

## 4 Werkzeug- und Formteilmaß

### 4.1 Einflussfaktoren

Im Abschnitt 1.2. wurde bereits ein Überblick über die werkzeugseitigen Einflussfaktoren auf die Maßbildung gegeben. Hier sollen einige dieser Faktoren tiefergehend analysiert werden, um daraus Schlussfolgerungen für den Werkzeugbau abzuleiten.

- Da sich die fertigungsbedingten Maßabweichungen eines Formteils aus der Gesamtheit der Einflussfaktoren von Formstoff, Werkzeug, Maschine und Prozess ergeben, ist es erforderlich, die Toleranzen eines konturgebenden Maßes deutlich enger zu gestalten als am Formteil.
- Die Konstruktion eines Werkzeugs für Präzisionsteile muss von vorn herein verhindern, dass größere elastische Verformungen auftreten, d.h. die Gesamtkonstruktion muss sich durch hohe Steifigkeit auszeichnen. Das bedeutet im einzelnen: große Wanddicken der Platten, geschlossener Distanzrahmen, kleiner Auswererraum, große Querschnitte bei Verriegelungen von Schiebern und Kernzügen.
- Die Fertigungsverfahren für die Werkzeuge sind in Verbindung mit der Wahl der Werkzeugwerkstoffe so zu wählen, dass den hohen Präzisionsforderungen Rechnung getragen wird. Das heißt z.B. die Wahl von ölhärtenden, verzugsarmen Werkzeugstählen, Einsatzhärtung usw.
- Unter dem besonderen Gesichtspunkt von Qualität und Präzision ist eine möglichst niedrige Fachzahl anzustreben. Das vereinfacht die Werkzeugkonstruktion, eliminiert Maßunterschiede zwischen den einzelnen Formnestern und schließt Differenzen der Temperaturen und Drücke in den verschiedenen Formnestern aus. Die Erhöhung der Fachzahl um nur ein Formnest erhöht die Schwindungsstreuung  $\Delta VS$  um 1 bis 5 %.
- Bei Mehrfachwerkzeugen müssen die Fließweglängen und -querschnitte entweder gleich oder rheologisch angepasst sein, damit in allen Formnestern gleiche Drücke wirken. Günstiger ist Einzelanspritzung mit Heißkanalverteiler.
- Präzisionswerkzeuge erfordern eine besonders sorgfältige Auslegung des Angußsystems und der Werkzeugtemperierung.
- Bei der Auslegung von konturbildenden Maßen kann nur die Maßverschiebung durch den (geschätzten) mittleren Schwindungswert berücksichtigt werden. Schwindungsstreuungen äußern sich in einer generellen Verbreiterung des Toleranzfeldes.
- Die noch zulässige Werkzeugabnutzung wird auf 0,03 bis 0,06 mm geschätzt. Sie hängt von der Fertigungsaufgabe ab. Das entspricht etwa einer

Toleranzklasse. Bezuglich der Formteiltoleranzen ist zu beachten, dass die Werkzeugabnutzung die Außen- und Innenmaße des Formteils ungleichmäßig beeinflusst. Noch stärkere Wirkung haben Verschleißerscheinungen an bewegten Teilen (Führungen), die zum Versatz führen.

## 4.2 Verarbeitungsschwindung

### 4.2.1 Beeinflussung der Verarbeitungsschwindung durch die Prozessführung

Prinzipiell ist es möglich durch sehr hohe Werkzeugfülldrücke (Überladung) jeden beliebigen Wert der Verarbeitungsschwindung im Werkzeug zu realisieren. Aus diesem Grunde ist der Prozessführung des als optimal ermittelten Füll- und Nachdrucks besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Das betrifft die *Umschaltung von Füll- auf Nachdruck* sowie die *Nachdruckführung* über die Nachdrückzeit. Weiter besteht die Prämisse, konstruktiv zu sichern, dass die Nachdruckwirkung bis zu einer definierten Formteiltemperatur erhalten bleibt (Siegelzeit).

Bild 14 zeigt ein pVT-Diagramm von Polystyren als Grundlage für eine optimale Prozessführung und gesteuerte Maßbildung.

Für unsere Betrachtungen soll der Kurvenverlauf 3 herangezogen werden. Er beschreibt das Spritzen mit Massepolster und konstantem Nachdruck, denn nur mit einem definierten Nachdruck (konstant oder gesteuert) sind tolerierte Funktionsmaße zu erzeugen. Bei K3 erfolgt die Umschaltung von Füll- auf Nachdruck, der hier bei ca. 30 MPa liegt. Mit stetiger Abkühlung wird der Siegelpunkt SP erreicht, von dem ab jeglicher Formmasse austausch zwischen Werkzeughohlraum und Spritzeinheit ausgeschlossen ist. Mit diesem Punkt ist die endgültige Masse m des Spitzlings durch das spezifische Volumen  $V_S$  der Schmelze am Siegelpunkt und das Volumen V des Werkzeughohlraums gegeben:

$$m = V / V_S$$

Der Kurvenverlauf 1 zeigt den hypothetischen Fall einer übermäßigen Verdichtung, die zu einer Verarbeitungsschwindung  $VS = 0$  führen würde. Real wird die Normaldruckkurve ( $p = 0,1 \text{ MPa}$ ) bei einer höheren Temperatur am Punkt WP erreicht. Ab hier schrumpft das Formteil von der Kontur ab. Die Differenz der spezifischen Volumina am Siegelpunkt  $V_S$  und drucklos bei Raumtemperatur  $V_R$  ist die Ursache für die Verarbeitungsschwindung.

Der Wert der linearen Schwindung (Maßschwindung) beträgt dann bei angennommener gleicher Schwindung in allen drei Raumrichtungen ein Drittel der Volumenschwindung:

$$dL/L = 1/3 \cdot dV/V$$

Tatsächlich ist aber die Verarbeitungsschwindung in Fließrichtung stärker behindert und deshalb kleiner; entsprechend ist die Verarbeitungsschwindung in Richtung der Wanddicke relativ vergrößert. Die Schwindungsbehinderung wird einmal durch die *Wandhaftung der Schmelze* und zum anderen durch die *Haftung der Materialschichten über den Querschnitt* aneinander, die infolge der Abkühlung unterschiedliche Viskositäten aufweisen, bewirkt.

Weitere strukturbedingte Ursachen für Schwindungsanisotropien sind *Orientierungsvorzugsrichtungen* der Moleküle und *Kristallisationsvorzugsrichtungen* (Texturen). Auch *faserförmige Füll- und Verstärkerstoffe* behindern die Schwindung in Fließrichtung.

Neben dem Nachdruck nimmt die *Formmassetemperatur* beim Einspritzen wesentlichen Einfluss auf die Schwindung. Obwohl die Formmassetemperatur theoretisch zu einer erhöhten Schwindung führen müßte, überwiegen doch die bessere Druckfortpflanzung und Formfüllung unter Nachdruckwirkung auf Grund der verringerten Viskosität. Im Ergebnis werden verringerte Schwindwerte festgestellt [10].

Hinzu kommen noch Ungleichmäßigkeiten in der *Temperaturverteilung* über das gesamte Formteil, die örtlich unterschiedliche Dichten und Spannungen bewirken. Auch diese Effekte erzeugen Maßabweichungen.

Würde man dem hypothetischen Druckverlauf nach Kurve 1 folgen, ergäben sich deshalb, trotz  $VS = 0$ , Maßabweichungen in Fließrichtung und quer dazu.

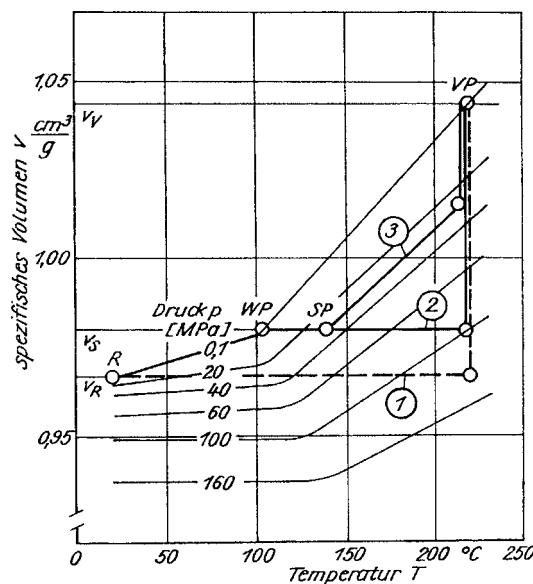


Bild 14: Schematisiertes pVT-Diagramm von Polystyren (aus [9])

**Tab. 22:** Orientierungswerte der Verarbeitungsschwindung VS in % für das Urformen  
(aus [2; 11; 12])

|                        |             |                   |             |
|------------------------|-------------|-------------------|-------------|
| LDPE                   | 1,5 ... 3,0 | PF 11             | 0,7         |
| HDPE                   | 1,5 ... 3,0 | PF12              | 0,6         |
| HDPE, geschäumt        | 1,5 ... 3,0 | PF 31             | 1,25        |
| PP                     | 1,3 ... 2,5 | PF 51             | 1,1         |
| PP-GF 20               | 1,2 ... 2,0 | PF 71             | 0,7         |
| PP, geschäumt          | 1,5 ... 2,5 |                   |             |
| EVA                    | 0,8 ... 2,2 |                   |             |
| PB                     | 1,5 ... 2,6 |                   |             |
| PVC-U                  | 0,4 ... 0,8 |                   |             |
| PVC-U, geschäumt       | 0,5 ... 0,7 |                   |             |
| PVC-P                  | 0,7 ... 3,0 |                   |             |
| PVC-P, geschäumt       | 0,7 ... 3,0 |                   |             |
| PS                     | 0,4 ... 0,7 | UF 131            | 0,95        |
| PS, geschäumt          | 0,4 ... 0,6 | UF 151            | 1,0         |
| PS-HI                  | 0,4 ... 0,7 | UF 153            | 0,6         |
| SAN                    | 0,4 ... 0,6 | UF 155            | 0,65        |
| SAN-GF 30              | 0,2 ... 0,3 | UF 156            | 1,4         |
| ABS                    | 0,4 ... 0,7 |                   |             |
| ABS-GF 30              | 0,1 ... 0,3 |                   |             |
| ABS, geschäumt         | 0,4 ... 0,7 |                   |             |
| ASA                    | 0,4 ... 0,7 |                   |             |
| PMMA                   | 0,3 ... 0,8 |                   |             |
| POM                    | 1,5 ... 2,5 | EPDM              | 1,0 ... 2,0 |
| POM-GF 30              | 0,5 ... 1,0 |                   |             |
| PA 6                   | 0,8 ... 2,5 | PC                | 0,6 ... 0,7 |
| PA 6-GF 30             | 0,2 ... 1,2 | PC, geschäumt     | 0,7 ... 0,9 |
| PA 6,6                 | 0,8 ... 2,5 | PC-GF 30          | 0,2 ... 0,4 |
| PA 6,6-GF 30           | 0,2 ... 1,2 | PET, kristallin   | 1,6 ... 2,0 |
| PA 6,10                | 0,8 ... 2,0 | PET, amorph       | 0,2         |
| PA 11                  | 1,0 ... 2,0 | PET-GF 30         | 0,2 ... 2,0 |
| PA 11-GF 30            | 0,3 ... 0,7 | PBT               | 1,0 ... 2,2 |
| PA 12                  | 1,0 ... 2,0 | PBT, geschäumt    | 2,0 ... 2,5 |
| PA 12-GF 30            | 0,5 ... 1,5 | PBT-GF 30         | 0,5 ... 1,5 |
| PA 12-GF 50-Glaskugeln | 0,9         |                   |             |
| PA 6-3-T               | 0,5 ... 0,6 |                   |             |
| PA 6-3-T-GF 35         | 0,16...0,22 |                   |             |
| CA                     | 0,4 ... 0,7 | PPE/PS            | 0,5 ... 0,8 |
| CP                     | 0,4 ... 0,7 | PPE/PS-GF 30      | 0,2         |
| CAB                    | 0,4 ... 0,7 | PPE/PS, geschäumt | 0,6 ... 0,8 |
| PSU                    | 0,6 ... 0,8 | PES               | 0,6         |
| PSU-GF 40              | 0,2 ... 0,4 | PES-GF 40         | 0,15        |
| PEK                    | 0,7 ... 0,9 | PPS-GF 40         | 0,2         |
| PEK-GF 30              | 0,3 ... 0,8 |                   |             |
| PA arom.               | 0,4 ... 0,6 |                   |             |

#### 4.2.2 Berücksichtigung der Verarbeitungsschwindung bei der Werkzeugkonstruktion

Die Verarbeitungsschwindung wird bei der Werkzeugkonstruktion durch ein *Aufmaß* berücksichtigt:

$$L_F' = L_F / (1 - VS/100),$$

mit  $L_F'$  korrigiertes Formteilmaß;  $L_F$  Formteilmaß; VS Verarbeitungsschwindung.

In Tabelle 22 sind Orientierungswerte für die Verarbeitungsschwindung beim Urformen zusammengestellt. Tabelle 23 zeigt Werte für die Verarbeitungsschwindung für Umformverfahren.

In gleicher Weise lassen sich auch Nachschwindungen kompensieren. Auf diese Problematik wird im Kapitel 5 eingegangen.

Damit ist ein *Werkzeugmaß*, gleich ob Innen- oder Außenmaß, *stets größer als* das zu formende *Formteilmaß*:

- von einem Werkzeuginnenmaß schwindet die Formmasse ab; das Formteil löst sich von der Kontur;
- auf einen Kern (Werkzeugaußenmaß) wird die Formmasse stets aufschwinden und dabei elastische Spannungen einfrieren, die nach der Entformung das Maß des Formteils verkleinern.

Tab. 23: Schwindung beim Warmformen und Hohlkörperblasen (aus [13])

| Warmformen |             | Hohlkörperblasen |         |
|------------|-------------|------------------|---------|
| HDPE       | 2,0 ... 4,0 | LDPE             | ... 1,5 |
| PP         | 0,5 ... 2,0 | HDPE             | ... 2,5 |
| CA         | 0,7 ... 0,9 | PA 6             | ... 2,0 |
| PVC-U      | 0,5 ... 1,0 | PVC-U            | ... 0,4 |
| PS         | 0,5 ... 0,6 | PSsz             | ... 0,5 |
| ABS        | 0,8 ... 1,0 | PC               | ... 0,8 |
| PC         | 0,6 ... 0,8 |                  |         |

### 4.3 Erforderliche Toleranzen an Werkzeugen

#### 4.3.1 Ermittlung des Werkzeug-Nennmaßes

Da dem in Abschnitt 4.2.2 genannten Formteilmaß  $L_F$  ein definiertes Toleranzfeld zugeordnet ist, muss geklärt werden, wie die Nulllinie des entsprechenden Werkzeugmaßes zu legen ist. Nach DIN 16 749 gelten folgende Empfehlungen:

- a) Formteil-Außemaß = Werkzeug-Innenmaß

Von den Grenzmaßen des Formteils wird das arithmetische Mittel gebildet:  $(G_o + G_u)/2$ . Von diesem Mittelmaß wird die halbe Werkzeugmaßtoleranz nach 4.3.2 subtrahiert und so das Werkzeug-Nennmaß erhalten. Zweckmäßig setzt man dabei das schon korrigierte Formteilmäß  $L'_F$  ein:

$$L_W = (G'_o + G'_u)/2 - T_W/2.$$

- b) Formteil-Innenmaß = Werkzeug-Außemaß

Von den Formteil-Grenzmaßen wird in gleicher Weise das arithmetische Mittel gebildet und dazu die halbe Werkzeugtoleranz addiert:

$$L_W = (G'_o + G'_u)/2 + T_W/2.$$

- c) Mittenmaß (Teilungen)

Das Werkzeug-Mittenmaß entspricht dem korrigierten Formteil-Mittenmaß:

$$M_W = (M'_o + M'_u)/2.$$

Die Größen  $G'_{o,u}$  und  $M'_{o,u}$  beziehen sich auf die mit Schwindungsaufmaß korrigierten Größen gemäß Abschnitt 4.2.3.

### 4.3.2 Grundtoleranzen für Werkzeugmaße

Die Grundtoleranzen nach DIN 16 749 sind in Tabelle 24 dargestellt. Sie unterscheiden sich nach der Anwendung in

- 1: Formteilmäße ohne Toleranzangabe,
- 2: Formteilmäße der Genauigkeitsreihe 1 gemäß DIN 16 901,
- 3: Formteilmäße der Genauigkeitsreihe 2 gemäß DIN 16 901,
- 4: Formteilmäße gemäß der Toleranzgruppe „Feinwerktechnik“ nach DIN 16 901.

Engere Formteiltoleranzen erfordern auch engere Werkzeugtoleranzen. Ein Vergleich von Toleranzen aus den Tabellen 14 und 24 mit den ISO-Toleranzen der Tabelle 7 lässt erkennen, dass Werkzeuge mit höheren Genauigkeiten von 2 bis 3 ISO-Toleranzklassen gefertigt werden müssen als die Formteilmäße ausweisen.

### 4.3.3 Lage der Toleranzfelder von Werkzeugmaßen

Es werden folgende Lagen der Toleranzfelder empfohlen:

- a) Werkzeug-Innenmaße

Die gesamte Werkzeugmaßtoleranz ist als positives Abmaß an dem nach 4.3.1 ermittelten Werkzeug-Nennmaß (Nulllinie) vorzusehen:  $L_W + T_W/0$ .

Tab. 24: Maßtoleranzen für Werkzeugmaße nach DIN 16 749

| Lfd.<br>Nr. | Toleranzzuordnung<br>für   | Toleranz für   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |     |
|-------------|--|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|
|             |  | Nennmaßbereich |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |     |
| über<br>bis | 3  | 6              | 10   | 15   | 22   | 30   | 40   | 53   | 70   | 90   | 120  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630 | 800 |     |
|             |  | 3              | 6    | 10   | 15   | 22   | 30   | 40   | 53   | 70   | 90   | 120  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500 | 630 | 800 |
| 1           | Werkzeugmaße ohne Toleranzangabe<br>entsprechend den Formteilmäßen<br>ohne Toleranzangabe                                      | 0,1            | 0,1  | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,14 | 0,14 | 0,16 | 0,19 | 0,22 | 0,25 | 0,28 | 0,34 | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 2           | Werkzeugmaße mit Toleranzangabe<br>entsprechend den Formteilmäßen<br>mit Toleranzangabe, Reihe 1<br>nach DIN 16 901            | 0,05           | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,07 | 0,09 | 0,1  | 0,11 | 0,13 | 0,15 | 0,18 | 0,21 | 0,25 | 0,3  | 0,35 | 0,4  | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 3           | Werkzeugmaße mit Toleranzangabe<br>entsprechend den Formteilmäßen<br>mit Toleranzangabe, Reihe 2<br>nach DIN 16 901            | 0,03           | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,1  | 0,12 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,2  | 0,25 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 4           | Werkzeugmaße mit Toleranzangabe<br>entsprechend den Formteilmäßen<br>mit Toleranzangabe - Feinwerktechnik -<br>nach DIN 16 901 | 0,02           | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,1  |      |      |      |      |     |     |     |

b) Werkzeug-Außenmaße

Die gesamte Werkzeugmaßtoleranz ist als negatives Abmaß an dem nach 4.3.1 ermittelten Werkzeug-Nennmaß (Nulllinie) vorzusehen:  $L_W 0/-T_W$ .

c) Werkzeug-Mittenmaße

Die Werkzeugmaßtoleranz ist je zur Hälfte als positives und als negatives Abmaß vorzusehen:  $MW \pm T_W/2$ .

#### 4.3.4 Beispielrechnungen

##### Aufgabe 1

Es ist das Werkzeugmaß für eine Formteilbohrung von  $10 +0,08/0$  mm (Feinwerktechnik B) zu bilden. Das Formteil soll aus glasfaserverstärktem Polycarbonat bestehen.

1. Bildung des korrigierten Formteilmaßes

$$VS = 0,2\% \text{ (Tabelle 22)}$$

$$L_F' = 10 / (1 - 0,2/100) = 10,02 \text{ mm}$$

2. Auswahl der Maßtoleranz nach DIN 16 749 – 4

$$T_W = 0,02 \text{ mm}$$

3. Bildung des Werkzeug-Nennmaßes (Außenmaß)

$$L_W = (10,02 + 10,10)/2 + 0,01 = 10,07 \text{ mm}$$

4. Bildung des Werkzeugmaßes (Außenmaß)

$$10,07 0/-0,02 \rightarrow 10 +0,07/+0,05 \text{ mm}$$

##### Aufgabe 2

Es ist das Werkzeugmaß zu bilden für die Wanddicke 4 mm eines Formteiles aus HDPE in der Allgemeintoleranz 150 nach DIN 16 901.

1. Ermittlungen der Maßabweichungen am Formteil

4 mm Toleranzen DIN 16 901 – 150 A =  $4 \pm 0,27 \text{ mm}$  (Tabelle 14)

2. Bildung des korrigierten Formteilmaßes

$$VS = 3\% \text{ (Tabelle 22); } L_F' = 4 / (1 - 3/100) = 4,12 \text{ mm}$$

3. Auswahl der Maßtoleranzen nach DIN 16 749 – 1

$$T_W = 0,1$$

4. Bildung des Werkzeug-Nennmaßes (Innenmaß)

$$L_W = (4,39 + 3,85)/2 - 0,05 = 4,07 \text{ mm}$$

5. Bildung des Werkzeugmaßes (Innenmaß)

$$4,07 +0,1/0 \rightarrow 4 +0,17/+0,07 \text{ mm.}$$