

1.3 Spritzgießsystem und Prozessvariable

1.3.1 Bestandteile

Zur Herstellung von Spritzgussteilen genügt nicht nur eine Spritzgießmaschine, sondern es wird ein ganzes System zueinander gehörender Einrichtungen und Geräte benötigt. Dies sind im einzelnen: Maschine, Werkzeug, Temperiergeräte, Materialzuführung einschließlich Trockner, Einrichtungen zur Entnahme zum Puffern und zum Abtransport der Teile sowie Vorrichtungen zur Nachbearbeitung und Kontrolle der Teile. Im folgenden sollen Begriffe und Benennungen verwendet werden, wie sie im Bereich der Prozesssteuerung unabhängig vom speziellen Verfahren üblich sind.

1.3.2 Definition des Prozesses

Der Spritzgießprozess besteht aus dem technisch-physikalischen Wirkungsablauf eines Spritzgießsystems. Genau genommen umfasst der Spritzgießprozess mehrere Teilprozesse. Physikalisch sind zumindest der Plastifiziervorgang und die Formteilbildung zu unterscheiden. In Bild 1-8 ist der Prozess global und vereinfacht dargestellt.

1.3.3 Einteilung der Prozessvariablen

Als Prozessvariablen werden grundsätzlich alle veränderlichen Größen eines Verfahrens bezeichnet. In Bild 1-8 sind die wichtigsten Prozessvariablen zusammengestellt und eingeteilt. Dabei werden Eingangsgrößen, Parameter, Ausgangsgrößen und Zielgrößen unterschieden. Im Sinn der mathematischen Formulierung des Prozesses (Modell) sind die Eingangsgrößen die unabhängigen, und die Ausgangsgrößen die abhängigen Variablen.

Die *Eingangsgrößen*, also die unabhängigen Variablen, setzen sich aus *Einstellgrößen* und *Störgrößen* zusammen.

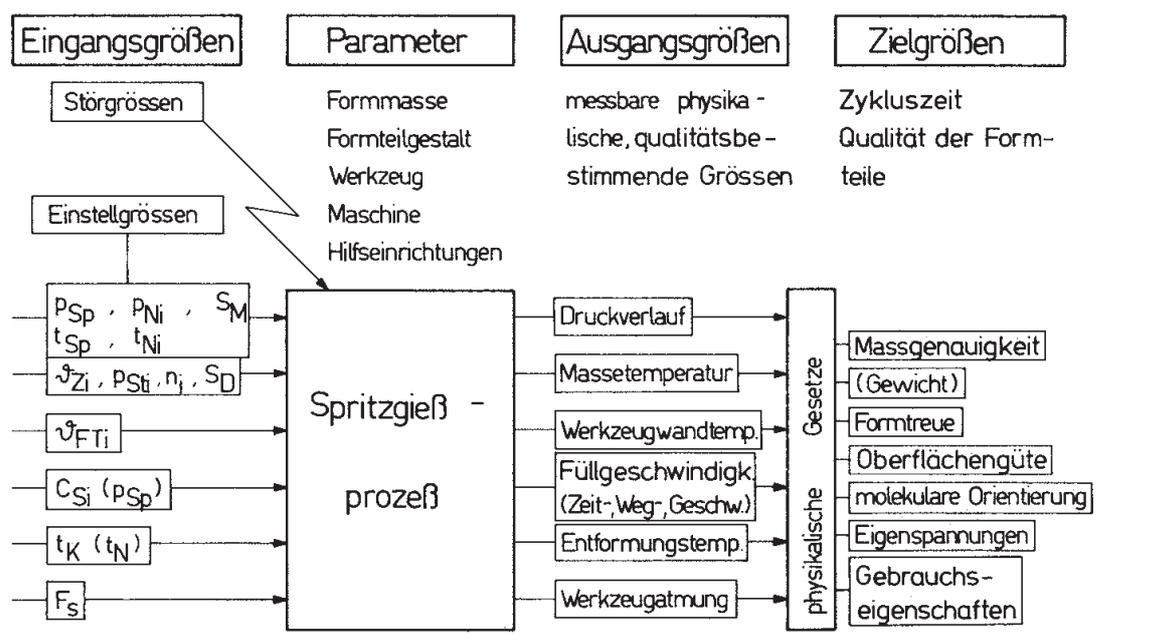


Bild 1-8 Spritzgießprozess und Variable, vereinfachte Darstellung

1.3.3.1 Einstellgrößen

Formteilbildung

Die Formteilbildung im Werkzeug lässt sich, wie noch genauer gezeigt wird, physikalisch in zwei Phasen einteilen:

Phase 1: Füllvorgang

Phase 2: Verdichtungs Vorgang

Physikalische Basisgröße für den Füllvorgang ist der Volumenstrom (cm^3/s). Basisgröße für den Verdichtungs Vorgang ist der Druck.

Schneckenvorlaufgeschwindigkeit (c_{Si}), Einspritzgeschwindigkeit oder auch Einspritzstrom:

Die Schneckenvorlaufgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit mit der die Schnecke die plastifizierte Masse aus dem Zylinder in das Werkzeug verdrängt. Geschwindigkeit mal Querschnittsfläche der Schnecke ergibt den Volumenstrom des Materials. Aus den Ohmschen Gesetz der Hydraulik folgt, dass der Volumenstrom von Druck und Widerstand abhängt.

Ohmsches Gesetz der Hydraulik: Volumenstrom = Druck/Widerstand $\dot{V} = \frac{P}{W_H}$ (1-1)

Bei gesteuerten, hydraulischen Maschinen sind deshalb grundsätzlich zwei Stellglieder zur Einstellung erforderlich. Ein Stromventil zur Einstellung des Widerstands und ein Druckbegrenzungsventil zur Steuerung des Drucks (Bild 1-9). Die entsprechenden Einstellgrößen heißen Spritzdruck oder Druck1 und Schneckenvorlaufgeschwindigkeit, Einspritzgeschwindigkeit oder auch Einspritzstrom.

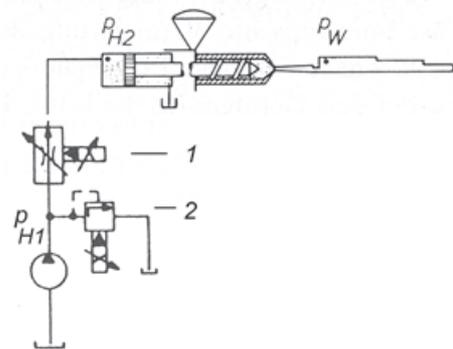


Bild 1-9

Hydraulische Druck- und Mengensteuerung für den Einspritzvorgang

- 1 elektrisch einstellbares Stromventil,
- 2 elektrisch einstellbares Druckventil

Da die erforderlichen Drücke für die Füll- und Verdichtungsphase normalerweise unterschiedlich sind, kann man selbst an alten Spritzgießmaschinen zumindest zwei Druckstufen einstellen, die erste für das Einspritzen die zweite für das Verdichten. Bei modernen Maschinen mit elektrohydraulischen Stellgliedern können vielstufige Programme für Geschwindigkeit und Druck vorgegeben werden.

(Ein-)Spritzdruck (p_{Sp}) oder Druck1:

Einspritzdruck bedeutet zunächst generell der sich beim Einspritzen aufbauende Druck. In der Praxis versteht man darunter nach DIN 24450 den höchsten Druck, der während der Einspritzzeit vom Schneckenkolben auf die Formmasse ausgeübt wird. Die Angabe kann

als Hydraulikdruck, besser aber umgerechnet auf den Schneckenorraum als *theoretischer Massedruck*, erfolgen. *Relativer, spezifischer* oder auch *äußerer Druck* sind weitere Bezeichnungen. Die Umrechnung erfolgt mit Hilfe des Übersetzungsfaktors (häufig 8 bis 10) auf Grund des Flächenverhältnisses von Antriebskolben zu Schnecke. (Einzelheiten: Punkt 3.8.2). Zu beachten ist, dass dieser theoretische Druck praktisch im Schneckenorraum nicht erreicht wird, da vom hydraulischen Antriebskolben zum Schneckenorraum Druckverluste durch Haftung, Reibung und Leckströmungen auftreten.

Einspritzzeit (t_{Sp}):

Die Einspritzzeit ist die Zeit ab Kommando „Schnecke vor“ bis zum Umschalten auf Nachdruck. Diese Zeit ist nur bei zeitabhängiger Umschaltung eine Einstellgröße sonst aber eine hilfreiche Überwachungsgröße.

Nachdruck (p_{Ni}):

Druck nach dem Umschalten von Einspritzen auf Nachdrücken, bei heutigen Maschinen in „i“ (i = 4 bis 10) Stufen einstellbar.

Nachdruckzeiten (t_{Ni}):

Wirkzeiten der einzelnen Nachdruckstufen. Mit p_{Ni} und t_{Ni} können Nachdruckprogramme vorgegeben werden.

Restkühlzeit (t_K):

Zeit, die nach den Nachdruckzeiten noch erforderlich ist, um den Spritzling soweit abzukühlen, dass er entformbar wird.

Schließkraft (F_S):

Kraft welche die beiden Werkzeughälften nach dem Schließen dichtend zusammenhält.

Temperiermitteltemperatur (ϑ_{FTi}):

Temperatur, die an Temperiergeräten eingestellt wird, um eine bestimmte Werkzeugtemperatur zu erreichen. Die Werkzeugtemperatur selbst ist nur im Falle einer direkten Regelung eine Einstellgröße. Je nach Temperiersystem kann auch der Volumenstrom des Temperiermediums eine Einstellgröße sein.

Plastifiziervorgang

Zylindertemperaturen (ϑ_{Zi}):

Temperaturen der Heizzonen längs des Zylinders. Der Zylinder wird in der Regel über vier bis fünf Zonen beheizt. Die Numerierung erfolgt vom Trichter ausgehend in Richtung Düse. Die Einstellung erfolgt an den zugehörigen Temperaturreglern.

Schneckendrehzahl (n):

Drehzahl mit der sich die Schnecke während der Plastifizierung dreht.

Staudruck (p_{St}):

Druck auf den das beim Plastifizieren aus dem Zylinder verdrängte Öl „gestaut“ wird. Dieser Druck mal Übersetzungsverhältnis minus Verluste wirkt auf die Masse beim Plastifizieren.

Dosierweg (s_D) oder Dosiervolumen:

Hub der Schnecke beim Dosieren. Eingestellt wird die entsprechende Position.

1.3.3.2 Störgrößen

Bei den Störgrößen handelt es sich um nicht einstellbare Eingangsgrößen. Sie sind, soweit sie nicht gemessen werden, nur aufgrund ihrer Auswirkungen auf die Ausgangsgrößen des Prozesses zu erkennen. Störgrößen sind z. B. die Umgebungstemperatur, Zugluft, Schwankungen des Rohmaterials, Toleranzen, Verschleiß und Alterung der Maschinenkomponenten. Wegen der Einwirkung der Störgrößen arbeitet die Maschine nicht streng reproduzierbar.

1.3.3.3 Parameter

Unter Parametern versteht man, die im Vorfeld der Produktion festgelegten Einflussgrößen wie z. B. die Wanddicken des Formteils oder die Werkzeugauslegung. Diese für Qualität und Wirtschaftlichkeit häufig entscheidenden Faktoren können, wenn das Werkzeug einmal auf der Maschine ist, nicht mehr verändert werden.

1.3.3.4 Ausgangsgrößen

Die Ausgangsgrößen sind die abhängigen Variablen des Gesamtprozesses. Sie ergeben sich als Folge der Prozesseigenheiten und sämtlicher Einflussgrößen und bringen deshalb das Verhalten des Gesamtprozesses zum Ausdruck. Sie geben daher auch über die Qualität des entstehenden Produkts Aufschluss. Physikalisch sind die Verläufe der thermodynamischen Zustandsgrößen Druck, und das durch die Werkzeugatmung veränderliche Volumen der Kavitäten qualitäts- und zyklusbestimmend. Im Zusammenhang zu diesen stehen weitere hilfreiche Überwachungsgrößen wie Massepolster, Einspritzarbeit und Druckintegral.

Von den physikalischen Zustandsgrößen ist nur der Werkzeuginnendruck direkt messbar. Der Temperaturverlauf kann nur indirekt über seine Einflussgrößen Füllgeschwindigkeit, Masse- und Werkzeugtemperatur erfasst werden. Ein für die Entformung wichtiger Wert des Temperaturverlaufs ist die Entformungstemperatur.

Ziel weiterer Ausführungen wird es sein, die physikalischen Gesetze zwischen Ziel- und Ausgangsgrößen darzustellen, um aus dem physikalischen Verständnis der Formteilbildung heraus eine gezielte, effektive Optimierung der Maschineneinstellung oder Fehlerbeseitigung vornehmen zu können.

1.3.3.5 Zielgrößen

Die Zielgrößen bewerten den Produktionsablauf aus wirtschaftlicher Sicht und bilden damit die Basis jeder Optimierung. Dabei kann man zwei Gruppen bilden, wovon die eine den Aufwand, die andere das Produktionsergebnis enthält. Der von der Prozessführung zu beeinflussende Aufwand setzt sich im Wesentlichen aus Zeit- und Energieaufwand sowie Ma-

terialverlusten durch Ausschussteile zusammen. Auf der Ergebnisseite stehen dem Aufwand die produzierten Formteile mit Qualitätseigenschaften gegenüber, die ebenfalls von der Prozessführung abhängen. Der Aufwand lässt sich prinzipiell einfach über meßbare Ausgangsgrößen während des Produktionsablaufs ermitteln. Dagegen ist die Bewertung der Qualität ein Vorgang, der zumindest teilweise im Prüflabor, d. h. getrennt von der Maschine, vorgenommen werden muss. Um die dadurch bedingte zeitliche Verzögerung und den Aufwand zu reduzieren wird, im Rahmen der Qualitätsüberwachung soweit möglich auf die on-line meßbaren, qualitätsbestimmenden Ausgangsgrößen des Prozesses zurückgegriffen.

1.4 Rheologische Grundlagen

Die im Folgenden dargestellten Beziehungen gelten zunächst für isotherme Strömungen. Die Abkühlung der Schmelze wird in Abschnitt 1.7.2.2 behandelt. Weitere Einzelheiten zu diesem Thema sind in [2] kompatibel dargestellt.

1.4.1 Schichtmodell der Scherströmung

In Bild 1-10 ist das Strömungsmodell eines Ausschnitts aus einem Werkzeughohlraum dargestellt. Die dort strömende Schmelze ist in Schichten der Dicke dy eingeteilt. Man geht davon aus, dass die Schmelze an der Werkzeugwand haftet. Durch diese Haftung werden die vom Druck angetriebenen Schichten gebremst. Die Bremswirkung lässt zur Mitte hin nach, deshalb erreicht die Schmelze dort die höchste Geschwindigkeit.

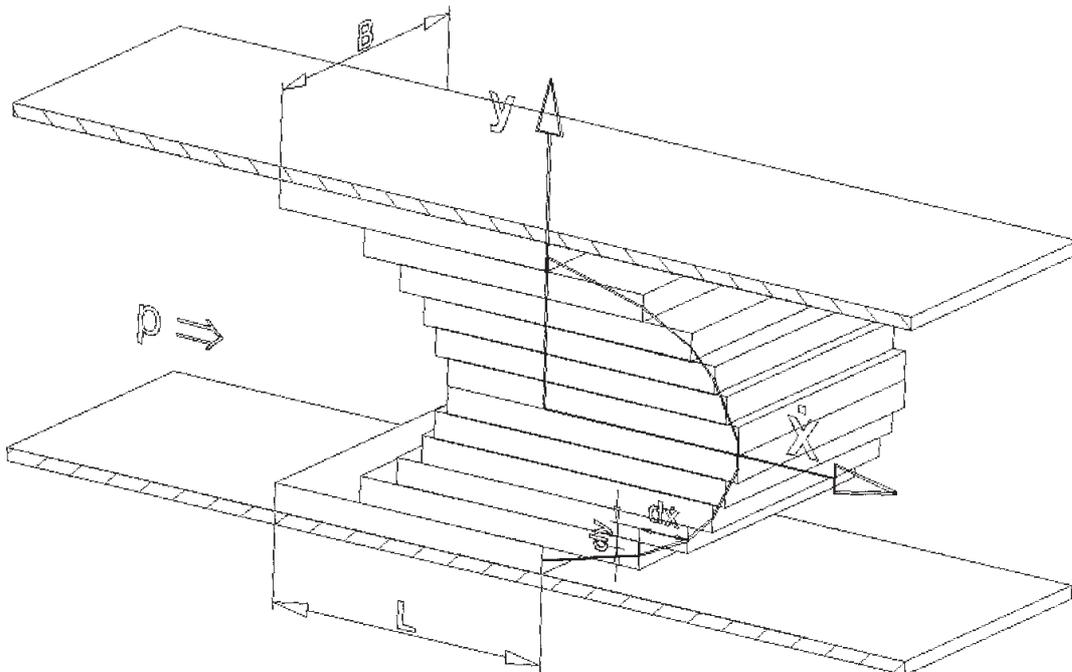


Bild 1-10 Schichtenmodell der Scherströmung.

\dot{x} Geschwindigkeit der Schichten, $d\dot{x}$ Geschwindigkeitsunterschied zwischen zwei Schichten, p treibender Druck, dy Schichtdicke, L Länge, B Breite

1.4.2 Basisgrößen (τ , η , $\dot{\gamma}$)

Die im Folgenden definierten Begriffe sind unter anderem für die Interpretation von Simulationsergebnissen nötig. Da die Simulationsprogramme häufig angelsächsischen Ursprungs sind sollen die englischen Begriffe mitgeführt werden.

1.4.2.1 Schubspannung

In den Grenzflächen zwischen den Schichten wirken bremsende bzw. treibende Kräfte. Diese Kräfte bezogen auf die Grenzfläche heißen Schubspannungen (Stress). Man könnte sie auch Fließspannungen nennen. Sie sind nicht mit den thermischen Spannungen zu verwechseln, die durch die unterschiedlich schnelle Abkühlung der äußeren und inneren Schichten entstehen.

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{L \cdot B} \quad \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \triangleq \text{Pa} \quad 1 \text{ MPa} \triangleq 10^6 \text{ Pa} \quad (1-2)$$

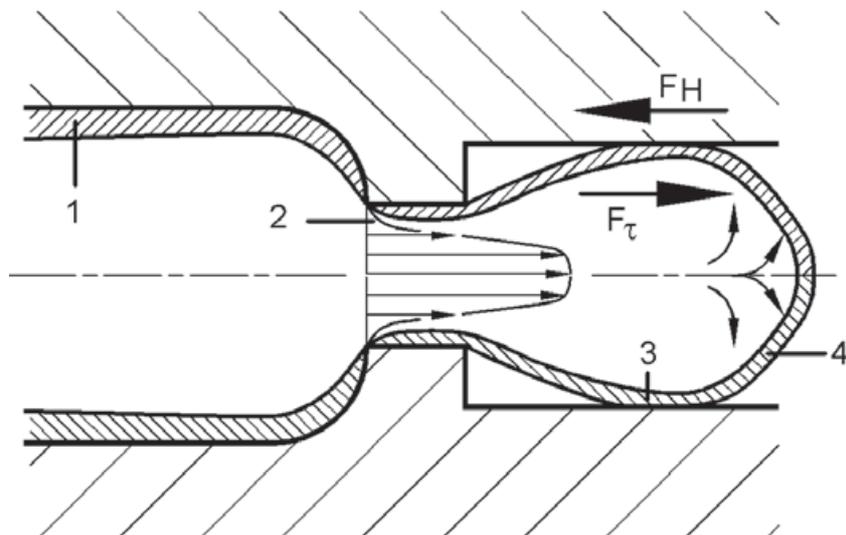
Praktische Auswirkungen:

- Die Schubspannung ist ein Maß für die mechanische Belastung der Moleküle beim Fließen. Zu hohe Werte zerreißen Molekülketten und führen somit zu einem mechanischen Abbau des Materials.
- Die Schubspannung ist auch ein Kennwert für mögliche Oberflächenfehler. Übersteigen die Schubkräfte gemäß Bild 1-11 die Haftkraft schon erstarrter Randschichten, so verschiebt sich diese Haut und es entsteht ein Oberflächenfehler.

Schubspannung für den Rechteckkanal:

$$\tau_y = \frac{\Delta p \cdot y}{L} \quad \text{und an der Wand für } y = H/2 \quad \tau_w = \frac{\Delta p \cdot H}{2 \cdot L} \quad (1-3)$$

Bild 1-11
Oberflächenfehler durch
Randschichtgleiten an
schraffen Querschnitts-
übergängen
1 erstarrte Randschicht,
2 Geschwindigkeitsprofil,
3 haftende oder gleitende
Randschicht,
4 Haut an der Fließfront
 F_H Haftkraft
 F_τ Schubkraft



$$\text{Schubspannung für den zylindrischen Kanal für } y = R: \quad \tau_w = \frac{\Delta p \cdot R}{2 \cdot L} \quad (1-4)$$

mit τ_y Schubspannung an der Stelle y , τ_w Schubspannung an der Wand, Δp Druckgefälle längs durchströmter Länge, y Abstand von Kanalmitte zur Kanalwandung, L durchströmte Länge, R Radius eines zylindrischen Kanals, H Höhe des Rechteckkanals, entspricht näherungsweise der Formteildicke.

Die Formeln zeigen, dass die Spannung, wie in Bild 1-16 dargestellt, vom Wert 0 in der Kanalmitte linear zum Höchstwert an der Wand ansteigen.

1.4.2.2 Scher- und Deformationsgeschwindigkeit

$$\dot{\gamma} = \frac{d\dot{x}}{dy} = \frac{1}{s} \quad (1-5)$$

Die Schergeschwindigkeit ist gemäß Gleichung (1-5) als Geschwindigkeitsunterschied zwischen zwei Schichten – bezogen auf deren Abstand – definiert. Durch diesen Geschwindigkeitsunterschied wird die Schmelze deformiert. Zur Erklärung der Reibungswärme kann man sich unter der Schergeschwindigkeit auch die Geschwindigkeit vorstellen, mit der eine Schicht über die andere hinweggleitet.

Praktische Auswirkungen:

- Erwärmung der Schmelze durch Reibung (Friktion)
- Ausrichtung von Molekülen, Füll- und Verstärkungsstoffen
- Entmischung von Komponenten z. B. bei Blends
- Schmelzebruch

Schergeschwindigkeit an der Wand des Rechteckkanals (Newtonsche Substanz):

$$\dot{\gamma}_w = \frac{6 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2} \quad (1-6)$$

mit \dot{V} Volumenstrom, B Breite des Kanals, H Höhe des Kanals.

Diese Formel lehrt, dass die Schergeschwindigkeit nicht vom Stoff oder der Massetemperatur (η) abhängt, sondern nur von Geometrie und Volumenstrom. Ist die Scherung z. B. in einem Anschnitt zu groß, so muss der Anschnitt vergrößert werden oder es muss durch Parallelschaltung eines zweiten Anschnitts der Volumenstrom halbiert werden.

1.4.3 (Scher-)Viskosität

Experimentell wurde festgestellt, dass sich die Schubspannung proportional zur Schergeschwindigkeit verhält. Als Proportionalitätsfaktor wurde die Viskosität eingeführt.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \text{Newtonsches Gesetz} \quad (1-7)$$

Daraus folgt die Definition der Scherviskosität. Analog wurde für eine Dehn-Verformung der Begriff der Dehnviskosität eingeführt, der hier jedoch nicht näher behandelt werden soll.

$$\eta \equiv \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \triangleq \text{Pa} \cdot \text{s} \quad (1-8)$$

In Analogie zum Ohmschen Gesetz kann die Viskosität auch als (Reibungs-)Widerstand interpretiert werden, den eine Substanz einer verformenden Kraft entgegensetzt. Die Viskosität hängt vom Platzwechselverhalten der Moleküle und von freiem Volumen ab.

1.4.3.1 Strukturviskosität

Bei niedermolekularen Flüssigkeiten ist das Verhältnis von $\tau/\dot{\gamma}$ gleichbleibend. Das heißt, die Viskosität ist nicht von der Schergeschwindigkeit abhängig sondern konstant. Stoffe mit diesem Verhalten werden Newtonsche Substanzen genannt.

Bei Kunststoffschmelzen ist dies jedoch nicht der Fall, die Viskosität nimmt gemäß Bild 1-12 mit zunehmender Schergeschwindigkeit ab. Die Schmelze wird dünnflüssiger, „shear thinning“ weil sich mit zunehmender Scherung die Struktur der Moleküle beim Fließen verändert. Die Knäuelstruktur der Moleküle löst sich zunehmend auf, und die sich parallel lagernden Moleküle können leichter aneinander abgleiten. Dieses Verhalten wird als Strukturviskosität bezeichnet. Die Strukturviskosität ist eine wesentliche Voraussetzung für das Spritzgießen und anderer Verarbeitungsverfahren. Nur deshalb ist es möglich mit realisierbaren Drücken große Mengen Schmelze durch kleinste Kanäle zu treiben. Man denke an Anschnitte von 0,8 mm Durchmesser.

1.4.3.2 Einflussgrößen

In Bild 1-12 sind die zwei wichtige Einflussgrößen zu erkennen: Scherung und Temperatur.

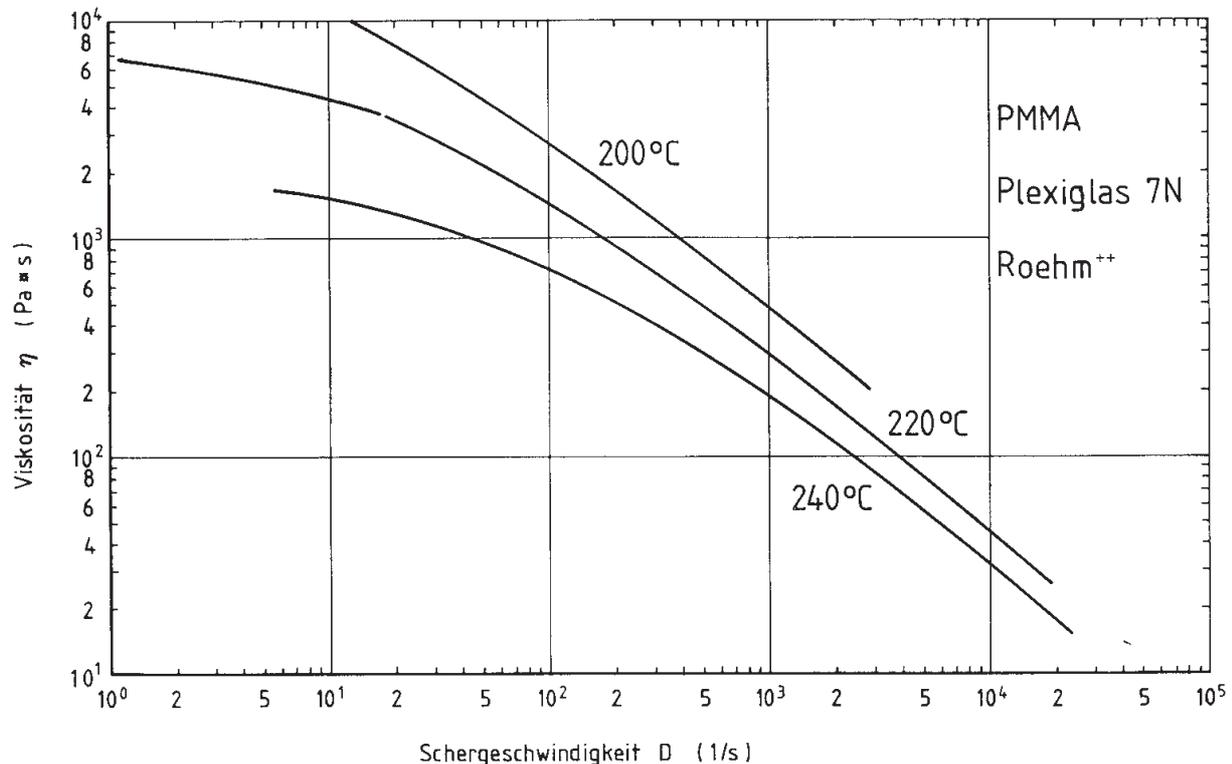


Bild 1-12 Viskositätskurven für ein PMMA [1]

Schergeschwindigkeit

Das Bild zeigt, dass die Erhöhung der Schergeschwindigkeit von 10 auf 10^3 s^{-1} die Viskosität um etwa 2 Dekaden, das entspricht einem Faktor von etwa 100, erniedrigt.

Temperatur

Bei einer Schergeschwindigkeit von 10^2 s^{-1} bewirkt eine Temperaturerhöhung von 200 auf 240 °C gemäß Bild 1-12 eine Verringerung der Viskosität von etwa 25 %. Ursachen sind eine größere Beweglichkeit der Kettensegmente und mehr freies Volumen. Bild 1-13 beweist, dass der Temperatureinfluss nur bei amorphen Materialien so stark ist. Teilkristalline Kunststoffe zeigen eine wesentlich geringere Abhängigkeit.

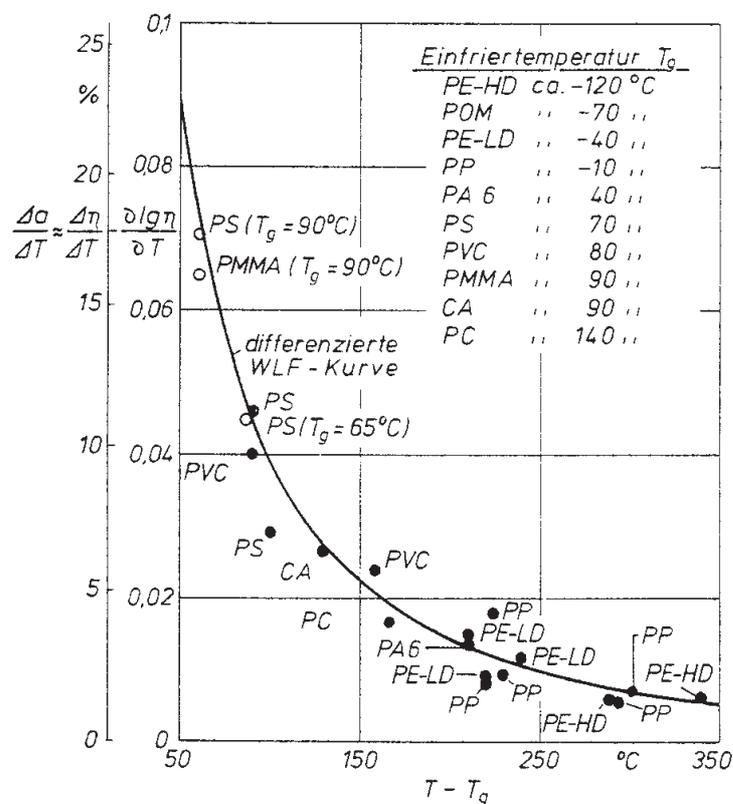


Bild 1-13
Änderung der Viskosität mit der Temperatur für verschiedene Polymere [2]

Druck

Der hydrostatische Druck auf eine Schmelze verringert die Beweglichkeit der Molekülkettensegmente und verringert das freie Volumen. Deshalb steigt die Viskosität mit zunehmendem Druck. Bild 1-14 vermittelt einen Eindruck des Druckeinflusses auf die Viskosität. Eine Druckerhöhung um ca. 550 bar führt bei dem betrachteten PMMA zu einer zehnfach höheren Viskosität. Um die Viskosität in diesem Falle konstant zu halten, müßte die Temperatur um ca. 23 °C erhöht werden. Der Fülldruck eines Werkzeugs kann jedoch nicht frei variiert werden, deshalb ist die Bedeutung des Drucks für die Prozessführung im Zusammenhang mit dem Fließverhalten gering.

Feuchtigkeit

Die Feuchte des Materials bei der Verarbeitung hat einen häufig unterschätzten Einfluss auf die Viskosität. Wassermoleküle wirken als inneres Schmiermittel und bauen die Moleküle hydrolytisch ab. Beide Effekte verringern die Viskosität. Eine reproduzierbare, gleichmäßige Materialtrocknung ist deshalb insbesondere bei hygroskopischen Materialien eine wichtige Voraussetzung für konstante Qualität.

Molekulargewicht

Die entscheidende molekulare Kenngröße ist das Molekulargewicht. Je länger die Molekülketten umso schwerer fließt das Material und umso höher wird die Festigkeit. Man erkennt daraus einen Widerspruch zwischen hoher Festigkeit und leichter Verarbeitbarkeit. Häufig sind jedoch leichter fließende Typen eines Materials festigkeitsmäßig ausreichend und verringern Spritzprobleme wie z. B. Füllbarkeit oder Verzug.

Füll- und Verstärkungstoffe

Die Viskosität steigt durch den Faserzusatz im Bereich niedriger Schergeschwindigkeiten um zwei bis drei Zehnerpotenzen, während sie bei hohen Schergeschwindigkeiten nur geringfügig zunimmt. Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität ändert sich dagegen nicht. Durch den Faserzusatz steigen auch die Einlaufdruckverluste bei Querschnittsverringern erheblich an.

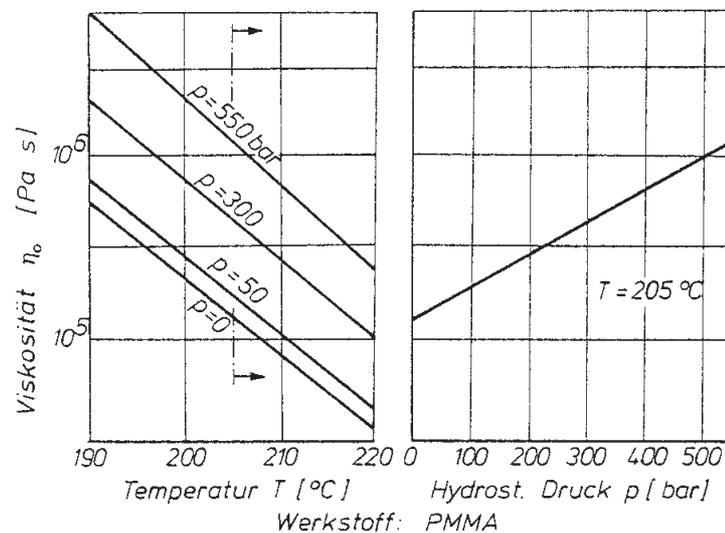


Bild 1-14
Viskosität als Funktion von Druck
und Temperatur [2]

1.4.3.3 Ermittlung des viskosen Fließverhaltens

Das Standard-Messgerät für Viskositätskurven ist das *Hochdruckkapillarrheometer*. Eine preiswerte Alternative für vergleichende Einzelmessungen ist das *Schmelzindexgerät*. Bei beiden Geräten wird eine präzise temperierte Schmelze mit einem Kolben von etwa 11 mm Durchmesser durch eine Düse Kapillare von 1 bis 2 mm Durchmesser gepresst. Der Kolben wird beim HD-Kapillarrheometer über Spindeln oder Hydraulik aufwendig und einstellbar angetrieben, wohingegen beim Schmelzindexgerät (Bild 1-15) einfach ein Gewicht auf den Kolben aufgelegt wird.

Beim HD-Rheometer wird aus der Druckmessung vor Düsen unterschiedlicher Länge die Schubspannung und aus der Kolbengeschwindigkeit die Schergeschwindigkeit ermittelt. Der Quotient aus beiden ergibt gemäß Gleichung (1-9) die Viskosität. Der Schmelzindex (MFR: Melt Flow Rate) ist nach (DIN ISO 1133) wie folgt zu bestimmen:

$$\text{MFR}c/b = \frac{600 \cdot m}{t} \quad [\text{g}/(10 \text{ min})] \quad (1-9)$$

mit c Prüftemperatur in °C, b Belastungsmasse in kg, t Messzeit, m während der Messzeit durch die Düse gedrückte Masse.

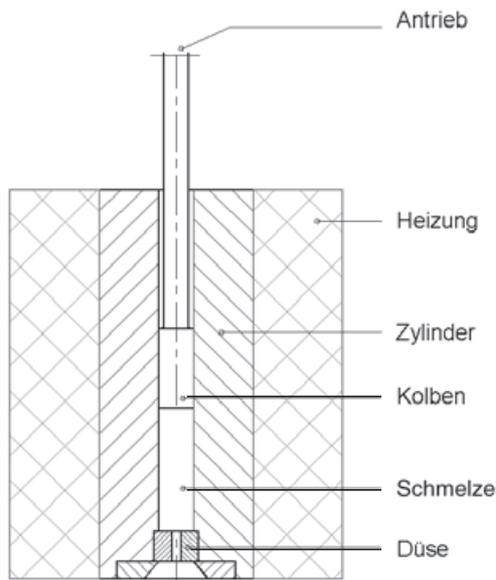


Bild 1-15
Prinzipbild von HD-Kapillarrheometer und Schmelzindexgerät

1.4.4 Druckverluste und Druck

Der Druckverlust Newton'scher Substanzen kann mit dem Hagen Poiseuille'schen Gesetze berechnet werden. Die Feststellung, dass – wie in Bild 1-16 zu sehen – an einer sog. repräsentativen Stelle (e_r) die Schergeschwindigkeiten von Newton'scher und strukturviskoser

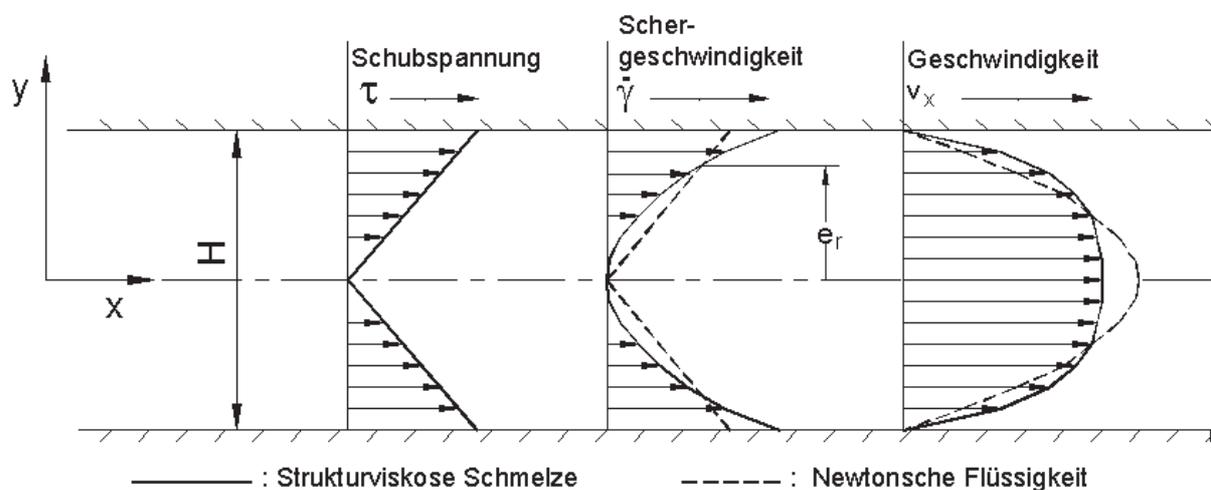


Bild 1-16 Profile der Basisgrößen (Beträge) und repräsentative Schergeschwindigkeit für isothermes Fließen

Substanz gleich sind, führte zu der Erkenntnis, dass diese Formeln auch für strukturviskose Substanzen benutzt werden dürfen, wenn man die Viskosität für diese Stelle einsetzt. Die repräsentative Stelle liegt näherungsweise bei etwa 80% des Abstands von der Kanalmitte zur Wandung. Weitere Einzelheiten sind [2] zu entnehmen.

1.4.4.1 Hagen-Poiseuillesche Gesetze

Zylindrische Kanäle, typisch für Angüsse:

$$\Delta p_Z = \frac{8 \cdot \eta_r \cdot L}{\pi \cdot R^4} \cdot \dot{V} \quad \text{oder} \quad \Delta p_Z = \frac{8 \cdot \eta_r \cdot L \cdot \bar{v}}{R^2} \quad (1-10)$$

Rechteckkanäle, typisch für Werkzeughohlräume:

$$\Delta p_R = \frac{12 \cdot \eta_r \cdot L}{H^3 \cdot B} \cdot \dot{V} \quad \text{oder} \quad \Delta p_R = \frac{12 \cdot \eta_r \cdot L \cdot \bar{v}}{H^2} \quad (1-11)$$

mit Δp Druckverlust, η_r repräsentative Viskosität, L durchströmte Länge, R Zylinderradius, \dot{V} Volumenstrom, \bar{v} mittlere Fließfrontgeschwindigkeit, H Höhe des Rechteckkanals, entspricht näherungsweise der Formteildicke.

Einheiten: Europa: bar USA: MPa 1Mpa = 10 bar

Man erkennt in der Formel für Rechteckkanäle, dass durch Einführung der mittleren Geschwindigkeit die Breite eliminiert wurde, was die Gleichung in dieser Form für Werkzeughohlräume brauchbar macht.

Unabhängig von der Anwendbarkeit dieser Formeln für Berechnungen liegt ihr Wert in der klaren Darstellung der Einflussgrößen. Soll z.B. der Fülldruck eines Werkzeugs gesenkt werden, so ist die wirkungsvollste Einflussgröße – nicht die wirtschaftlichste – die Wanddicke auf Grund der höheren Potenz. Wirtschaftlicher wäre eine Verkürzung der Fließlänge L z.B. durch eine andere Lage des Anschnitts oder einen weiteren Anschnitt. Sofern erlaubt könnte eine leichter fließender Materialtyp gewählt oder an der Maschine η und \bar{v} über Zylindertemperatur und Schneckenvorlaufgeschwindigkeit abgesenkt werden.

1.4.4.2 Druck

Mit Δp in den obigen Formeln sind häufig der Druckunterschied gegenüber dem Atmosphärendruck im Tank der Hydraulik oder an der Fließfront gemeint. Da der Atmosphärendruck gegenüber Hunderten von bar, die beim Spritzgießen üblich sind, zu vernachlässigen ist, wird normalerweise nur vom Spritzdruck oder Fülldruck gesprochen.

$$\Delta p = p - p_{\text{Atmosphäre}} \approx p \quad (1-12)$$