230                   | 100/440                  | 170/720                             | 50/190                            | 80/270                  | 100/420                   | 90/280                        | 90/280                     |
| 250-270 | 270-290         | 280-300                   | 280-300                 | 250-260                   | 240-260                    | 290-320                    | 290-320               | 255-270                  | 190-280                  | 180                                 | 370-410                           | 340-380                 | 280-300                   | 220-290                       | 220-290                    |
| 40-80   | 80-90           | 60-80                     | 80-90                   | 80-100                    | 80-100                     | 80-120                     | 80-120                | 60-80                    | 20-40                    | 20-40                               | 140-180                           | 140-160                 | 110                       | 60-90                         | 60-90                      |
| 0,3     | 0,3             | 0,3                       | 0,3                     | 0,2                       | 0,2                        | 0,4                        | 0,4                   | 0,4                      | 0,9                      | 0,9                                 | 0,5                               | 0,3                     | 0,6                       | 0,3                           | 0,3                        |
| 80      | 80              | 80                        | 80                      | 100                       | 100                        | 120                        | 120-130               | 90-100                   | -                        | -                                   | 156                               | 140                     | 120                       | 90                            | 90                         |
| 4       | 4               | 4                         | 4                       | 2-3                       | 2-3                        | 2-4                        | 2-4                   | 2-4                      | -                        | -                                   | 4-6                               | 4                       | 4                         | 2-3                           | 2-3                        |
| 0,96    | 1,15            | 0,96                      | 1,15                    | 1,07                      | 1,36                       | 1,04                       | 1,30                  | 1,04                     | 0,72                     | 0,70                                | 1,29                              | 1,20                    | 1,28                      | 1,04                          | 1,04                       |
| 0,083   | 0,088           | 0,083                     | 0,088                   | 0,09                      | 0,123                      | 0,11                       | 0,11                  | 0,1                      | 0,092                    | 0,09                                | 0,11                              | -                       | -                         | 0,073                         | 0,073                      |
| 200     | 200             | 200                       | 200                     | 160                       | 180                        | 125                        | 125                   | 130                      | 110                      | 80                                  | 195                               | -                       | -                         | 80                            | 80                         |
| 0,89    | 0,25/0,75       | 1,4/1,7                   | 0,4/1,9                 | 1,9/1,9                   | 0,3/1,2                    | 0,5/0,7                    | 0,1/0,4               | 0,7/1,1                  | 2,4                      | 2,6                                 | 0,3/0,7                           | 0,6/0,9                 | 0,2/0,9                   | 0,2-3,5                       | 0,2-3,5                    |
| $P_3$   | 1               | 1                         | 2                       | 1                         | 2                          | 1                          | 1,5                   | 1,1                      | 0,15                     | 0,01                                | 0,01                              | 0,7                     | 0,3                       | 0,2                           | 0,9                        |

Schwindung  
parallel / quer  
zur Fließrichtung [%]

## Bestimmung der Toleranzgruppen

| Berücksichtigung der geometrie- und verfahrensbedingten Schwindungsunterschiede                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | P <sub>4</sub> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>genau möglich:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Rechenwerte der VS sind bekannt. (Zum Beispiel aus Erfahrungen, systematischen Messungen, Computersimulationen.) Schwindungsanisotropie ist bedeutungslos oder kann in der jeweiligen Maßrichtung hinreichend genau berücksichtigt werden. Mögliche Abweichungen vom Rechenwert betragen max. $\pm 10\%$ . | 1              |
| <b>bedingt genau möglich:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Rechenwerte der VS sind in Bereichen max. bis $\pm 20\%$ bekannt.                                                                                                                                                                                                                                          | 2              |
| <b>nur ungenau möglich:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Rechenwerte der VS sind nur als grobe Richtwertbereiche bekannt. Schwindungsanisotropie kann nicht oder nur ungenügend berücksichtigt werden. Praktische Erfahrungen zum Abschätzen relevanter Rechenwerte sind nicht vorhanden. Mögliche Abweichungen vom Rechenwert liegen über $\pm 20\%$ .             | 3              |
| Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass die Schwindungsschwankungen durch Variationen in den Verarbeitungsbedingungen und Unterschiede der Formmasseneigenschaften circa $\pm 30\%$ des Rechenwertes der VS betragen können. Die Auswahl P <sub>4</sub> = 3 ist zu treffen, wenn keine anderen Informationen vorliegen. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                |

Fertig, falls nach Festlegung und Addition von P1 bis P4 Toleranzgruppe ausreichend für Normalfertigung. Ansonsten muss die in P5 enthaltene Erhöhung des Fertigungsaufwandes in Betracht gezogen werden.

| Toleranzreihen                                                                                                  |                                                                                                                             | P <sub>5</sub> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>Reihe 1 (Normalfertigung)</b>                                                                                | Fertigung mit Allgemeintoleranzen realisiert. Maßhaltigkeitsforderungen, die keinen besonderen Qualitätsschwerpunkt bilden. | 0              |
| <b>Reihe 2 (Genaufertigung)</b>                                                                                 | Fertigung und Qualitätssicherung sind auf höhere Maßhaltigkeitsforderungen orientiert.                                      | -1             |
| <b>Reihe 3 (Präzisionsfertigung)</b>                                                                            | Vollständige Ausrichtung von Fertigung und Qualitätssicherung auf die sehr hohen Maßhaltigkeitsforderungen.                 | -2             |
| <b>Reihe 4 (Präzisionssonderfertigung)</b>                                                                      | Wie Reihe 3, aber mit intensivierter Prozessüberwachung.                                                                    | -3             |
| Die Toleranzreihen 3 (Präzisionsfertigung) und 4 (Präzisionssonderfertigung) sind immer vereinbarungspflichtig. |                                                                                                                             |                |

| Kriterium                          | Normalfertigung                                                    | Genaufertigung                                                                                                                 | Präzisionsfertigung                                                                                                                                                                                                                           | Präzisionssonderfertigung |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Spritzgießmaschine / Maschinenpark | Standardspritzgießmaschinen ohne Überwachung der Prozessparameter. | Standardspritzgießmaschine mit Überwachung der Prozessparameter                                                                | Fertigung auf geregelten Spritzgießmaschinen mit erweiterten Überwachungsmöglichkeiten für zusätzliche Druckaufnehmer und Temperaturfühler                                                                                                    |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Erhöhter spezieller Überwachungsaufwand der Maschinen (Kalibrierung)                                                                                                                                                                          |                           |
| Infrastruktur / Peripherie         | Fertigung ohne feststehende Maschinenbelegung möglich              |                                                                                                                                | Maschinen mit besonders steifem Aufbau                                                                                                                                                                                                        |                           |
|                                    | Spritzteile können maschinenfallend produziert werden.             |                                                                                                                                | Fertigung auf spezifizierten Maschinen mit feststehender Maschinenbelegung                                                                                                                                                                    |                           |
| Umgebungsbedingungen               |                                                                    |                                                                                                                                | Temperiermedien - Vorlauftemperatur geregelt ( $\pm 1\text{ K}$ )                                                                                                                                                                             |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Geregelte Temperierung $\Delta T$ -Vor- Rücklauf max. (1,5 bis 2,5) K                                                                                                                                                                         |                           |
| Werkzeug                           | Werkzeuge mit Wechseleinsätzen zulässig                            | Werkzeuge mit wenigen Wechseleinsätzen zulässig                                                                                | Zwangsumlauftermperierung ohne Überbrückungen                                                                                                                                                                                                 |                           |
|                                    |                                                                    | Die Anzahl der Kavitäten und die Komplexität der Geometrie haben Einfluss auf die einhaltbaren Toleranzen über alle Kavitäten. | Hinreichend genaue Überwachung der Massentemperatur (Heißkanal)                                                                                                                                                                               |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Handlinggeräte zum Einlegen von Einlegeteilen und zur Entnahme der Spritzteile                                                                                                                                                                |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Trockenlufttrockner bei hydrophilen Formmassen                                                                                                                                                                                                |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Definierte Kühlstrecken für die Spritzteile bis zur Abnahme                                                                                                                                                                                   |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Fertigung mit eingegengten Raumklimabedingungen oder in klimatisierten Räumen                                                                                                                                                                 |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Spritzgießmaschinen ggf. speziell isoliert (z. B. Plastifizierung)                                                                                                                                                                            |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Werkzeuge ohne Wechseleinsätze. Keine Familienwerkzeuge (Gruppenwerkzeuge)                                                                                                                                                                    |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Das Herstellungsverfahren für die Werkzeugkontur für die direkt tolerierten Geometrielemente muss die geforderte Genauigkeit ermöglichen. (Zum Beispiel kann mit Erodieren nicht die Genauigkeit einer geschliffenen Kontur erreicht werden.) |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Die Anzahl der Kavitäten und die Komplexität der Geometrie haben Einfluss auf die einhaltbaren Toleranzen über alle Kavitäten.                                                                                                                |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Ausgeglichene thermische Verhältnisse im Werkzeug                                                                                                                                                                                             |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Entformung mit geringer mechanischen Beanspruchung der Spritzteile                                                                                                                                                                            |                           |
|                                    |                                                                    |                                                                                                                                | Hinreichend präzise und steife Führung der bewegten Werkzeugbauteile                                                                                                                                                                          |                           |
|                                    | Anfertigungsgenauigkeit normal                                     | Anfertigungsgenauigkeit mittel                                                                                                 | Anfertigungsgenauigkeit sehr hoch                                                                                                                                                                                                             |                           |

| Kriterium                          | Präzisionsfertigung                                                                                                                                                                                                                           | Präzisionssonderfertigung |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Spritzgießmaschine / Maschinenpark | Fertigung auf geregelten Spritzgießmaschinen mit erweiterten Überwachungsmöglichkeiten für zusätzliche Druckaufnehmer und Temperaturfühler                                                                                                    |                           |
|                                    | Erhöhter spezieller Überwachungsaufwand der Maschinen (Kalibrierung)                                                                                                                                                                          |                           |
|                                    | Maschinen mit besonders steifem Aufbau                                                                                                                                                                                                        |                           |
|                                    | Fertigung auf spezifizierten Maschinen mit feststehender Maschinenbelegung                                                                                                                                                                    |                           |
| Infrastruktur / Peripherie         | Temperiermedien - Vorlauftemperatur geregelt ( $\pm 1$ K)                                                                                                                                                                                     |                           |
|                                    | Geregelte Temperierung $\Delta T$ -Vor- Rücklauf max. (1,5 bis 2,5) K                                                                                                                                                                         |                           |
|                                    | Zwangsumlauf temperierung ohne Überbrückungen                                                                                                                                                                                                 |                           |
|                                    | Hinreichend genaue Überwachung der Massentemperatur (Heißkanal)                                                                                                                                                                               |                           |
|                                    | Handlinggeräte zum Einlegen von Einlegeteilen und zur Entnahme der Spritzteile                                                                                                                                                                |                           |
|                                    | Trockenlufttrockner bei hydrophilen Formmassen                                                                                                                                                                                                |                           |
| Umgebungsbedingungen               | Definierte Kühlstrecken für die Spritzteile bis zur Abnahme                                                                                                                                                                                   |                           |
|                                    | Fertigung mit eingegengten Raumklimabedingungen oder in klimatisierten Räumen Spritzgießmaschinen ggf. speziell isoliert (z. B. Plastifizierung)                                                                                              |                           |
| Werkzeug                           | Werkzeuge ohne Wechseleinsätze. Keine Familienwerkzeuge (Gruppenwerkzeuge)                                                                                                                                                                    |                           |
|                                    | Das Herstellungsverfahren für die Werkzeugkontur für die direkt tolerierten Geometrielemente muss die geforderte Genauigkeit ermöglichen. (Zum Beispiel kann mit Erodieren nicht die Genauigkeit einer geschliffenen Kontur erreicht werden.) |                           |
|                                    | Die Anzahl der Kavitäten und die Komplexität der Geometrie haben Einfluss auf die einhaltbaren Toleranzen über alle Kavitäten.                                                                                                                |                           |
|                                    | Ausgeglichene thermische Verhältnisse im Werkzeug                                                                                                                                                                                             |                           |
|                                    | Entformung mit geringer mechanischen Beanspruchung der Spritzteile                                                                                                                                                                            |                           |
|                                    | Hinreichend präzise und steife Führung der bewegten Werkzeugbauteile                                                                                                                                                                          |                           |
|                                    | Anfertigungsgenauigkeit sehr hoch                                                                                                                                                                                                             |                           |

## Nutzen der Prozesssimulation und Beispiele

### Allgemein

Hohe Kosten für Spritzgießwerkzeuge (teilweise mehrere 100.000 €)

Nachträgliche Änderungen sind teuer und sollten daher möglichst vermieden werden.

Fehler bei der Auslegung von Spritzgießwerkzeugen können sich äußern durch

- Probleme bei der Formfüllung
- Geometrische Abweichungen
- Schlechte Bauteilqualität/-eigenschaften
- Zu hohe Zykluszeiten

In jedem Fall entsteht dadurch ein wirtschaftlicher Schaden, den es zu vermeiden gilt.

### Fehler bei der Werkzeugauslegung

Bindenähte

Einfallstellen

Lufteinschlüsse

Verzug durch

- Orientierungen (Moleküle und Füllstoffe)
- Spannungen
- Ungleichmäßige Abkühlung

Verschiebung von Einlegeteilen oder Kernen

Ungleichmäßige Füllung mehrerer Kavitäten

→ Fehler in der Werkzeugauslegung können bereits in einem frühen Entwicklungsstadium erkannt und beseitigt werden.

### Prozessoptimierung

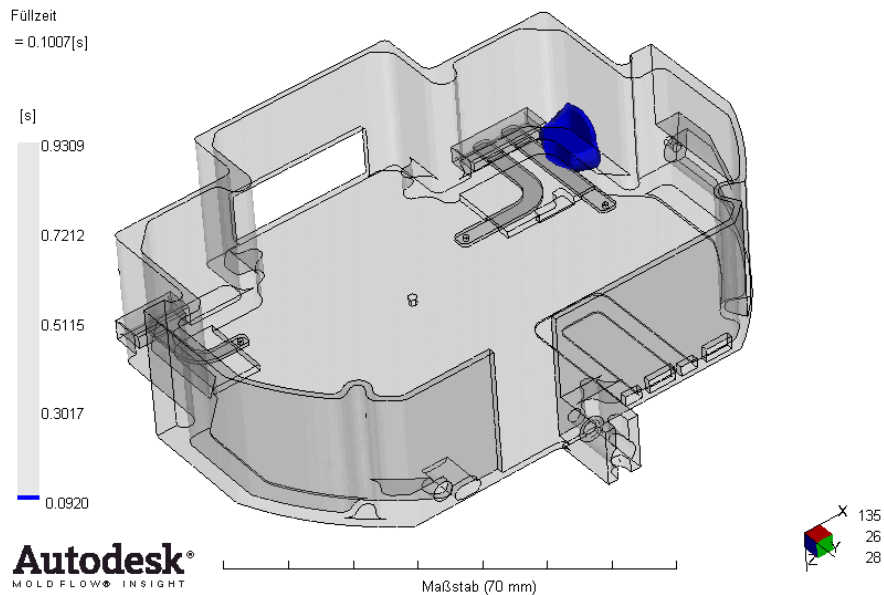
- Verkürzung von Zykluszeiten
- Energieeinsparung

- Verbesserung der Produktqualität

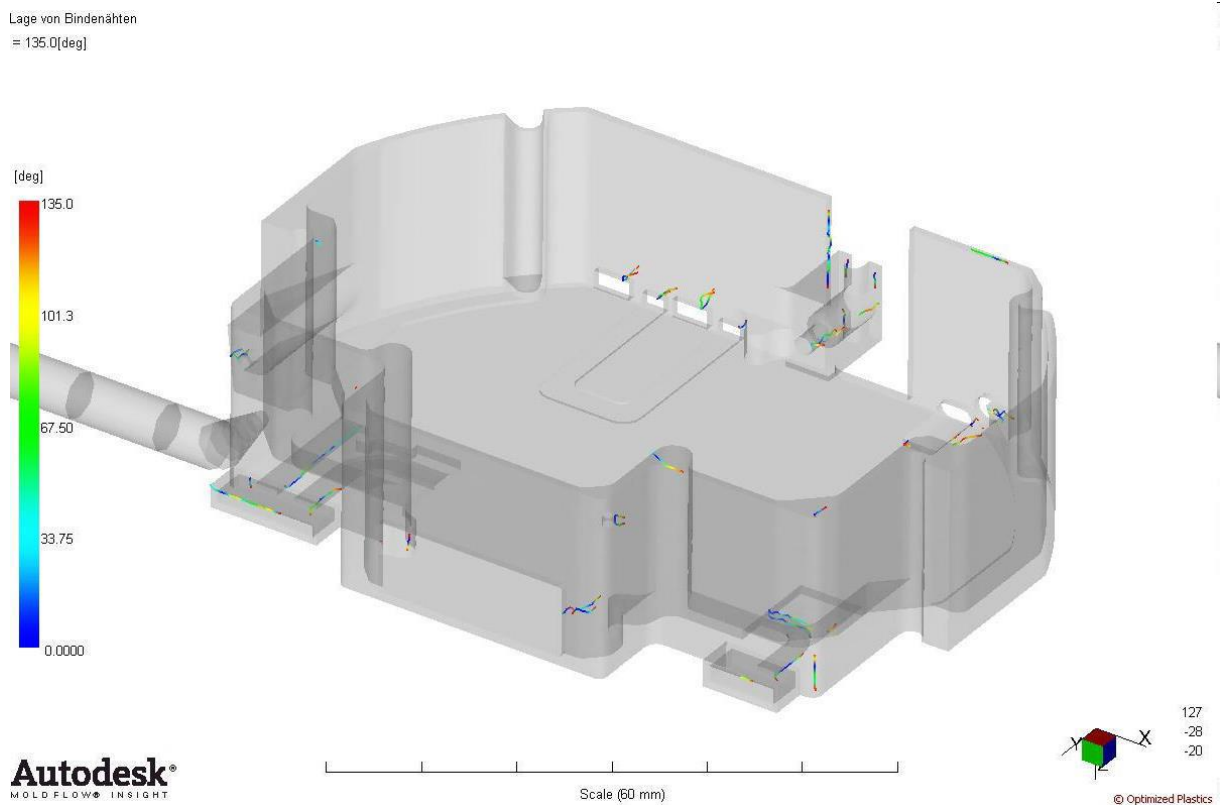
Die Prozesssimulation hilft nicht nur bei der Werkzeugauslegung, sondern ermöglicht auch eine Weiterentwicklung und Optimierung bestehender Prozesse.

### Beispiele zur Prozessoptimierung

- Bindenähte durch Teilung des Schmelzestromes



- Lage von Bindenähten

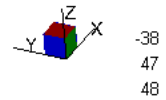
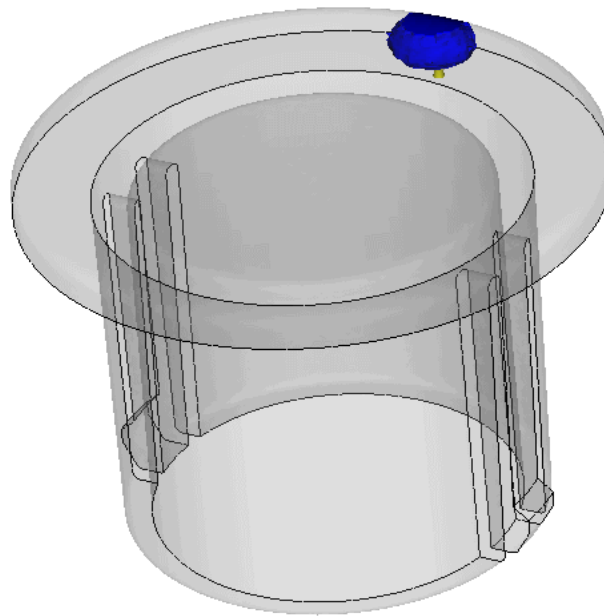




- **Bindenaht durch unterschiedliche Fließfrontgeschwindigkeiten**

Füllzeit  
= 0.0022[s]

[s]  
0.2104  
0.1578  
0.1052  
0.0526  
0.0000



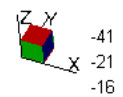
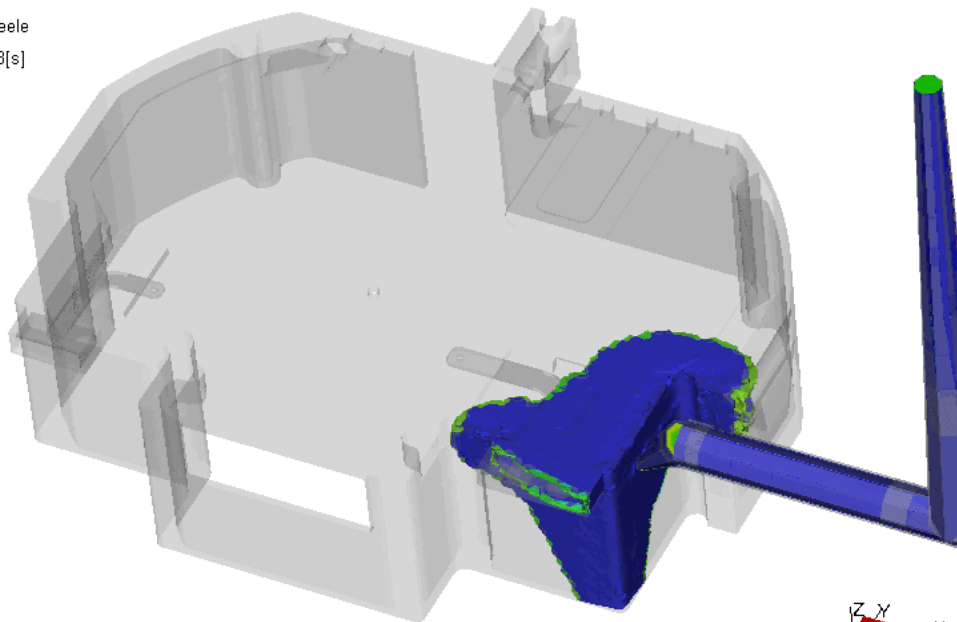
**Autodesk®**  
MOLD FLOW® INSIGHT

Maßstab (10 mm)

- **Einfallstellen: Plastische Seele**

Plastische Seele  
Zeit = 0.1993[s]

[C]  
320.0  
292.5  
265.0  
237.5  
210.0



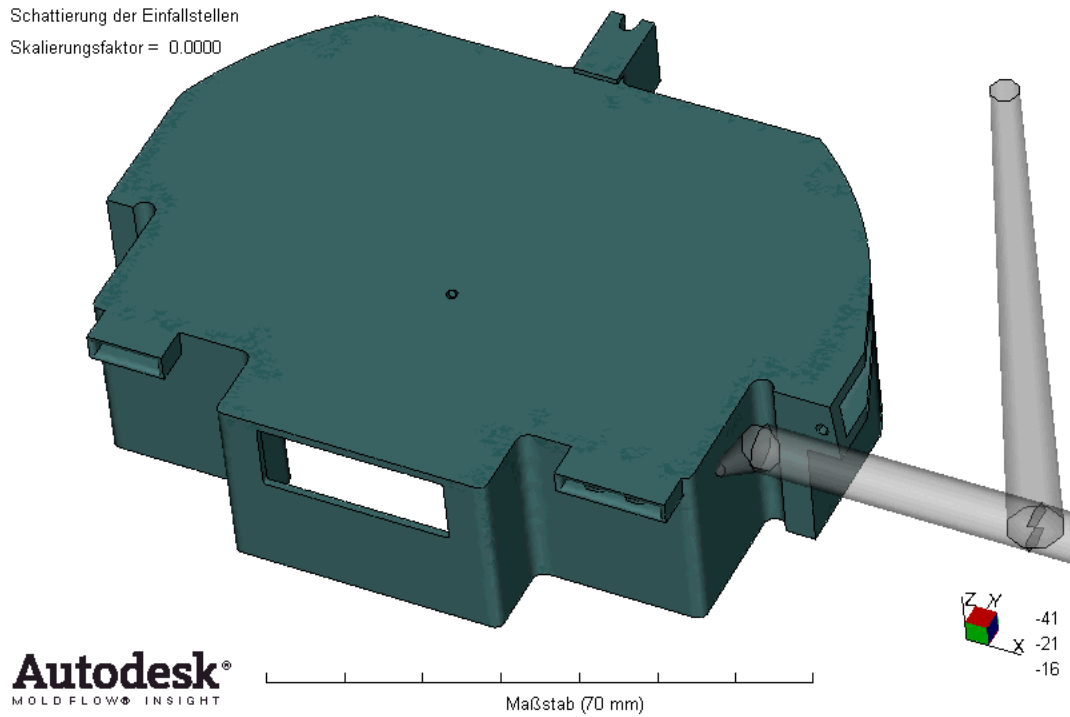
**Autodesk®**  
MOLD FLOW® INSIGHT

Maßstab (70 mm)



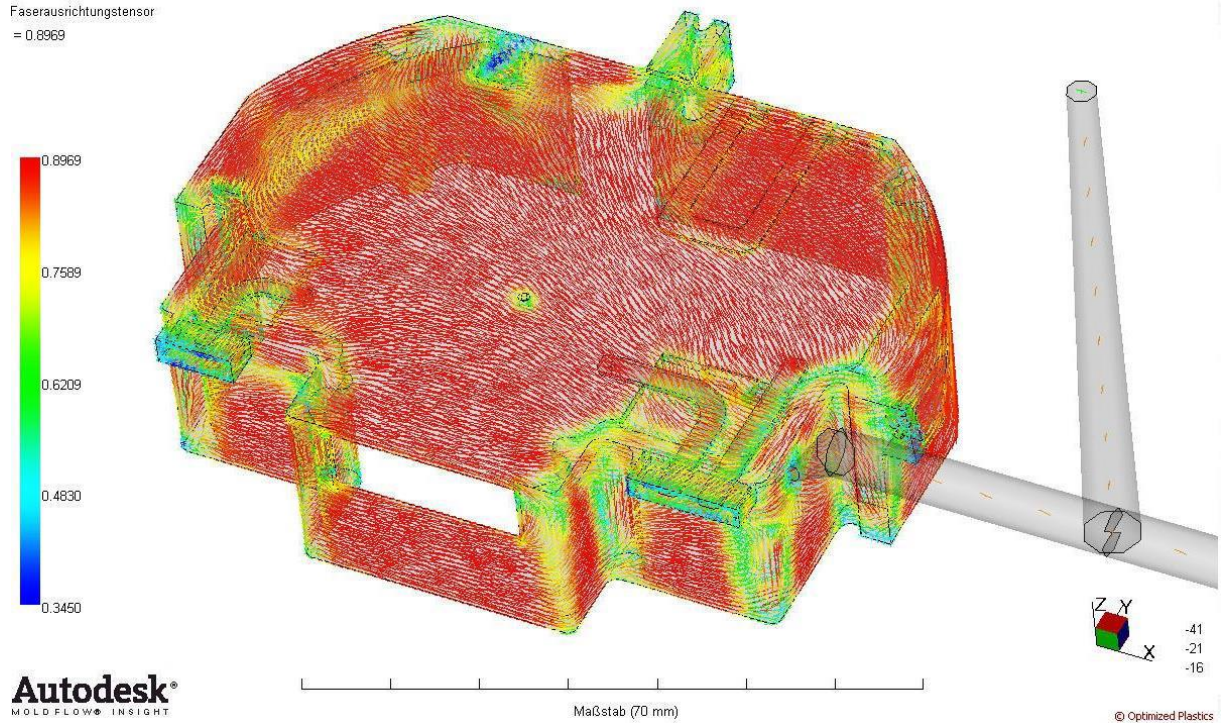
- **Einfallstellen**

Schattierung der Einfallstellen  
Skalierungsfaktor = 0.0000



- **Faserorientierung**

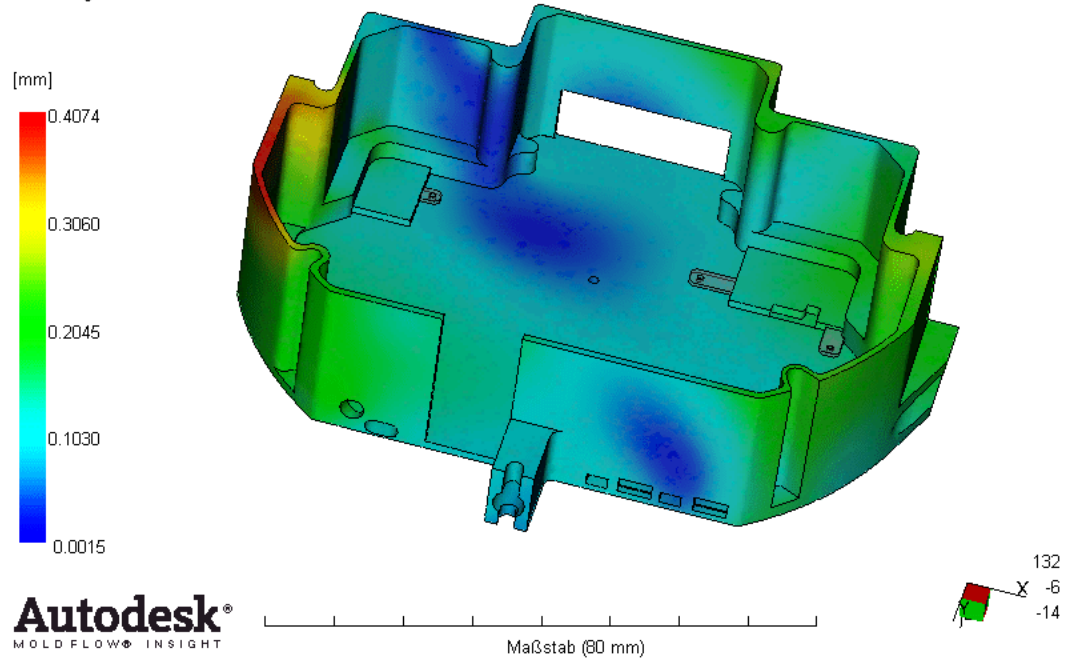
Faserausrichtungstensor  
= 0.8969



- **Verzug durch Orientierungen**

Verzug, Ausrichtungseffekte :Verzug

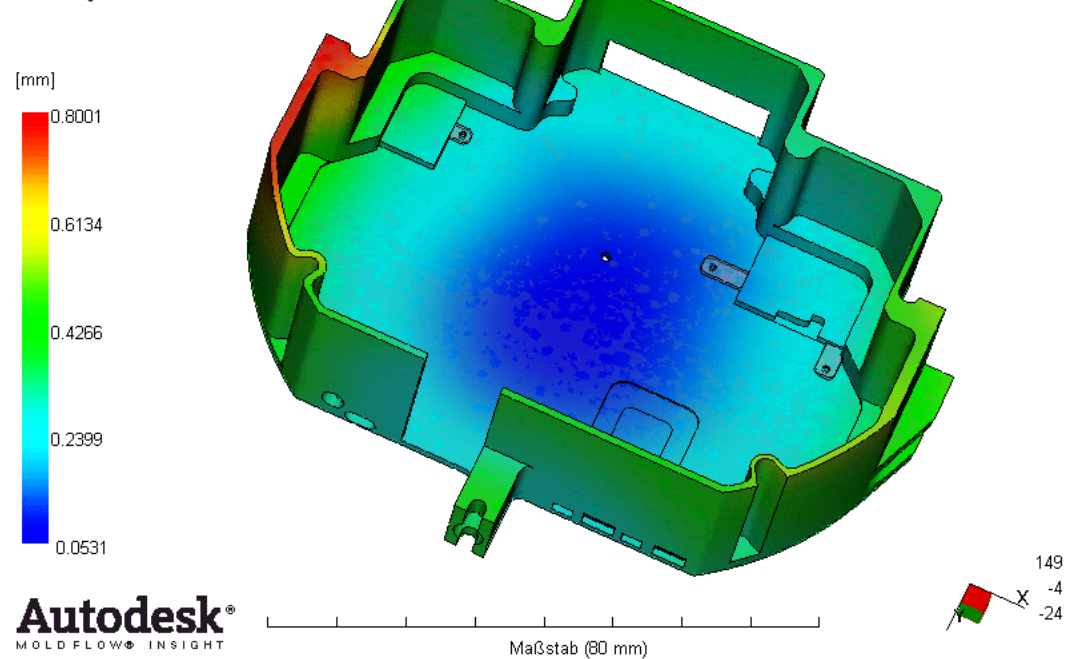
Skalierungsfaktor = 0.0000



- **Verzug durch Schwindung**

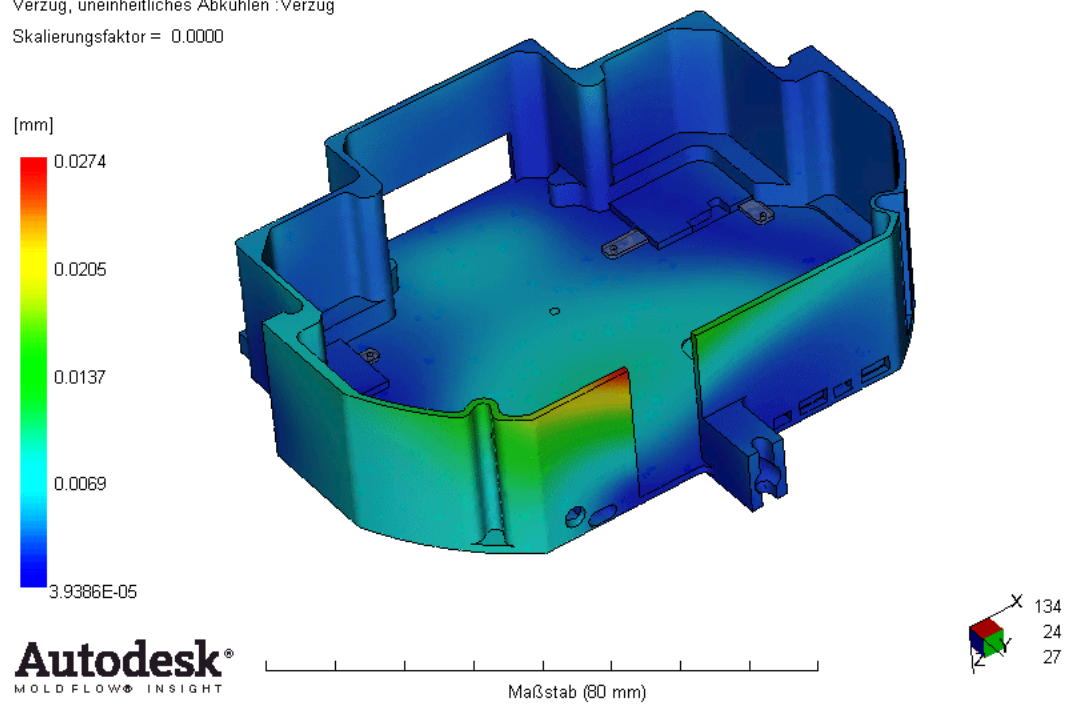
Verzug, uneinheitliches Schwinden :Verzug

Skalierungsfaktor = 0.0000



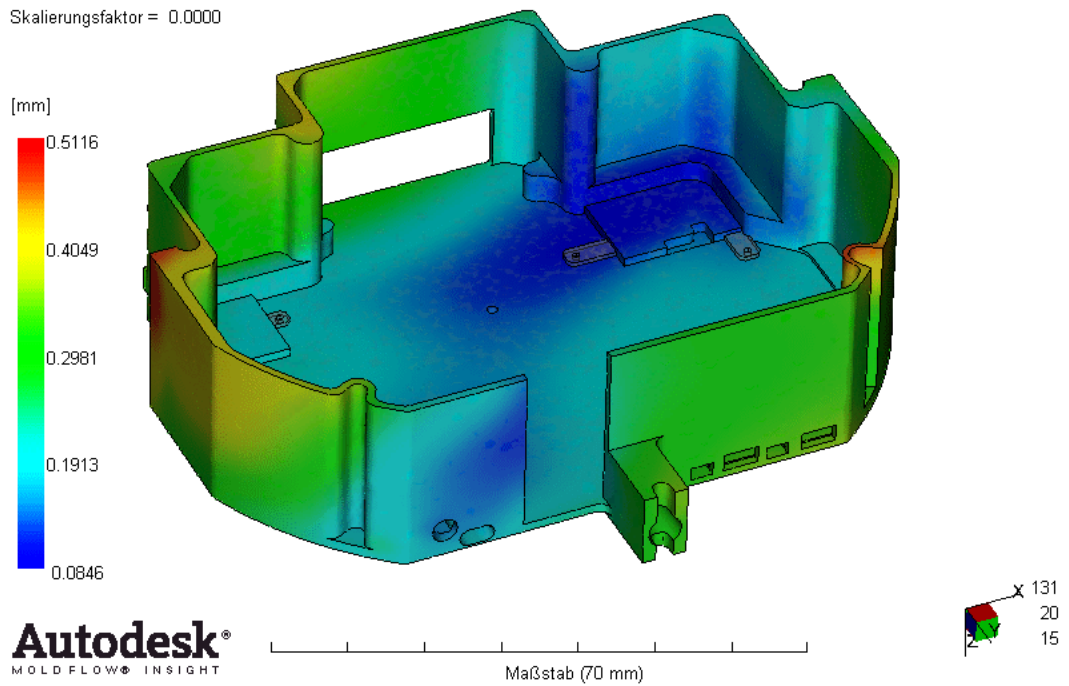
- **Verzug durch uneinheitliches Abkühlen**

Verzug, uneinheitliches Abkühlen : Verzug  
 Skalierungsfaktor = 0.0000



- **Verzug – Kombination aller Effekte**

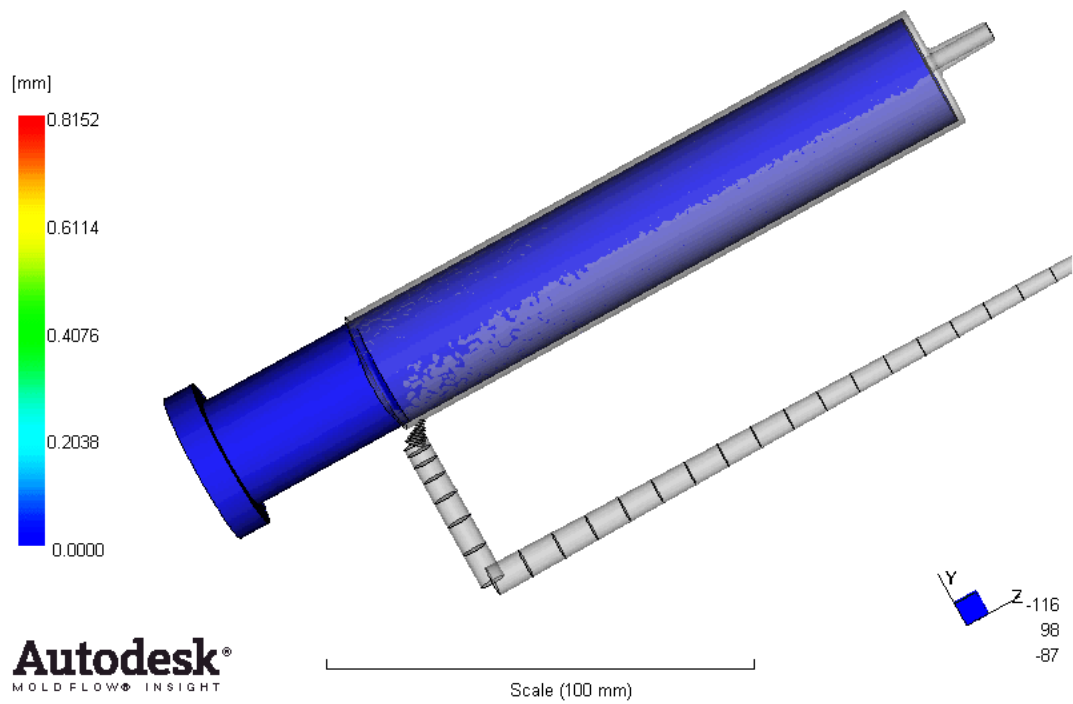
Skalierungsfaktor = 0.0000



- **Verschiebung von Kernen**

Kernverschiebung

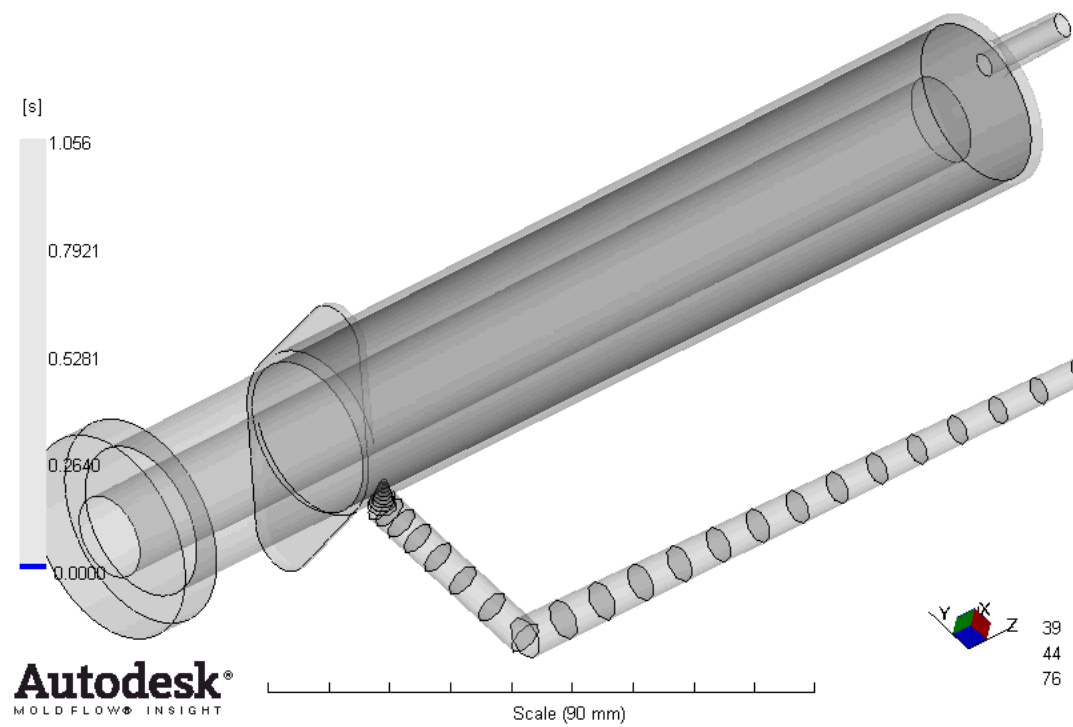
Time = 0.2755[s]



- **Lufteinschlüsse durch Kernverschiebung**

Füllzeit

= 0.0110[s]





- **Kunststoffbauteile unter komplexer Beanspruchung, z.B. Drehmomentstütze**



#### **Bauteile unter komplexer Beanspruchung: Einfluss des Herstellungsprozesses**

Insbesondere bei technischen Anwendungen treten häufig sehr komplexe Beanspruchungen auf. Der Herstellungsprozess hat einen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Produktes:

- Lage von Bindenähten (Schwachstellen!)
- Eingefrorene Spannungen
- Orientierung von Verstärkungsstoffen (richtungsabhängiges Verhalten)

Eine Vorhersage des Verhaltens eines fertigen Bauteiles ist nur durch vorhergehende Simulation des Herstellprozesses möglich.

Kopplung zwischen Füllsimulation und Simulation des Festkörperverhaltens ergänzt die reine Prozesssimulation.

### **Modellierung**

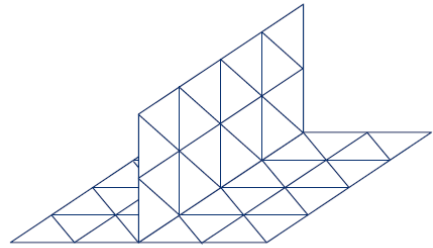
#### **Grundlagen**

Komplexe Geometrien entziehen sich einer analytischen Berechnung, daher:

- Diskretisierung des Berechnungsgebietes in Finite Elemente
- Numerische Lösung der benötigten Transportgleichungen, dabei:
- Berücksichtigung möglichst aller relevanten Einflüsse (z.B. Werkzeugtemperierung, Reaktionszeiten der Maschine etc.)
- Weitgehende Vereinfachung der Transportgleichungen (Rechenzeit!), z.B. Vernachlässigung von Trägheits- oder Gravitationskräften.

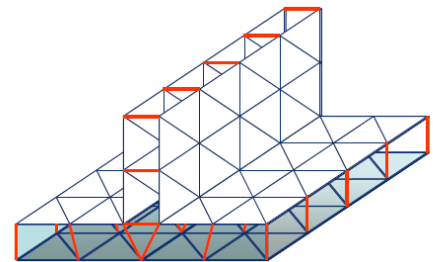
### Diskretisierung: Mittelflächenmodell

- Werkzeuggeometrie (Fluidvolumen)
- Erstellen von Mittelflächen
- Mittelflächenmodell
- Rechengitter
- Höhe des Fließspaltes ist als Variable implementiert  
→ „2,5D-Simulation“
- Geringe Rechenzeiten, da kleine Rechengitter
- Verzweigungen etc. können nicht sauber modelliert werden



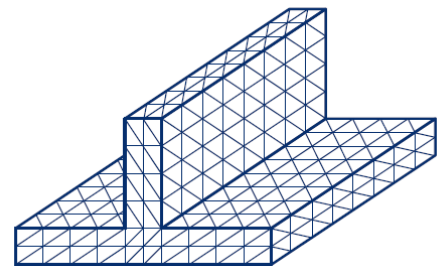
### Diskretisierung: DualDomain Modell

- Bauteilgeometrie
- Oberflächenmodell
- Vernetzte Oberflächen
- Bilden von Knotenpaaren
- Höhe des Fließspaltes aus dem Abstand der Knotenpaare  
→ „2,5D-Simulation“
- Relativ geringe Rechenzeiten, da noch kleine Rechengitter
- Bessere Modellierung von Verzweigungen etc., aber bei komplexen Geometrien immer noch ungenau



### Diskretisierung: 3D-Modell

- Werkzeuggeometrie (Fluidvolumen)
- Volumennetz
- Das gesamte Fluidvolumen wird dreidimensional diskretisiert
- Exakte Geometrieabbildung, daher genaue Berechnung auch an geometrisch komplexen Stellen möglich
- Sehr viele Rechenzellen benötigt, daher hohe Rechenzeiten



### Transportgleichungen

In der Regel müssen folgende Transportgleichungen gelöst werden:

- Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung)
- Impulsgleichung
- Energiegleichung
- Füllgrad der jeweiligen Rechenzelle

Ergänzt werden diese Transportgleichungen durch Stoffgesetze für

- Rheologisches Verhalten (Viskosität als Funktion von Schergeschwindigkeit, Temperatur und ggf. Druck)
- Thermodynamisches Verhalten (spezifisches Volumen als Funktion von Druck und Temperatur)

Im Falle faserverstärkter Kunststoffe kann eine zusätzliche Transportgleichung für die Faserorientierung gelöst werden.

## Kontinuitätsgleichung

Beschreibt die Massenkonservativität

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Zeitliche Änderung der Dichte in einem Kontrollvolumen

Räumliche Änderung der Massenstromdichte

## Impulsgleichung

Beschreibt die Kräftebilanz in jedem Kontrollvolumen

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) + \rho \cdot \vec{g} + \nabla \cdot \underline{\tau} - \nabla p$$

Zeitliche Änderung (Impulsänderung)

Trägheitskräfte

Gravitationskräfte

Reibungskräfte

Druckkräfte

Trägheits- und Gravitationskräfte sowie der Beschleunigungsterm sind i.d.R. verschwindend gering.

$$\cancel{\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t}} = -\cancel{\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v})} + \cancel{\rho \cdot \vec{g}} + \nabla \cdot \underline{\tau} - \nabla p$$

→ vereinfachte Impulsgleichung:

$$\nabla \cdot \underline{\tau} - \nabla p = 0$$

Reibungskräfte

Druckkräfte

## Energiegleichung

Beschreibt den Wärmetransport

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{v} T) + \nabla \cdot \left( \frac{\lambda}{c_p} \cdot \nabla T \right) + \underline{\tau} : \nabla \vec{v}$$

Zeitliche Änderung der inneren Energie

Konvektiver Transport

Wärmeleitung

Dissipation

[Wikipedia] **Konvektion** (von lat. ‚convectum‘, *mitgetragen*) ist das Mitführen durch eine Strömung.



## Füllgrad

Der Füllgrad (Volumenanteil)  $\alpha$  gibt an, ob eine Rechenzelle

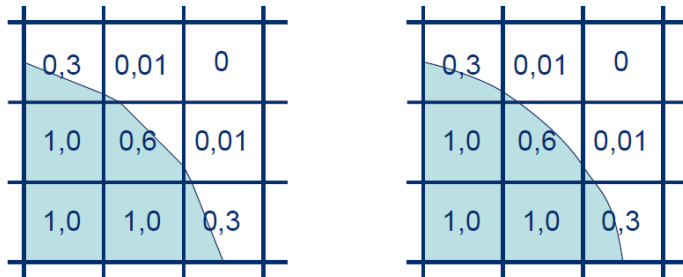
- noch nicht mit Schmelze gefüllt ( $\alpha = 0$ ),
- teilweise gefüllt ( $0 < \alpha < 1$ ) oder
- komplett gefüllt ( $\alpha = 1$ ) ist.

Auch für den Füllgrad kann eine Transport-Differentialgleichung formuliert werden:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \alpha}{\partial t}}_{\text{Zeitliche Änderung}} = - \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \alpha)}_{\text{Konvektiver Transport}}$$

Aus den Werten von  $\alpha$  kann der Fließfrontverlauf zu unterschiedlichen Zeitpunkten rekonstruiert werden. Hierzu existieren verschiedene mathematische Rekonstruktionsalgorithmen.

Diese basieren im Allgemeinen auf der Berechnung des Normalenvektors der Grenzfläche oder auf Spline-Interpolationen:



## Rheologische Zustandsgleichung

Beschreibt die Abhängigkeit der Viskosität von Schergeschwindigkeit, Temperatur und ggf. Druck.

Gebäuchlichste Modelle:

- Carreau-Ansatz

$$\eta = \frac{a_T \cdot a}{(1 + a_T \cdot b \cdot \dot{\gamma}^c)^d} \quad \text{mit} \quad a_T = \exp \left[ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

- Cross-WLF-Ansatz

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left( \frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad \text{mit} \quad \eta_0 = D_1 \cdot \exp \left[ \frac{-A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right]$$

$$T^* = D_2 + D_3 \cdot p$$

$$A_2 = \bar{A}_2 + D_3 \cdot p$$

## Thermodynamische Zustandsgleichung

In der Regel wird der TAIT-Ansatz verwendet, der das spezifische Volumen sowohl in der Schmelze als auch im erstarrten Zustand beschreibt:

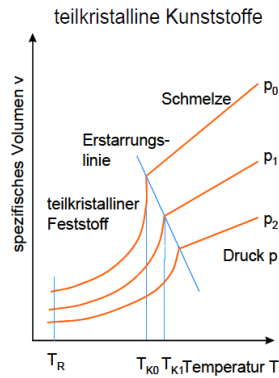
$$v(T, p) = v_0(T) \cdot \left[ 1 - C \cdot \ln \left( 1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right] + v_t(T, p)$$

Schmelzbereich:

$$\begin{aligned}v_0(T) &= b_{1m} + b_{2m} \cdot (T - b_5) \\ B(T) &= b_{3m} \cdot \exp[-b_{4m} \cdot (T - b_5)] \\ v_t(T, p) &= 0\end{aligned}$$

Feststoffbereich:

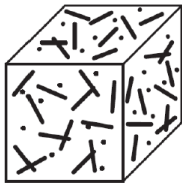
$$\begin{aligned}v_0(T) &= b_{1s} + b_{2s} \cdot (T - b_5) \\ B(T) &= b_{3s} \cdot \exp[-b_{4s} \cdot (T - b_5)] \\ v_t(T, p) &= b_7 \cdot \exp[(b_8 \cdot (T - b_5)) - (b_9 \cdot p)]\end{aligned}$$



## Faserorientierung

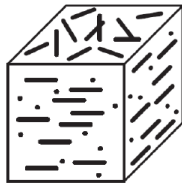
Die Faserorientierung wird üblicherweise als Tensor dargestellt:

isotrop



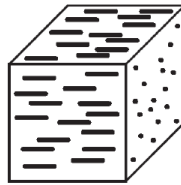
$$\begin{bmatrix} 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 \end{bmatrix}$$

planar isotrop



$$\begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

anisotrop

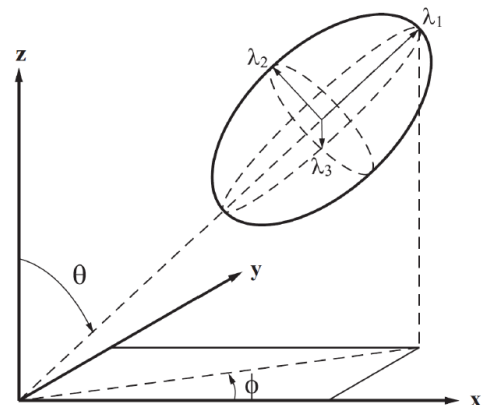


$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Den Faserorientierungs-Tensor kann man sich auch als Ellipsoid vorstellen.

Die Eigenvektoren zeigen in Hauptrichtung des Ellipsoids.

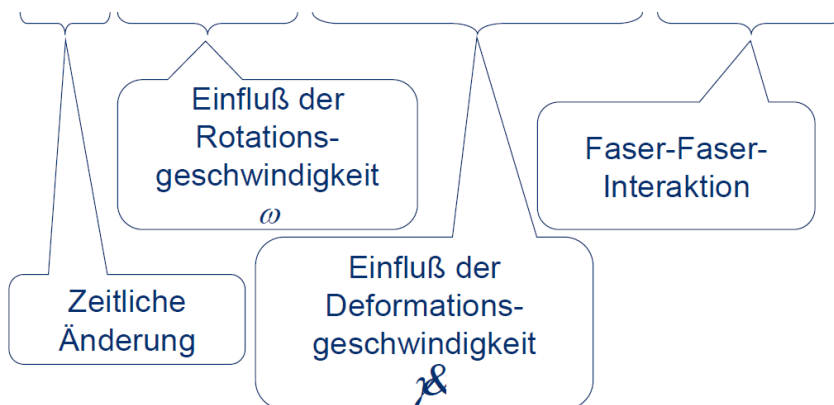
Die Eigenwerte geben Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit der Orientierung entlang der Hauptrichtung.



## Folgar-Tucker-Modell

Transportgleichung für die Faserorientierung:

$$\frac{Da_{ij}}{Dt} = a_{ik}\omega_{kj} - \omega_{ik}a_{kj} + \lambda(a_{ik}\gamma_{kj} + \gamma_{ik}a_{kj} - 2a_{ijkl}\gamma_{kl}) + 2C_{IT}(\delta_{ij} - \beta a_{ij})$$



### Berechnung des Verzuges

Der Vzug aufgrund innerer Spannungen, ungleichmäßiger Abkühlung etc. bewegt sich im Allgemeinen im linearelastischen Bereich.

Für den allgemeinen (dreidimensionalen) Fall kann das Hooke'sche Gesetz durch eine lineare Tensorgleichung 4. Stufe ausgedrückt werden:

### Mikromechanik-Modellierung

Die Verbindung von Füllsimulation zur Berechnung des Festkörperverhaltens wird über Mikromechanik-Modelle hergestellt.

Es wird angenommen, dass in einer Rechenzelle des Finite-Elemente-Netzes nur eine Faserorientierungs-richtung vorliegt und somit transversal isotropes Verhalten.

Über sogenannte Mikromechanik-Modelle können in jeder Rechenzelle richtungsabhängige Elastizitätsmoduln, Schubmoduln und Querkontraktionszahlen berechnet werden.

Gebräuchlichste Modelle: Tandon-Weng und Halpin-Tsai

Die Modelle von Tandon-Weng und Halpin-Tsai erlauben die Berechnung von lokalen Elastizitätsmodulen, Schubmoduln und Querkontraktionszahlen mit analytischen Formeln aus

- Elastizitätsmodul der Faser
- Elastizitätsmodul der Matrix
- Schubmodul der Matrix
- Querkontraktionszahl der Matrix
- Volumenanteil der Fasern

### Fehler an Spritzgießbauteilen, Fehlerkategorien → Spritzgießfehler

#### Fehlerkategorien

Fehler in der Konstruktion

- Falsche Wanddicken
- Falsche Verrundungsradien
- Keine Entformungsschrägen
- Zu lange Fließwege
- Zu komplizierte Geometrie

Fehler in der Prozessführung

- Zylinder- und Werkzeugtemperaturen
- Einspritzgeschwindigkeit
- Nachdruckhöhe und -dauer
- Kühlzeit
- Plastifizierung (Schneckendrehzahl und Staudruck)

Fehler in der Werkstoffauswahl

- Mechanische Anforderungen
- Thermische Anforderungen
- Chemische Anforderungen

#### Formteil nicht voll

Beschreibung

- Unvollständige Füllung des Formteils, meist am Fließwegende oder an dünnwandigen Stellen

Ursachen

- Verarbeitungsparameter ungünstig
- Druckverluste im Angussystem einschließlich Heißkanal zu hoch.
- Wanddicke zu gering



#### Abhilfemaßnahmen

- Masse- und Werkzeugtemperatur anheben. Einspritzgeschwindigkeit erhöhen. Später auf Nachdruck umschalten
- Anguss-, Anschnitt- und Verteilerquerschnitte vergrößern.
- Wanddicke anheben

#### Gewichtsabweichungen

##### Beschreibung

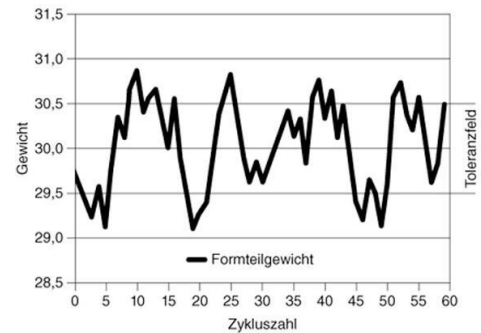
- Stark schwankende Formteilm Gewichte und Masse

##### Ursachen

- Verschleiß in der Plastifiziereinheit
- Werkzeug- und Masstemperaturschwankungen
- Trocknung unzureichend
- Dosierweg oder Massepolster schwankt
- Zuhaltkraft zu gering

##### Abhilfemaßnahmen

- Plastifiziereinheit auf Verschleiß prüfen
- Temperiergeräte und Heizkreise an der Plastifiziereinheit überprüfen
- Trocknungsprozess überprüfen
- Einspritz- und Dosierweg überprüfen
- Zuhaltkraft erhöhen oder Maschine mit größerer Zuhaltkraft wählen



#### Massepolster schwankt

##### Beschreibung

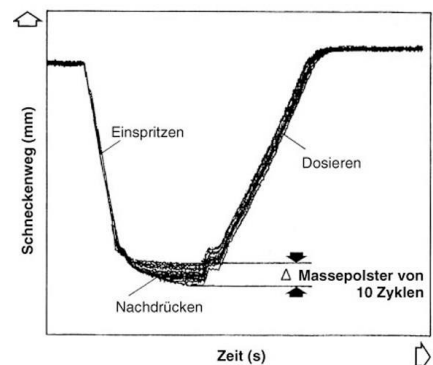
- Massepolster variiert stark, teilweise bis gegen Null

##### Ursachen

- Rückströmsperre defekt oder verschlissen
- Hydraulik defekt
- Dosierung ungleichmäßig

##### Abhilfemaßnahmen

- Rückströmsperre überprüfen und evtl. gegen neue austauschen
- Hydraulikfunktion überprüfen
- Zylinderbohrung auf Verschleiß prüfen und gegebenenfalls ausbuchen lassen oder neue Plastifiziereinheit verwenden



#### Schwarzeffekt (Diseleffekt)

##### Alternative Namen

- Verbrennungsschliere, Brandstelle, periodische Verfärbung, dunkle Flecken

##### Beschreibung

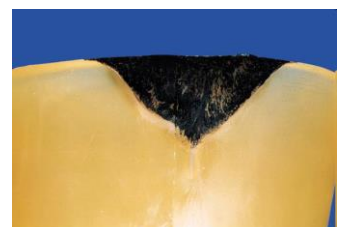
- Braune bis schwarze, örtlich wechselnde und in unbestimmten Abständen auftretende Verfärbung des Formteils

##### Ursachen

- Eingeschlossene, komprimierte Luft im Spritz-gießwerkzeug, die zu Verbrennungen führt

##### Abhilfemaßnahmen

- Werkzeugentlüftung optimieren, besonders im Bereich des Schmelzezusammenflusses und am Fließwegende. Fließfrontverlauf über Wanddicke, Anschnittlage oder Fließhilfen korrigieren. Enlüftungskanäle prüfen. Schließkraft reduzieren. Werkzeug evakuieren



### **Zyklus zu lang**

#### **Beschreibung**

- Tatsächliche Zykluszeit über- schreitet die projektierte Zykluszeit

#### **Ursachen**

- Dosierzeit zu lang
- Kühlzeit zu lang
- Handlingzeit zu lang

#### **Abhilfemaßnahmen**

- Dosierzeit verringern. Schnecken-drehzahl erhöhen. Größeres Plastifizieraggregat einsetzen. Plastifizier-aggregat auf Verschleiß überprüfen. Leistungsfähigere Schnecke einsetzen.
- Werkzeugtemperatur absenken. Kühlung in kritischen Bereichen gezielt verbessern.
- Handlingsystem verbessern

### **Schwimmhaut**

#### **Beschreibung**

- Bildung von Kunststoffhäutchen am Formteil durch Werkzeugspalte

#### **Ursachen**

- Zulässige Spaltweite überschritten. Zuhaltkraft zu gering. Werkzeugsteifigkeit zu gering. Verschleiß der Dichtflächen
- Verarbeitungsparameter nicht optimiert

#### **Abhilfemaßnahmen**

- Spaltweiten überprüfen. Zuhaltkraft erhöhen. Werkzeugsteifigkeit erhöhen. Dichtflächen überarbeiten
- Verarbeitungsparameter optimieren. Einspritz-geschwindigkeit oder Massetemperatur senken. Umschaltpunkt früher auf Nachdruck verlegen oder Nachdruck senken



### **Auswerfmarkierung**

#### **Beschreibung**

- Deutliche Auswerfermarkierung auf dem Formteil

#### **Ursachen**

- Werkzeuginnendruck zu hoch
- Werkzeugsteifigkeit zu gering
- Kühlzeit zu kurz oder Werkzeugtemperatur örtlich zu hoch
- Hinterschnitte zu stark, Entformungsschräge zu gering
- Werkzeugpolitur unzureichend. Auswerferlage ungünstig oder Auswerferfläche zu klein

#### **Abhilfemaßnahmen**

- Einspritzgeschwindigkeit optimieren.
- Nachdruck reduzieren. Früher auf Nachdruck umschalten
- Werkzeugsteifigkeit verbessern
- Werkzeugtemperierung optimieren
- Hinterschnitte verringern
- Entformungsschrägen optimieren
- Werkzeugpolitur verbessern. Auswerfer verbessern



## Farbvertiefung an Bindenähten

### Alternative Namen

- Farbstreifen

### Beschreibung

- Tritt an Bindenähten oder voreilenden bzw. zurückbleibenden Fließfrontbereichen auf, die aus benachbarten Schmelzeströmen gespeist werden

### Hinweise

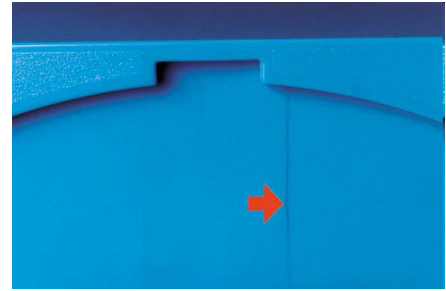
- Bevorzugt bei hellen, brillanten Farben wie z.B. Weiß, Blau, Grün

### Ursachen

- Pigmententmischung oder Lichtbrechungseffekt durch ungünstigen Strömungsverlauf an Bindenähten
- Thermische Überbeanspruchung der Schmelze, die an Bindenähten zu Farbänderungen führt
- Oxidation durch ungenügende Entlüftung

### Abhilfemaßnahmen

- Fließfrontgeschwindigkeit variieren
- Thermische Schmelzebelastung verringern
- Entlüftung verbessern, evtl. durch Verlegen der Bindenaht



## Homogene Verfärbung

### Alternative Namen

- Farbabweichung

### Beschreibung

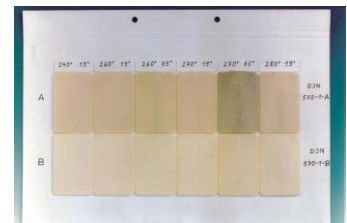
- Gleichmäßige Abweichung von der Grundfarbe, speziell bei hellen Farben

### Ursachen

- Masstemperatur zu hoch
- Auslastung der Plastifiziereinheit zu gering und dadurch Verweilzeit zu lang
- Masterbatch ungeeignet
- Produktionsunterbrechung ohne Temperaturabsenkung

### Abhilfemaßnahmen

- Masstemperatur kontrollieren und evtl. reduzieren
- Kleinere Plastifiziereinheit verwenden
- Geeignetes Masterbatch verwenden
- Hinweise zur Produktionsunterbrechung beachten



## Ringe

### Alternative Namen

- Jahresringe, Blumeneffekt

### Beschreibung

- Matte, zum Anschnitt konzentrische Ringe Hinweise
- Erkennbar in erster Linie bei ABS und ABS-Blends

### Ursachen

Schmelzefluss im Werkzeug stagniert:

- Masstemperatur zu niedrig
- Werkzeugtemperatur zu niedrig
- Einspritzgeschwindigkeit zu niedrig

### Abhilfemaßnahmen

Gleichmäßigen Schmelzefluss anstreben

- Masstemperatur anheben
- Werkzeugtemperatur anheben



- Einspritzgeschwindigkeit erhöhen

### Eisblume

#### Beschreibung

- Raue und matte Formteileroberfläche

#### Hinweise

- Nur bei glasfaserverstärkten Thermoplasten. Deutlich bei amorphen, weniger deutlich bei teilkristallinen Thermoplasten

#### Ursachen

- Einspritzgeschwindigkeit zu niedrig
- Werkzeugtemperatur zu niedrig

#### Abhilfemaßnahmen

- Einspritzgeschwindigkeit erhöhen
- Werkzeugtemperatur erhöhen. Werkzeug mit Wärmedämmplatten ausstatten. Leistungsfähigeres Temperiergerät einsetzen



### Matte Oberflächenstörungen an Heißkanalelementen

#### Beschreibung

- Raue, aufgerissene und dadurch matt wirkende Oberfläche in der Nähe von Heißkanalelementen oder an heißen Kernen

#### Ursachen

- Entformung zu frühzeitig
- Werkzeugtemperatur am Heißkanal zu hoch
- Kerntemperatur zu hoch

#### Abhilfemaßnahmen

- Kühlzeit verlängern
- Heißkanal besser thermisch trennen, Werkzeugtemperatur senken
- Für ausreichende Kühlung des Kerns sorgen



### Große Blasen

#### Beschreibung

- Hohle luftgefüllte Blasen in der Wand

#### Ursachen

- Lufteinzug bei der Dosierung
- Auslastung der Plastifiziereinheit zu hoch

#### Abhilfemaßnahmen

- Granulatförderung auf Lufteinzug überprüfen. Staudruck im zulässigen Rahmen erhöhen. Schneckenrückzug verkürzen
- Bei größerem Schneckenhub als 3D nächstgrößere Plastifiziereinheit verwenden



### Kleine Blasen

#### Beschreibung

- Lufteinschlüsse ähnlich wie Lunker, jedoch im Durchmesser wesentlich kleiner und vermehrt vorhanden

#### Hinweise

- Häufig in Verbindung mit silberfarbigen Schlieren

#### Ursachen

- Material zu feucht
- Entgasungseinheit ungünstig

#### Abhilfemaßnahmen

- Trocknungsprozess überprüfen





- Geeignete Entgasungsschnecke wählen oder Entgasungsschnecke durch Normalschnecke ersetzen und mit Vortrocknung arbeiten

### **Lunker**

#### Alternative Namen

- Vakuole, Blase

#### Beschreibung

- Luftleere Hohlräume in Form von runden oder langgezogenen Blasen, die im Allgemeinen nur an transparenten oder transluzenten Teilen erkennbar sind



#### Ursachen

- Volumenkontraktion in der Abkühlphase nicht ausgeglichen. Nachdruckwirksamkeit zu gering
- Volumenkontraktion in der Abkühlphase nicht ausgeglichen. Anspritzposition oder Formteilgestaltung ungünstig

#### Abhilfemaßnahmen

- Nachdruck erhöhen, Nachdruckzeit verlängern, Massepolster kontrollieren, Düsenbohrung, Anguss- und Anschnittquerschnitt überprüfen und ggf. vergrößern
- Im dickwandigen Bereich anspritzen. Waddicken überarbeiten, um zu große Waddickensprünge zu vermeiden

### **Fadenziehen**

#### Beschreibung

- Lange, dünne Fäden aus Maschinen- oder Heißkanaldüse

#### Hinweise

- In erster Linie bei PA, PBT, PBT-Blend

#### Ursachen

- Düsenspitzenbohrung zu groß
- Thermische Trennung am Abrisspunkt schlecht.  
Düsentemperatur am Abrisspunkt Düse/Heißkanal zu hoch. Schneckenrückzug zu gering



#### Abhilfemaßnahmen

- Düsenspitzenbohrung kleiner wählen, kritische Scherung beachten
- Thermische Trennung am Abrisspunkt optimieren. Düsentemperatur absenken. Schneckenrückzug einschalten oder Rückzugweg erhöhen

## 14. Sonderverfahren Spritzgießen

### Lernziele

Nach dieser Veranstaltung sollten Sie ...

- wissen, wozu man Sonderverfahren im Spritzgießen benötigt,
- die wichtigsten Sonderverfahren kennen,
- entscheiden können, wann welches Sonderverfahren eingesetzt werden sollte.

### Bedarf an Sonderverfahren

#### Anforderungen an Spritzgussteile



#### Anpassung an stets steigende Ansprüche

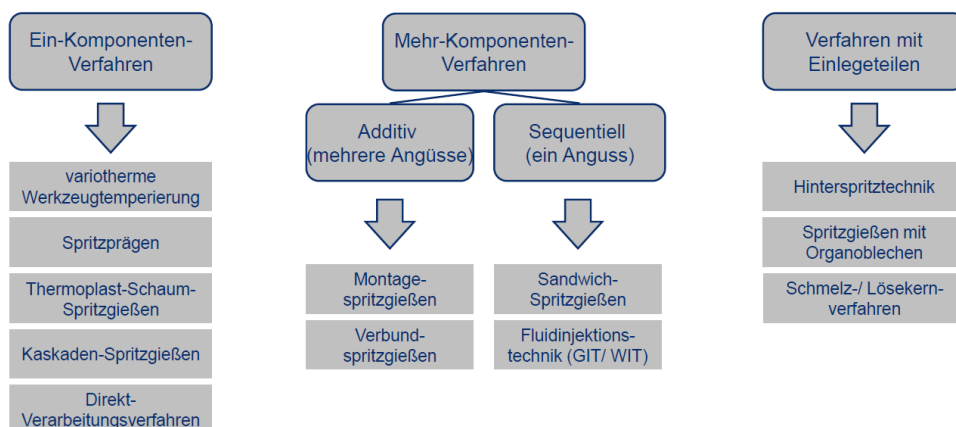
- Zunehmend moderne Hochleistungsbauteile mit hoher Funktionsdichte
- Besondere Anforderungen an den Spritzgießprozess, bei denen das herkömmliche Verfahren an seine Grenzen stößt,

z.B.:

- Realisierung langer Fließwege
- Vermeidung mechanischer Schwachstellen durch Bindenähte
- Vermeidung von Spannungszuständen im Bauteil durch Druckspitzen
- Besondere Anforderungen an die Oberflächengüte
- Hohlräume im Bauteil
- Bauteile aus verschiedenen Farben/ Materialien
- etc.
- Marktdruck erfordert Kostenminimierung der Fertigung



### Unterteilung ausgewählter Sonderverfahren



## Ein-Komponenten-Verfahren

### Allgemeines

Ein-Komponenten-Verfahren sind auf spezielle Anwendungen zugeschnitten.

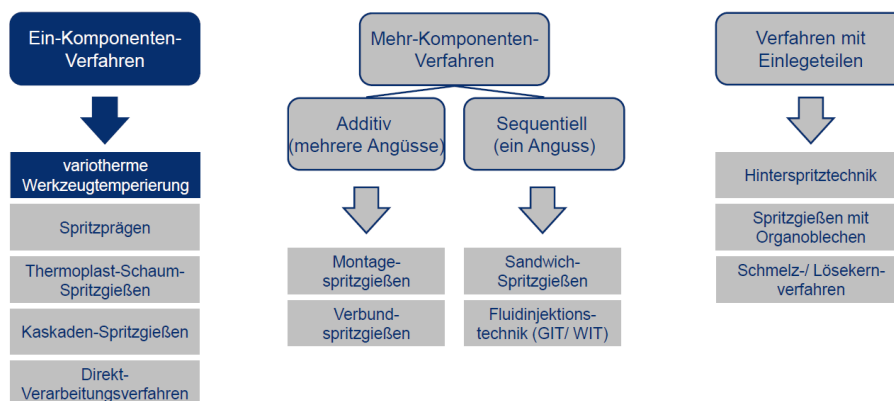
Sie ermöglichen die Herstellung von Bauteilen, die im normalen Verfahren nicht oder nicht in ausreichender Qualität realisiert werden können.

Oft werden hierzu eine modifizierte Spritzgießanlage oder ein besonderes Werkzeug eingesetzt.

Häufige Motivationen für Sonderverfahren:

- gute Oberflächen
- geringe Druckspitzen
- wenig Orientierungen und wenig Verzug
- Gewichtersparnis
- Realisierung langer Fließwege
- Werkstoffschonung
- etc.

### Variotherme Werkzeugtemperierung



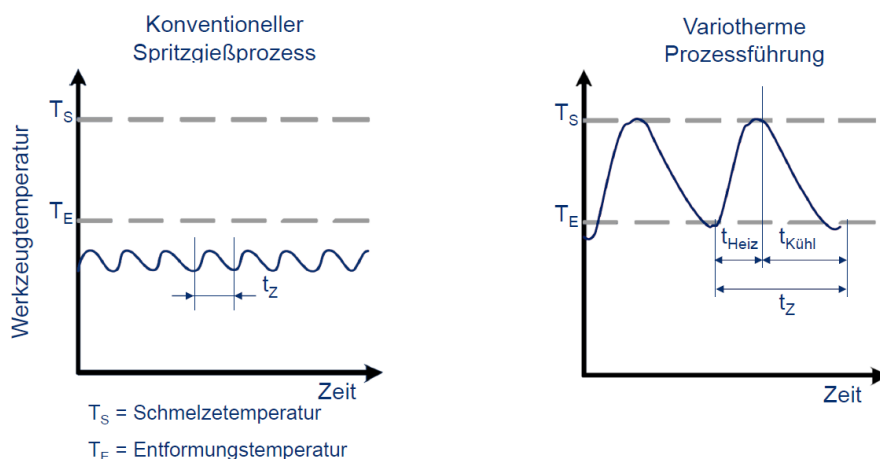
### Merkmale

Variotherme Prozessführung ermöglicht:

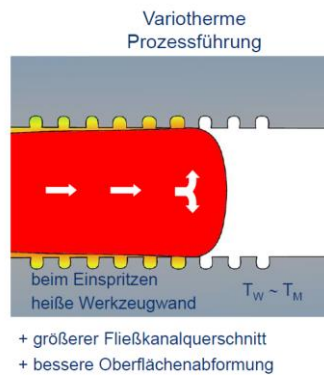
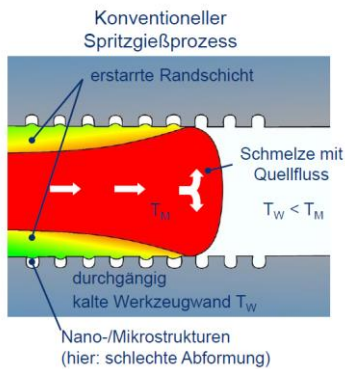
- Schnelles Erwärmen und Abkühlen der Werkzeugoberfläche
- Verbesserung der Oberflächenqualität
- Reduktion von Bindnähten
- Verbesserung der Verbundfestigkeit bei Materialkombinationen
- Reduktion von Verzug und Deformationen



### Zeitlicher Verlauf der Werkzeugwandtemperatur



## Verhalten der Randschicht



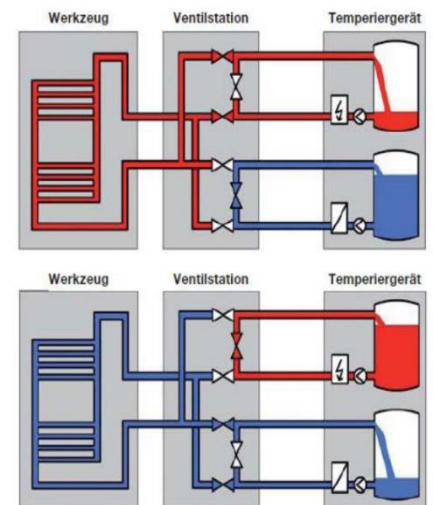
## Temperierung

### Heiz- und Kühlkreislauf

Zwei Temperierkreisläufe und oberflächennahe Temperierkanäle ermöglichen schnelles Erwärmen und Abkühlen der Werkzeugoberfläche

Alternativen:

- Induktive Beheizung
- Heißdampf
- Wärmestrahler
- Widerstandsheizten



## Vor- und Nachteile

### Vorteile

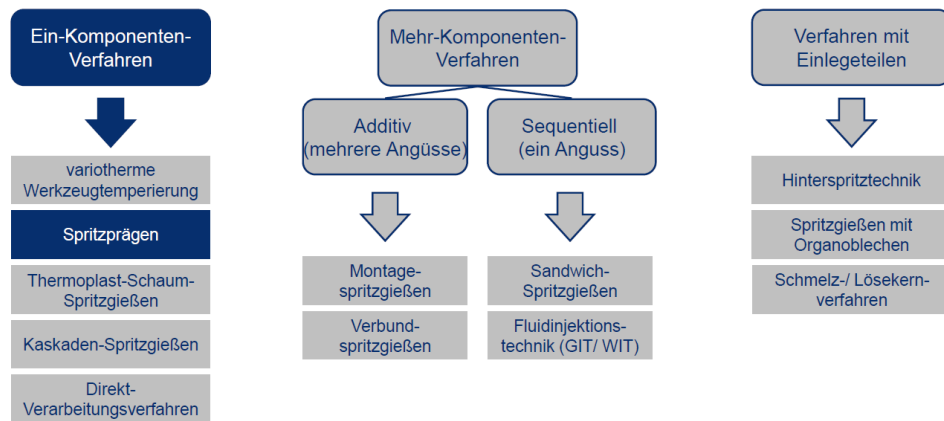
Herstellung von Bauteilen, die konventionell nicht produzierbar sind

| Formteileigenschaft                              | Änderung |
|--------------------------------------------------|----------|
| Fließfähigkeit                                   | ↑        |
| Oberflächenqualität                              | ↑        |
| Abformgenauigkeit<br>(Mikro- und Nanostrukturen) | ↑        |
| Mechanische Eigenschaften                        | ↗        |
| Bindenahtfestigkeit                              | ↑        |
| Schwindung und Verzug                            | →        |
| Gefügeigenschaften                               | ↑        |
| Eigenspannungen                                  | ↓        |

### Nachteile

- Komplexe Anlagentechnik (geschultes Personal)
- Längere Zykluszeiten
- Höherer Energieverbrauch
- Höhere Anschaffungskosten
- Lizenzgebühren

## Spritzprägen

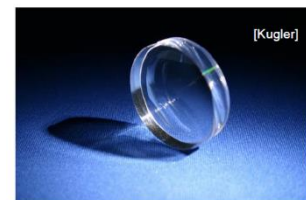


### Merkmale

- Ausformung durch Verringerung des Kavitätsumfanges
- Präge- statt Nachdruckphase  
→ geringere Druckspitzen
- Herstellung sehr großer, dickwandiger Bauteile ohne Verzug
- Verringerung von Eigenspannungen und Orientierungen
- Höhere Abformungsgenauigkeit, hohe Maßhaltigkeit von Präzisionsbauteilen (z.B. Linsen)
- Abformung von Mikrostrukturen



[Ferromatik Milacron]

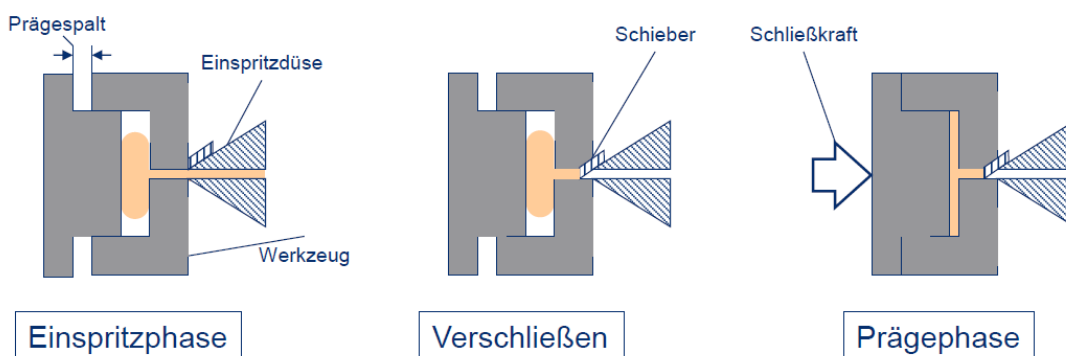


[Kugler]

### Verfahrenstechnik

#### Ablauf

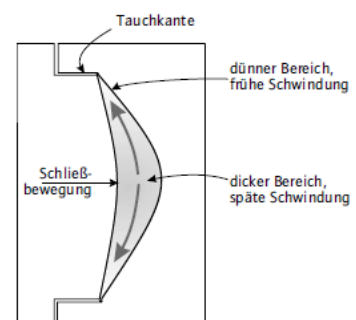
1. Schließen des Werkzeuges bis auf Breite des Prägespalts
2. Einspritzen einer dosierten Schmelzmenge in die teilgeöffnete Kavität
3. Verschließen des Angusses
4. Verfahren der Schließeinheit bis Werkzeug vollständig geschlossen → Schmelze wird gleichmäßig durch den Prägedruck in der Kavität verteilt.
5. Entformung und Abkühlung



### Werkzeugarten

#### Normale Werkzeuge (passives prägen)

- Ausschließlich bei symmetrischen Bauteilen einsetzbar (z.B. Eimer, Deckel)
- Ausnutzung der natürlichen Werkzeugatmung
- Exakte Dosierung des Schussvolumens erforderlich



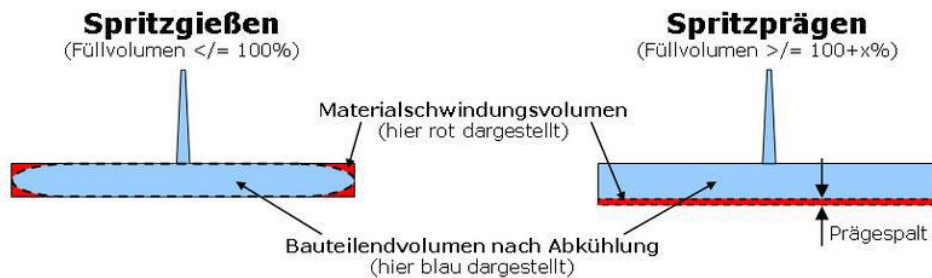
## Tauchkantenwerkzeuge

- Tauchkanten gleiten beim Schließvorgang ineinander und dichten ab
- Auch bei asymmetrischen Bauteilen einsetzbar

## Herstellung verzugsarmer Bauteile

### Schwindungsausgleich

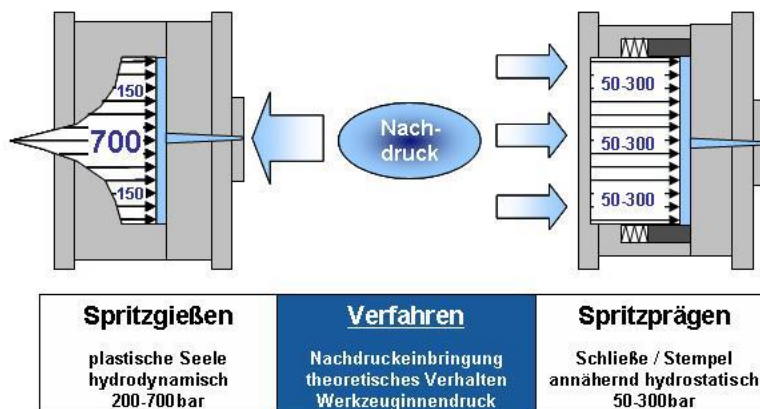
- Im Vergleich zum Spritzgießen wesentlich früher und gleichmäßig in Prägerichtung
- Hochpräzise und sehr spannungsarme Formteile



## Materialschonung

### Nachdruck/ Prägedruck

- Punktueller Nachdruck beim Spritzgießen
- Flächiger Nachdruck beim Spritzprägen -> deutlich geringere Druckspitzen (Faktor 0,25 bis 0,5)
- dies erlaubt z.B. das Hinterprägen kompressibler Dekormaterialien („Soft-Touch Effekt“) bei minimaler Dekorschädigung



## Einsatz

### Anwendungsgebiete

- Bauteile mit hohen Wanddicken
- Bauteile mit langen Fließwegen
- Bauteile mit hoher Abformgenauigkeit
- Technische Präzisionsformteile (z.B. Membranen)
- Duroplast- und Elastomerverarbeitung

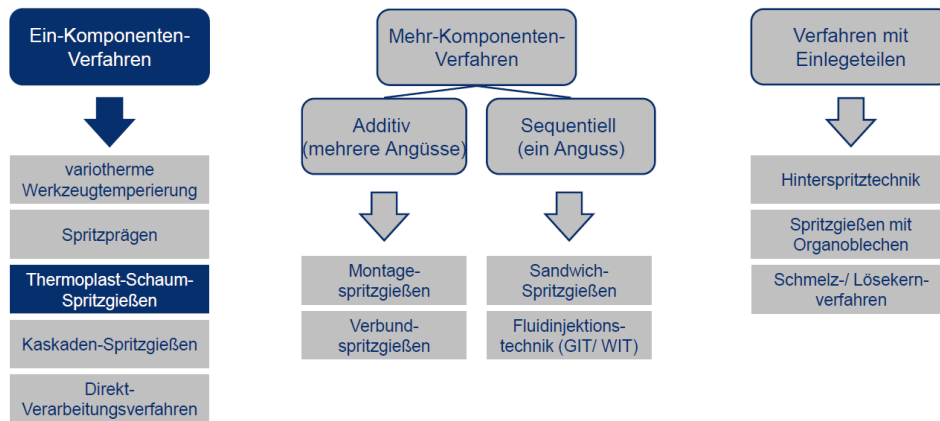
### Vorteile

- Geringe Anisotropien im Bauteil
- Gute Oberflächenqualität
- Wenig Verzug, keine Einfallstellen
- Hohe Maßgenauigkeit
- Geringere Schließkraft
- Geringe Druckspitzen

## Nachteile

- Hohe Kosten für Tauchkantenwerkzeuge
- zusätzliche Steuereinheit notwendig
- Bei Kniehebelanlagen: Umrüstung auf Druckkissenanstattung notwendig

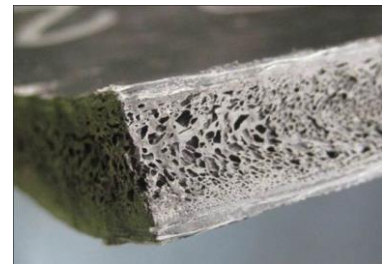
## Thermoplast-Schaum-Spritzgießen



## Merkmale

### Formteile aus geschäumten Thermoplasten

- Struktur- und Leichtbauanforderungen an Spritzgießteile:
  - Gewichts/ Materialersparnis
  - Kostenreduzierung
  - Isolierfähigkeit
  - Verminderung von Verzug
- Geschäumte Formteile bieten hohe mechanische Festigkeitswerte bei geringem Gewicht
- Zellige Innenstruktur bei geschlossener Außenoberfläche
- Hohe Maßgenauigkeit



## Verfahrenstechnik

### Prinzip

- Gasbeladene Polymerschmelze steht in der Plastifiziereinheit und Einspritzdüse unter Druck
- Entspannung der Schmelze bei Eintritt in das Werkzeug → Gasexpansion Ursache: geringer Schäumdruck, d. h. das Gas verbleibt in der Schmelze in Lösung, solange, bis der Schmelzedruck den Schäumdruck unterschreitet.
- Aufschäumen, Bildung einer Zellstruktur
- Vollständige Füllung der Kavität durch Gasdruck
- Erstarrung der Randschicht an der Werkzeugwand, Bildung einer Außenhaut

### Treibmittel

- Physikalische Treibmittel (z.B. Flüssig-N<sub>2</sub>, Flüssig-CO<sub>2</sub>, Pentan):  
niedrigsiedende Stoffe, die unter Wärmezufuhr/ Druckentlastung verdampfen
- Chemische Treibmittel (z.B. Azodincarbonamid):  
reagieren oder zerfallen unter Wärmeeinfluss und führen zur Gasbildung

### Art der Gasbeladung

- Druckinjektion der Treibmittel in die flüssige Schmelze
  - direkt in der Plastifiziereinheit
  - erfordert zusätzliche Anlagentechnik
- Verwendung von bereits gasbeladenem Granulat
  - Treibmittelinjektion erfolgt bereits bei der Compoundierung,
  - die Gase werden im granulierten Polymer eingeschlossen



## Verfahrensvarianten

### Niederdruckverfahren (< 50 bar)

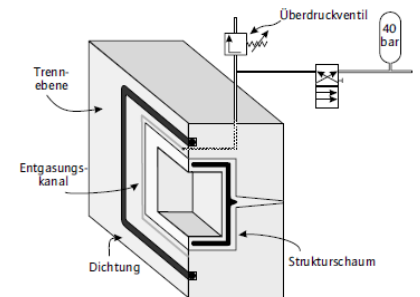
- Schussvolumen < Kavitätsvolumen = Formteildimensione
- Volumetrische Füllung durch Aufschäumen

### Hochdruckverfahren (> 50 bar)

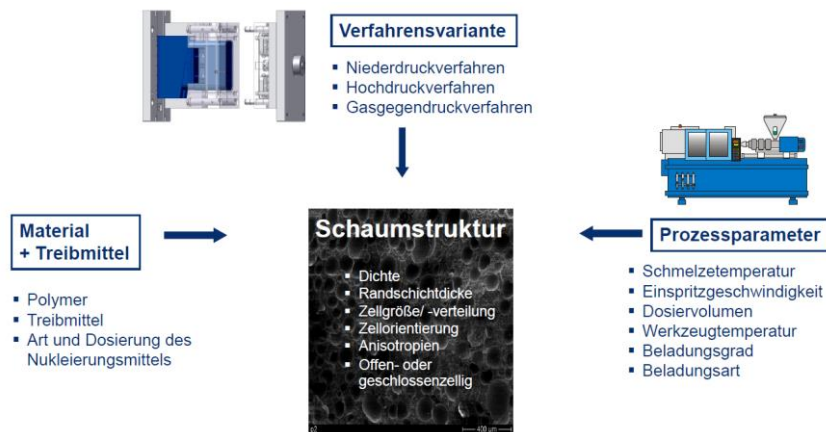
- Schussvolumen = Kavitätsvolumen < Formteildimensione
- Verdichtung der Randschichten durch Nachdruck
- Aufschäumen nach Teilöffnen des Werkzeuges auf Formteildimensione („Atmendes Werkzeug“)

### Gasgegendruckverfahren

- Schussvolumen = Kavitätsvolumen = Formteildimensione
- Einspritzen gegen zuvor eingestellten Gasdruck in der Kavität  
→ Gasdruck wird durch Überdruckventil gesteuert
- Aufschäumen erst beim Abkühlvorgang durch Volumenkontraktion



## Einflüsse auf die Schaumstruktur



## Einsatz

### Anwendungsgebiete

- Isolierbehälter
- Gehäuse und Verkleidungen
- Automobilteile (Stoßfänger, Lenkräder, Cockpitteile ...)
- Schutzhelme
- Möbel

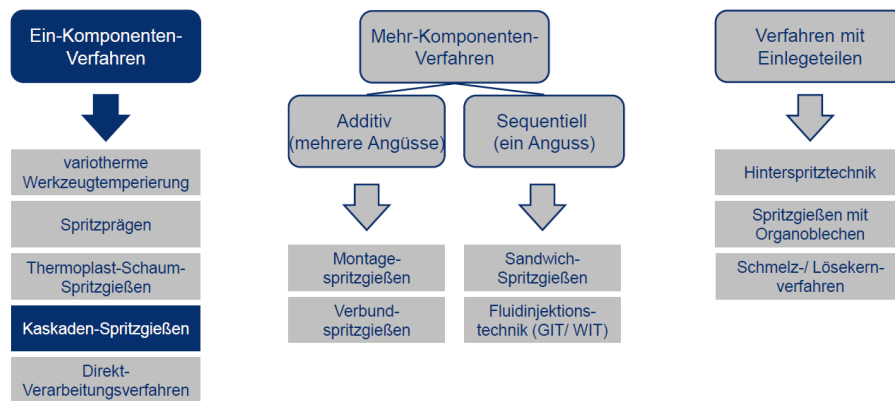
### Vorteile

- Geringes Gewicht
- Hohe Steifigkeit
- Isolationseigenschaften
- Mechanische Dämpfung
- Geringer Einspritz- und Nachdruck (< 100 bar)

### Nachteile

- Zusätzliche Anlagentechnik
- Schlechte Oberflächenqualität
- Frühes Aufschäumen bereits bei Düsenaustritt führt zu Strukturfehlern im Bauteil

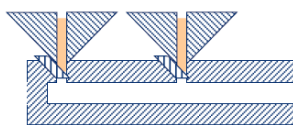
## Kaskaden-Spritzgießen



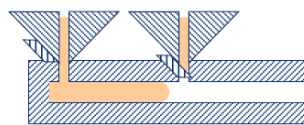
### Merkmale

#### Realisierung von langen Fließwegen

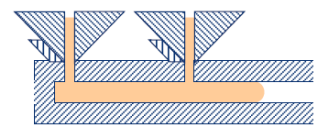
- Komplexes Heißkanalsystem mit mehreren Angüssen
- Hintereinandergeschaltetes Öffnen der Angussdüsen (Kaskade = stufenförmiger Aufbau)



$t_1$ : alle Angüsse verschlossen



$t_2 > t_1$ : erster Anguss freigegeben



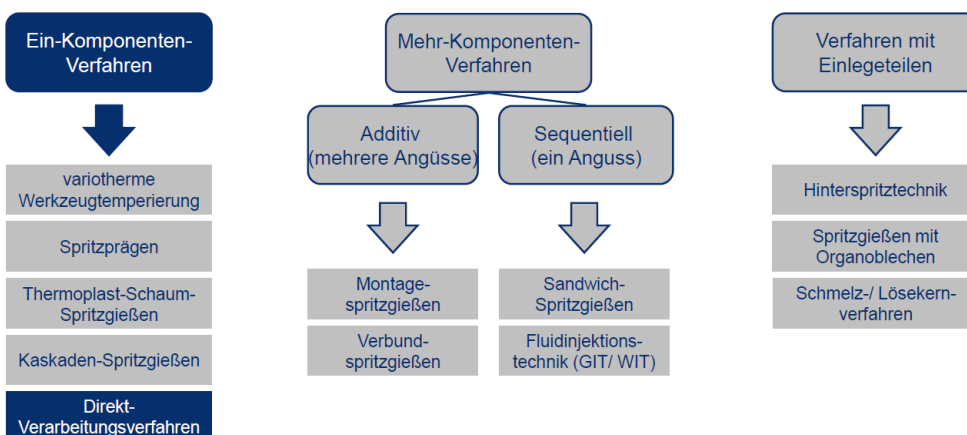
$t_3 > t_2$ : nächster Anguss freigegeben usw.

- Kein vorzeitiges Erstarren
- Gleichmäßige Randschichten
- Vermeidung von Bindenähten
- Aufwendige Steuerung nötig!



Heißkanal-Verteilersystem für Kaskaden-SG  
[Mold Hotrunner Solutions]

## Direktverarbeitungsverfahren



### Herkunft

Compoundierung von Kunststoffen zur anspruchsgerechten Eigenschaftsmodifikation

→ Herkömmliche Aufbereitung im Zwei-Stufen-Prozess

1. Aufbereitung/ Compoundierung auf Doppelschneckenextrudern
2. Granulierung + Abkühlung
3. Formgebende Verarbeitung mit erneutem Aufschmelzvorgang
4. Entformung und Abkühlung



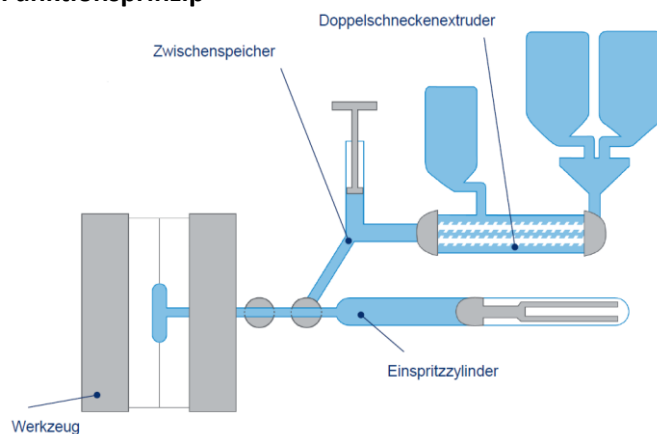
### Zusammenfassung in einem Ein-Stufen-Prozess

- beide Verfahrensschritte auf einer Maschine
- Schwierigkeit:
- Compounder arbeitet kontinuierlich
- Spritzgießmaschine arbeitet zyklisch

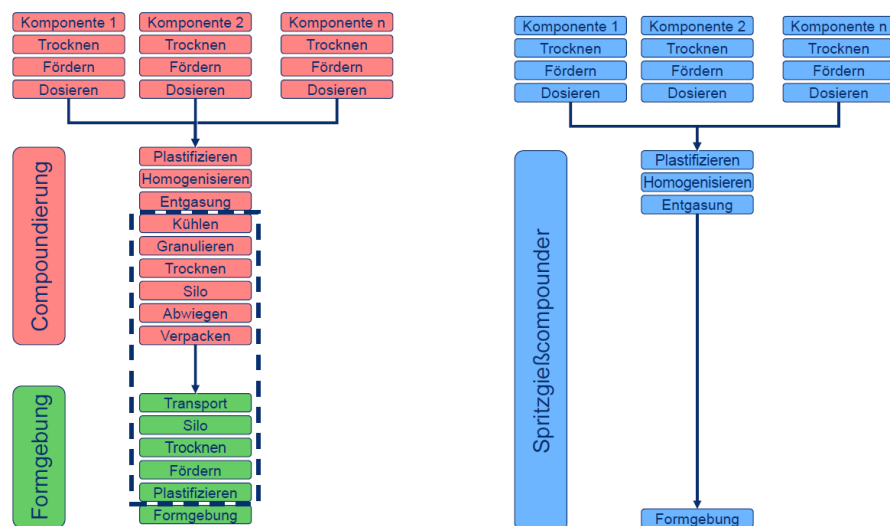
➔ Spritzgießcompounder (Injection Moulding Compounder, IMC) mit Zwischenspeicher



### Funktionsprinzip



### Einsparung von Prozessschritten



### Einsatz

Vorteile gegenüber Zweistufenprozessen:

- Geringere Faserschädigung
- Höhere Füllgrade möglich

- Geringere thermische Belastung der Schmelze
- Bessere mechanische und thermische Eigenschaften des Produktes
- Einsparung von Energie, Lagerkapazität, Verpackungsmaterial etc.
- Kostenvorteile der Rohstoffe gegenüber fertigen Compounds

➔ **Manche Prozesse sind ausschließlich als Einstufenprozess möglich (z.B. extrem hohe Füllgrade, manche chemische Modifikationen)**

## Mehr-Komponenten-Verfahren

### Allgemeines

- In Mehr-Komponenten-Verfahren befüllen mehrere Plastifizier-/ Einspritzaggregate das gleiche Werkzeug
- Je nach Verfahren erfolgen die Einspritzvorgänge sequentiell über einen gemeinsamen oder additiv über mehrere separate Angusskanäle.

Unterschiedliche Verfahrensziele:

- Herstellung von mehrfarbigen Bauteilen
- Material- und Eigenschaftskombination (z.B. Thermoplast-Elastomer-Verbund)
- Integration mehrere Arbeitsschritte in einen einzelnen Prozess
- Realisierung komplexer Geometrien

➔ Mehr-Komponenten-Verfahren erfordern eine komplexe Maschinen-, Werkzeug- und Steuerungstechnik.

## Montage- und Verbundspritzgießen

### Bauteile aus mehreren Farben oder Materialien



[Oechsler AG]



[Seibel Kunststofftechnik]



[Ikea]



[Wacker Chemie AG]

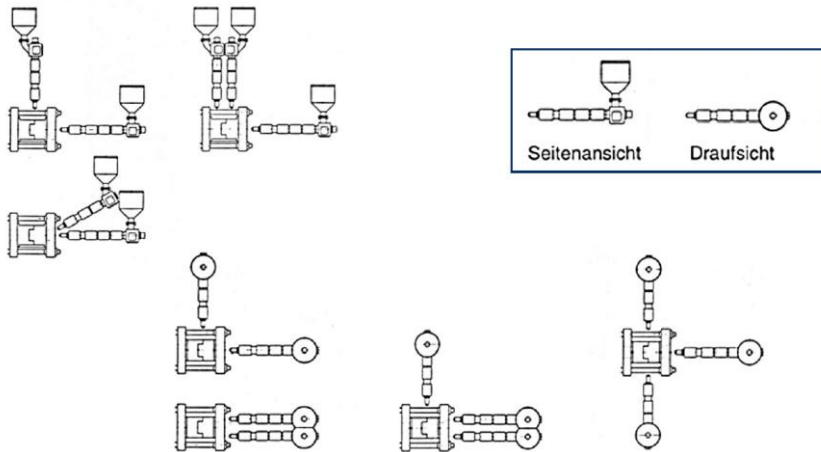


[Lightec24]

### Merkmale

- Herstellung von Bauteilen aus mehreren Werkstoffen in einem integrierten Prozess
- Kein anschließendes Verbinden von Einzelteilen
- Befüllung des Werkzeugs über mehrere separate Angussysteme (additives Verfahren/ „Aneinanderspritzen“)
- Verbundspritzgießen: Herstellung eines Stoff- oder Formschlusses
- Montagespritzgießen: Herstellung von integrierten Funktionsteilen aus zueinander beweglichen Einzelkomponenten

## Anordnung der Spritzaggregate



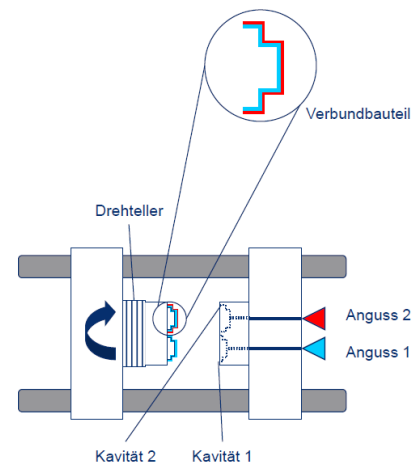
## Verfahrenstechnik

### Ablauf

1. Einspritzen über Angussystem 1 in Kavität 1
2. Zwischenöffnen des Werkzeuges
3. Umsetzen des entstandenen Preforms in Kavität 2
4. Einspritzen über Angussystem 2 in Kavität 2

### Varianten des Umsetzvorgangs

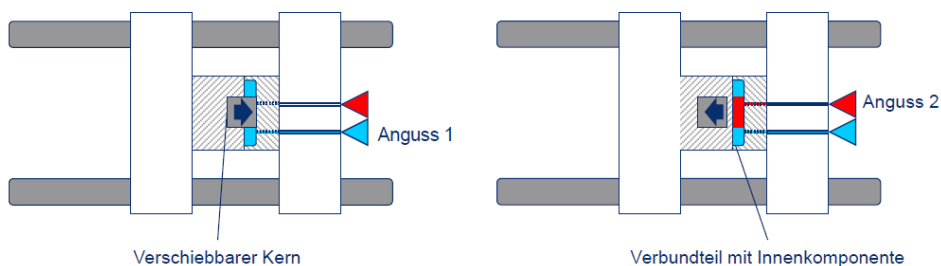
- Umsetzen über Handlingsystem (bei starrem Werkzeug)
- Drehung der schließseitigen Werkzeughälfte per Drehteller
- Drehkreuz innerhalb des Werkzeugs



## Verfahrensalternativen

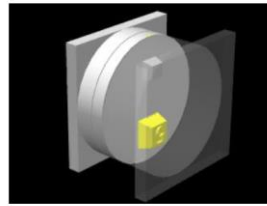
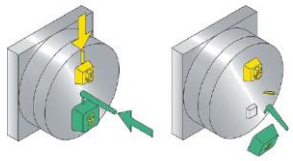
### Kernrückzugs-Verfahren („Core-Back“)

- Prozess ohne Zwischenöffnen und Umsetzen
- Werkzeug ist mit verschiebbaren Kernen/ Einsätzen ausgestattet
- Zunächst nur teilgeöffnete Kavität für Komponente 1
- Anschließend Verschieben des Kerns  
→ Öffnung der Restkavität für Komponente 2

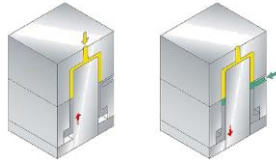


## Anschauungsbeispiele

### Drehtellerverfahren:



### Core-Back-Verfahren:



## Herstellung beweglicher Formteile

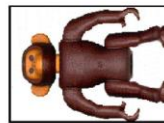
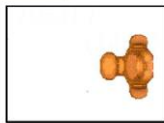
### Besonderheiten des Montagespritzgießens

- Komponenten nicht starr verbunden sondern zueinander beweglich  
→ Herstellung von integrierten Bauteilen in nur einem Arbeitsschritt
- Realisierung von Gelenken, Scharnieren und Lagerungen
- Das nötige Spiel entsteht durch unterschiedliche Materialschwindung
- Kein Stoffschluss: Materialien sollten nicht adhäsiv zueinander sein



### Beispiel: Playmobilaffe

Kopf: Werkstoff PBT

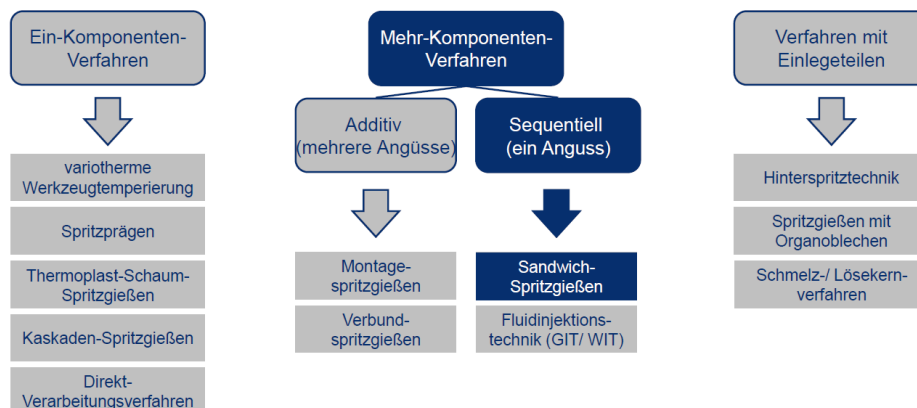


Gliedmaßen: Werkstoff POM,  
unverträglich mit PA 6  
→ beweglich nach Abkühlung

Torso: Werkstoff PA 6 GF15,  
unverträglich mit PBT,  
→ beweglich nach Abkühlung

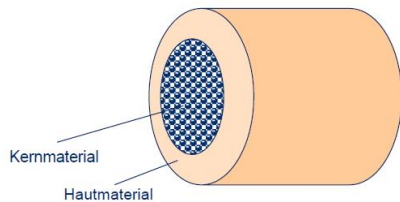


## Sandwich- Spritzgießen



## Merkmale

- Herstellung von Bauteilen aus zwei Materialien im Schichtverbund
- Einspritzen beider Komponenten hintereinander über den gleichen Anguss (sequentielles Verfahren/ „Ineinanderspritzen“)
- Sandwich-Aufbau aus Haut- und Kernmaterial (von außen nicht sichtbar)

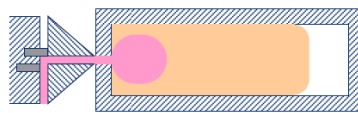


## Verfahrenstechnik

### Ablauf



1. Einspritzen des Hautmaterials (Teilfüllung)



2. Einspritzen des Kernmaterials



3. Volumetrische Füllung der Kavität



4. Nachdruckphase mit Hautmaterial

### Kombination verschiedener Materialeigenschaften

- Das Sandwich-Verfahren ermöglicht Bauteile mit breitem Eigenschaftsspektrum.

Materialkompatibilität abhängig von:

- E-Modul
  - Wärmeausdehnung
  - Schwindung
  - Adhäsion
  - Verarbeitungstemperatur
- 
- Zu hohe Eigenschaftsdifferenzen führen zu Eigenspannungen  
→ Verzug und/ oder Bauteilschädigung (Rissbildung, Grenzflächenablösung)

## Einsatz

Typische Eigenschaften ...

... der Hautkomponente

- Hohe Oberflächenqualität
- Gute Haptik
- Hohe Medienbeständigkeit
- Geringe Entzündlichkeit
- Hohe Schlagzähigkeit

... der Kernkomponente

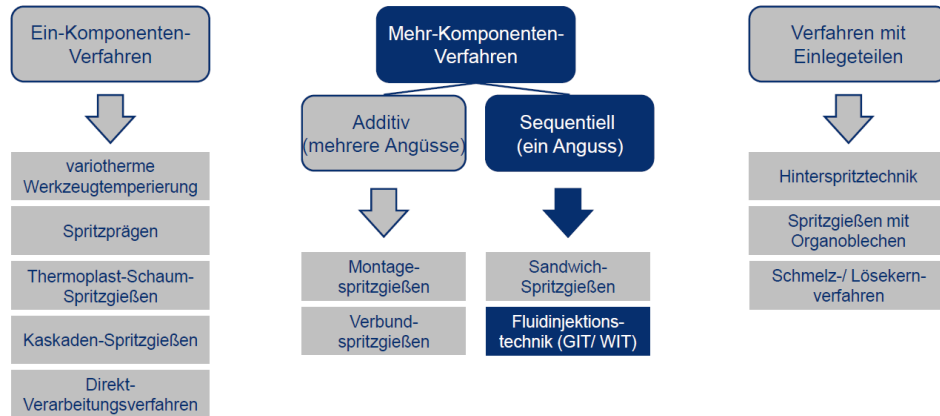
- Geringe Dichte/ geschäumt
- Hohe Steifigkeit
- Isolierfähigkeit
- Geringer Preis
- Rezykliertes Material



## Anwendungen

- Bauteile mit geschäumtem Kern und dennoch hochwertiger Oberfläche
- Elastische Oberflächen bei hoher Steifigkeit durch hartes Kernmaterial
- Hart-Weich-Verbindungen
- Einsatz von Rezyklat ohne Einbußen der Oberflächenqualität

## Fluidinjektionstechnik (GIT&WIT)



## Merkmale

### Herstellung von langen, hohlen Bauteilen

- Verfahren analog zum Sandwich-Spritzgießen
- Injizieren von inertem Gas oder Wasser in die Kavität (anstelle eines zweiten Materials)
- Entstehung von Hohlräumen durch Verdrängung von Schmelze
- Hohe Gestaltungsfreiheit für komplexe Bauteile



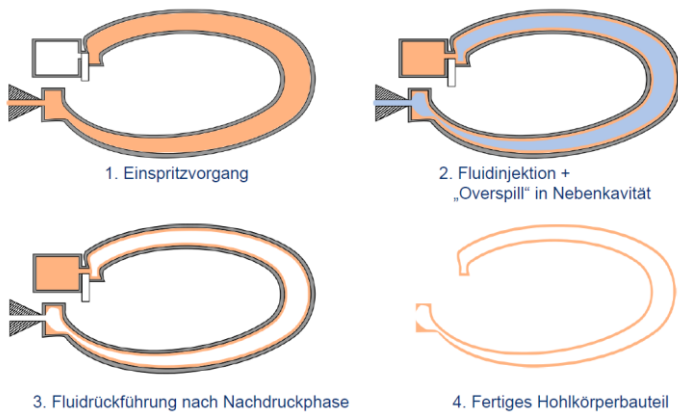
## Verfahrenstechnik

### Aufblasverfahren

- Teilfüllung der Kavität mit genau dosierter Menge an Polymer (siehe Sandwich-Spritzgießen)
- Fluidinjektion
  - Weitertreiben der Schmelzefront bis Kavität volumetrisch gefüllt
- Fluidnachdruck zur Kompensation von Schwindung
- Fluidausleitung
- Nachteil: Umschaltmarken an der Oberfläche

### Overspill-Verfahren

- Vollständige Füllung der Kavität mit Polymer
- Schmelzenachdruck zur Kompensation von Schwindung
- Fluidinjektion + Öffnen einer Nebenkavität
  - Verdrängung der überschüssigen Schmelze
- Fluidnachdruck zur Kompensation von Schwindung
- Fluidausleitung
- Nachteil: komplexere Werkzeugtechnik



### Gasinjektionstechnik (GIT)

- Inertes Gas (üblicherweise Stickstoff) als Injektionsmedium  
→ Bereitstellung aus Flüssigtanks oder über Stickstoffgewinnung aus Umgebungsluft
- Injektionsdrücke zwischen 50 bis 200 bar
- Konstanter Gasdruck in allen Hohlräumen → Minimierung von Verzug
- Gaseinbringung über Einspritzdüse  
→ Anguss und Gaseintrittsöffnung an gleicher Stelle
- Gaseinbringung über zusätzliche Injektionsdüse(n)  
→ Freie Anordnung des Injektionspunkts  
→ Flexiblere und komplexere Bauteilgestaltung  
→ Höhere Werkzeugkosten

### Anwendungsgebiete

- Rohre/ Medienleitungen
- Verrippte Bauteile (Rippen als Gasführungskanäle)
- Automobilindustrie (Stoßfänger, Türinnenmodule, Schalthebel, Griffe, Wärmetauscherrohre, ...)
- Gehäusefertigung (Monitor- und Fernsehgehäuse, PC-Tastaturen)
- Haustechnik (Staubsaugergehäuse, Gasbrennerhauben, Geräte- und Duschgriffe)



### Vorteile

- Gestaltungsfreiheit, hohe Bauteilkomplexität
- Kürzere Zykluszeiten
- Gewichts- und Materialreduktion
- Hohe Abformgenauigkeit und gute Oberflächen
- Gleichmäßige Schwindung/ verzugsarme Bauteile
- Geringere Werkzeuginnendrucke → geringere Schließkraft vonnöten
- Vergleichsweise einfache Werkzeugkonstruktion (im Vergleich zu Schiebern oder Kernen)

### Nachteile

- Zusätzliche Anlagentechnik
- Zusätzliche Anlageninvestitionen (Gasdruckerzeugung, -regelung)
- Gaskosten
- Komplexe Prozessführung (Anfahrchwierigkeiten, anspruchsvolle Betriebspunktauslegung)
- Schwankungen der Wanddicke
- Je nach Anforderung können herkömmlicher Spritzguss und Spritzprägen ausreichende Qualität bei geringerem Kostenaufwand bieten
- Schlechte Innenoberflächen
- Frühes Aufschäumen bereits bei Düsenaustritt führt zu Strukturfehlern im Bauteil

## Wasserinjektionstechnik (WIT)

### Merkmale

- Verwendung von Wasser statt Gas als Injektionsmedium
- Wasserdrücke von 50 bis 200 bar
- Hohe Volumenströme um Verdampfen zu verhindern

### Vergleich zur GIT

- Grundsätzlich gleiche Anwendungsgebiete
- Verbesserte Wärmeabfuhr → kürzere Zykluszeiten
- Inkompressibilität → gleichmäßigere und geringere Wanddicken
- Bessere Konzentrität an Umlenkstellen
- Bessere Innenoberflächen
- Nicht für alle Polymere geeignet (Reaktionsneigung)
- Erhöhter werkzeugtechnischer Aufwand für Dichtigkeit und Korrosionsschutz

## Verfahren mit Einlegeteilen

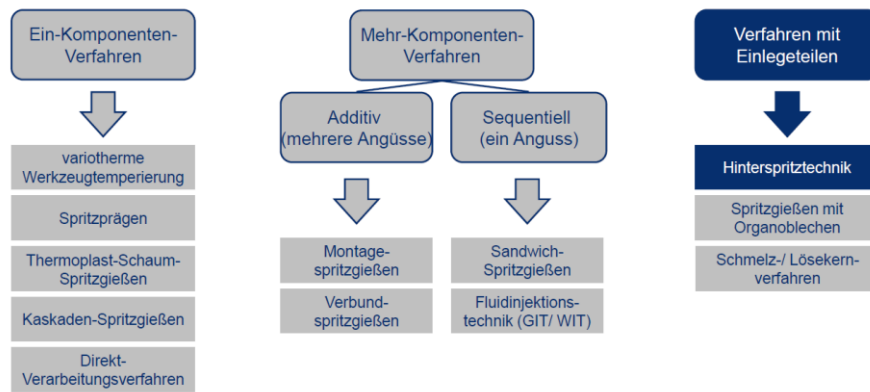
### Allgemeines

- Für verschiedene Zwecke werden Einlegeteile in das Spritzgießwerkzeug eingebracht.
- Je nach Verfahren werden diese hinter- oder umspritzt.
- Es können somit Verbundbauteile hergestellt werden, bei denen einer der Komponenten nicht im Spritzgießverfahren hergestellt werden kann.

### Mögliche Einsatzgebiete:

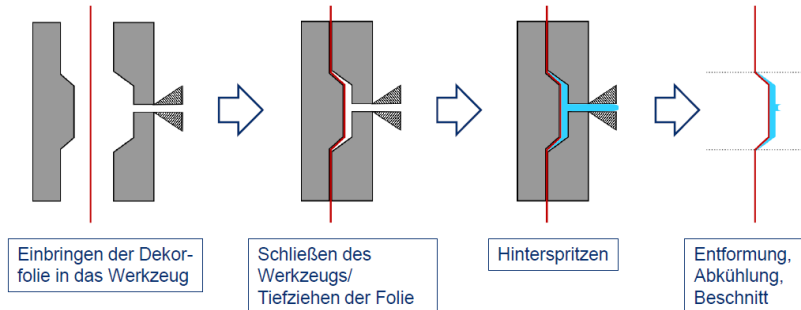
- Hinterspritzen von Folien
- Um- oder Anspritzen von Metallkomponenten
- Verarbeiten von Faser-Preforms/ -Prepregs

## Hinterspritztechnik



### Merkmale und Verfahrenstechnik

- Herstellung von Spritzgießteile mit Oberflächendekoren
- Stoffschlüssiger Verbund aus Thermoplast und Dekorfolie oder –textil
- Ablauf:

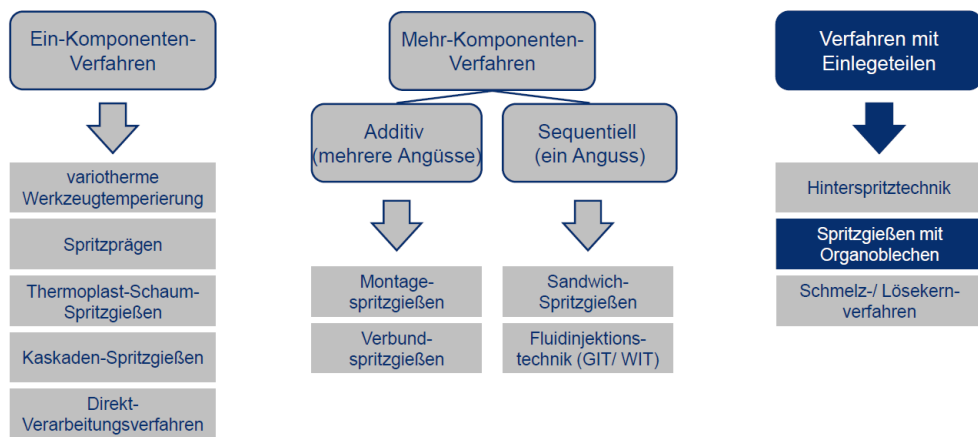


### Beispiele

Formteile mit dekorierten Oberflächen

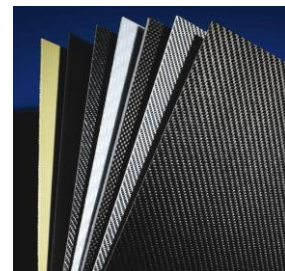


## Spritzgießen mit Organoblechen



### Merkmale Organobleche

- Thermoplastische Prepregs = vorimprägnierte (preimpregnated) Faser-Matrix-Halbzeuge
- Endlosfaserverstärkung
- i.d.R. Kohle- oder Glasfasern
  - > Unidirektionale Schicht
  - > Gelege
  - > Gewebe
- Matrixmaterial aus PP, PA, ...



### Verfahrenstechnik



### Beispiel

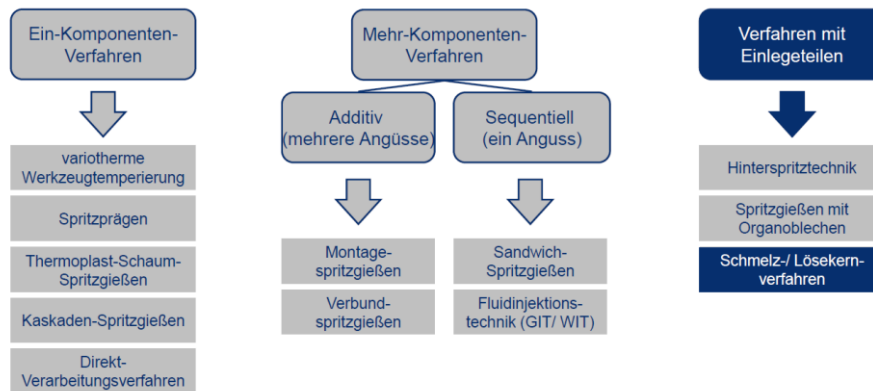
FiberForm-Prozess (Krauss Maffei)

### Einsatz

- Anwendungsgebiete
- Automobilindustrie
- Bodenmodule
- Säulen- und Dachrahmenstrukturen
- Stoßfänger
- ...
- Leichtbauanwendungen
- Sportartikel (Helme, Skischuhe, ...)
- Präzise Automatisierungstechnik (Reduzierung der bewegten Masse)



## Schmelz-/Lösekernverfahren



### Merkmale

Herstellung eingeschlossener Hohlräume und Hinterschnitte

Ansatz:

- Umspritzen von ins Werkzeug eingebrachten Kernen
- Nachträgliches Entfernen des Kerns ohne Bauteilschädigung

Umsetzung:

- Kerne aus niedrigschmelzenden Metalllegierungen (z.B. Zinnlegierung)
- Kerne aus wasserlöslichen Materialien (z.B. Acrylatpolymer)



### Einsatz

#### Vorteile

- Komplexe Geometrien
- Maßgenaue Innenkonturen
- Hohe Oberflächenqualität im Hohlraum
  - > gute Strömungsverhältnisse bei z.B. Rohren

#### Nachteile

- Zusätzliche Kernherstellungskosten
- Zusätzliche Arbeitsschritte (Einlegen + Entfernen des Kerns)

## Zusammenfassung

### Herstellung anspruchsgerechter, hochintegrierter Bauteile

Spritzgießsondervverfahren ermöglichen die Fertigung von Bauteilen, die jenseits der Grenzen des herkömmlichen Spritzgießens liegen.

- Verwirklichung unterschiedlichster Bauteilanforderungen
- Je nach Sondervverfahren gelingt die Realisierung von:
  - > spannungsarmen Bauteilen
  - > hohen Oberflächenqualitäten
  - > minimalem Verzug
  - > hoher Maßhaltigkeit
  - > Hohlräumen
  - > Verbundbauteilen und Bauteilen mit Gelenken
  - > Leichtbauteilen
  - > geringerer Anzahl an Verfahrensschritten (Direktverarbeitung)
- Häufig zusätzliche Investitionskosten für Werkzeugtechnik, Anlagenkomponenten und/ oder Steuerung notwendig