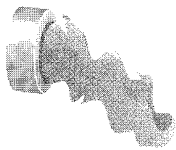


# Grenzen des Strangpreßprozesses anorganischer Glasschmelzen

## Limits in Extrusion Processing of Inorganic Glass Melts

A. Dengel,  
Neunkirchen,  
Germany



Bei der Verarbeitung von Glasschmelzen mittels des Strangpreßverfahrens können oberhalb kritischer Scherbeanspruchungen Oberflächenfehler, die sogenannten Schmelzbrüche, entstehen, welche die Qualität des extrudierten Produktes beeinträchtigen können. Neben dem Matrizenwerkstoff und der Strangaustrittsgeschwindigkeit spielt die Viskosität des Glases eine entscheidende Rolle.

In diesen Untersuchungen wird aufgezeigt, in welchen Zähigkeits- und somit Temperaturbereichen ein wirtschaftliches Verpressen mit möglichst geringer Neigung zur Schmelzbruchbildung stattfinden kann.

### 1 Einleitung

Das Strangpressen ist heutzutage eine in der metall- und kunststoffverarbeitenden Industrie häufig genutzte Umformmethode zur Herstellung von Stangen, Rohren und beliebigen Profilen. In der Glasindustrie kommt sie dagegen weniger zur Anwendung.

Ein besonderes Merkmal des Strangpreßverfahrens liegt darin, daß die Formgebung durch die Anwendung sehr hoher Drücke bei wesentlich höheren Zähigkeiten ( $\eta = 10^7$  bis  $10^8$  dPas), d. h. niedrigen Preßtemperaturen erfolgen kann, als dies im Vergleich zu den herkömmlichen Verarbeitungsmethoden, wie etwa dem Ziehen oder Blasen, der Fall ist ( $\eta = 10^3$  bis  $10^7$  dPas). Hierdurch wird die kantenverrundende Wirkung der Oberflächenspannung weitgehend verhindert – es können komplizierte Profile mit scharfen Kanten und hoher Maßhaltigkeit hergestellt werden – und die Verarbeitung von zur Kristallisation neigenden Gläsern wird verbessert [1].

Die Höhe der maximalen erreichbaren Strangaustrittsgeschwindigkeit ist jedoch häufig durch das Auftreten von Fehlern auf der Oberfläche der extrudierten Stränge infolge zu hoher Scherbeanspruchungen an der Kanalwand nach oben hin begrenzt [2], [3].

Es handelt sich hierbei um ein auch bei der Extrusion von Polymerschmelzen und beim Strangpressen von Metallen bekanntes Phänomen, welches als Schmelzbruch bezeichnet wird und erstmalig bei der Verarbeitung von Glasschmelzen ausführlich untersucht wird [4].

In Abb. 1 ist ein Schmelzbruch dargestellt.

Zur Deutung des Einflusses der Preßviskosität auf die Schmelzbruchbildung sollen die folgenden Untersuchungen dienen.

During extrusion of glass melts, surface defects may result when a critical shear stress is exceeded. These defects, referred to as "melt fracture" considerably impair the quality of the final product. In addition to the die material and extrudate speed, the viscosity of the glass has a decisive influence on the occurrence of these defects.

The viscosity and temperature ranges for viable extrusion are examined in this work with the aim of identifying the conditions that correspond to the absence of melt fracture.

### 1 Introduction

Extrusion is one of the most common processes used by the metal and plastic's industries for producing rods, pipes and commercial products of any desired shape. However, extrusion processing is less common in the glass industry.

A noteworthy attribute of extrusion is that, by using high pressures, shapes can be formed from melts of very high viscosity ( $\eta = 10^7 - 10^8$  dPas) at relatively low temperatures compared with processes such as drawing or blowing, in which the applicable viscosity range is from  $10^3 - 10^7$  dPas. Thus, extrusion prevents edge-rounding effects arising from surface tension; with extrusion complicated pieces with sharp edges and high size accuracy can be fabricated. In addition, glasses that tend to crystallize can also be more easily processed via extrusion [1].

The maximum achievable extrusion speed is frequently limited by the onset of surface defects on the extrudate. These defects result from excessive shear forces along the die wall [2], [3]. This phenomenon, which is frequently encountered in the extrusion of polymer melts and metals, is termed melt fracture. In this work, melt fracture in the extrusion of glass melts is comprehensively investigated for the first time [4].

Figure 1 shows melt fracture of a glass melt.

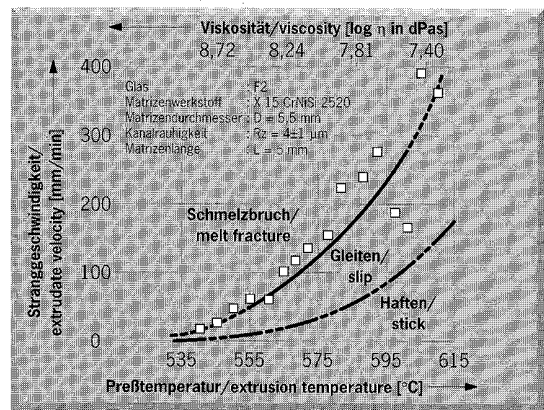
In the experiments described below, the influence of viscosity on the melt fracture behavior has been determined.

### 2 Experimental Setup

In direct extrusion (shown in Fig. 2) the glass melt is loaded into the extruder as a plug and pressed out through a die. The shape of the die entrance channel (which has a much smaller diameter than the extrusion chamber) governs the profile of the extruded material.

**Abb. 7:**  
Die zu Wandgleiten sowie zu Schmelzbrüchen  
führenden Stranggeschwindigkeiten für  
a) 5 mm und  
b) 7 mm lange CrNi-Stahlmatrizen  
in Abhängigkeit von der Preßtemperatur  
(D = 5,5 mm; □ gemessene Werte;  
-- gerechnet nach Gleichung (3))

**Fig. 7:**  
Extrusion velocities leading to  
wall slip and melt fracture for  
(a) 5 mm and  
(b) 7 mm long CrNi-steel dies  
as a function of extrusion temperature  
(D = 5.5 mm; □ - measured values;  
-- - calculated from Equation (3))



kommenen Wandhaftung bei einer Temperatur von 592 °C ( $\eta = 10^{7.66}$  dPas). Die Grenztemperatur einer 5 mm langen Matrize beträgt 587 °C ( $\eta = 10^{7.76}$  dPas).

Aus Gleichung (3) lassen sich für eine Stranggeschwindigkeit von 60 mm/min bei einem konstanten Matrizen Durchmesser von 5,5 mm und für die oben angeführten Viskositäten unter Berücksichtigung der Meßfehler bei der Bestimmung der Temperatur und der Stranggeschwindigkeit nach dem Gauss'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz folgende Druckabfälle über die Längen der Matrizen ermitteln:

$$\Delta p (L = 5 \text{ mm}) = 306 \pm 15 \text{ bar}$$

$$\Delta p (L = 7 \text{ mm}) = 338 \pm 15 \text{ bar.}$$

Mit diesen Druckwerten errechnen sich die Beträge der kritischen Wandschubspannungen nach Gleichung (1) zu:

$$\tau_{wc} (L = 5 \text{ mm}) = 8,4 \pm 0,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{wc} (L = 7 \text{ mm}) = 6,6 \pm 0,4 \text{ N/mm}^2.$$

Die kritischen Werte der Wandschubspannung sind in erster Linie nicht von der dynamischen Viskosität und der Stranggeschwindigkeit abhängig, da diese Umformparameter auf die Haftung der Glasteilchen an der Matrizenkanalwand keinen mittelbaren Einfluß haben. Die entscheidende Größe ist ein für gleiche Matrizen und für alle Versuchstemperaturen konstanter Druckgradient, der eine zu Gleiten führende Wandschubspannung bewirkt. Der Übergang vom Wandhaften zum Wandgleiten erfolgt bei hohen Viskositäten natürlich bei kleinen Stranggeschwindigkeiten, da der kritische Druckabfall  $\Delta p_c$  bei niedrigen Temperaturen zu einer geringen Geschwindigkeit des extrudierten Glasstranges führt.

Setzt man die oben ermittelten Werte des Druckes mit den zu den Umformtemperaturen gehörenden dynamischen Viskositäten der Schmelze in Gleichung (3) ein, so erhält man für die beiden verwendeten Matrizenlängen die in den Abbildungen 7 dargestellten theoretischen Verläufe der kritischen Stranggeschwindigkeiten über der Umformtemperatur.

Daneben sind die Ergebnisse der Abbildungen 4a und 4b aufgetragen, so daß man in Abb. 7 die Stranggeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Umformtemperatur erhält, die zu vollkommener Wandhaftung, einsetzendem Wandgleiten – mit der Gefahr von Schmelzbrüchen – und zur sicheren Schmelzbruchentstehung führen. Die sich aus einer Interpolation ergebenden Kurvenverläufe stellen dabei die Grenze des jeweiligen Bereichs dar.

The critical values of the wall shear stress can be calculated from these pressure drops using Equation (1):

$$\tau_{wc} (L = 5 \text{ mm}) = 8.4 \pm 0.4 \text{ N/mm}^2, \text{ and}$$

$$\tau_{wc} (L = 7 \text{ mm}) = 6.6 \pm 0.4 \text{ N/mm}^2.$$

The critical value of the wall shear stress is not directly dependent on either the dynamic viscosity or the extrudate velocity, because these parameters do not influence the adhesion of the glass melt to the die wall. The influential parameter is the constant pressure gradient, which leads to slip at a given wall shear stress. The transition from stick to slip occurs at high viscosities at a low extrudate velocity, because the critical pressure drop  $\Delta p_c$  at low temperatures leads to a low velocity of the extruded glass.

Inserting the pressure values determined above and the dynamic viscosities of the melts at the process temperature into Equation (3), one obtains the theoretical curves shown in Figures 7a and 7b. These curves show the critical extrusion velocity as a function of extrusion temperature for the two different die lengths. The experimental data from Figures 4a and 4b appear with the curves in Figures 7a and 7b, respectively. On this plot, the dependence of the extrudate velocity on process temperature is shown, including the three possible flow outcomes: (1) stick; (2) onset of slip, with the potential for melt fracture; and (3) onset of melt fracture. The interpolation of the curves provides an estimate of the border of each of these flow regions.

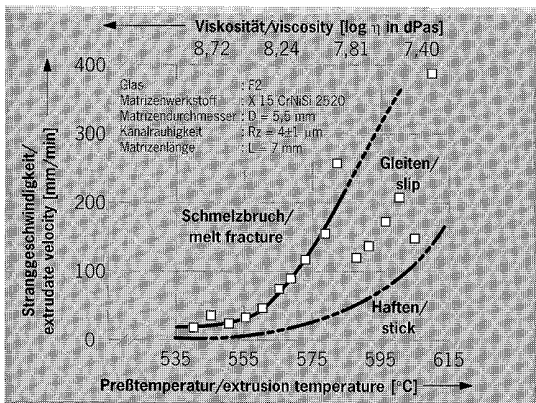
#### 4 Conclusions

Experimental and theoretical results clearly show how process temperature and extrudate velocity influence the processability of glass melts extruded through a CrNi-steel die. Naturally, the results presented here are not directly applicable to all die materials, because melt fracture is strongly influenced by the chemical and physical interactions between the glass melt and the die channel wall.

In summarizing the results of this investigation, the following conditions are relevant when considering the economic aspects of extrusion processing:

- To avoid melt fracture, the critical extrudate velocity must not be exceeded. At such velocities, the processed material will exhibit slip at the die channel wall.





#### 4 Zusammenfassung

Sehr deutlich kann experimentell wie auch theoretisch aufgezeigt werden, wie Verarbeitungstemperatur und Strangaustrittsgeschwindigkeit bei dem vorliegenden Matrizenwerkstoff CrNi-Stahl die Verarbeitbarkeit anorganischer Glasschmelzen mittels des Strangpreßverfahrens begrenzen. Natürlich sind diese Erkenntnisse nur zum Teil auf andere Matrizenmaterialien zu übertragen, da die Entstehung von Schmelzbruch unter auf den physikalischen und chemischen Reaktionen zwischen strömender Glasschmelze und Matrizenwandung beruht.

Faßt man die mit den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse zusammen, so sind unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvollerweise folgende Rahmenbedingungen zu beachten:

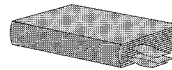
- ⊃ Um die Gefahr der Schmelzbruchbildung zu vermeiden, darf eine zu Gleiten führende kritische Strangaustrittsgeschwindigkeit nicht überschritten werden.
- ⊃ Mit Erhöhung der dynamischen Viskosität kommt es zu einer deutlichen Abnahme der kritischen Strangaustrittsgeschwindigkeit, so daß ein vor Schmelzbrüchen sicheres Verpressen oberhalb einer Viskosität von  $10^{7,6}$  dPas keine akzeptablen Verarbeitungsgeschwindigkeiten mehr erlaubt. Andererseits nimmt die Formtreue des Extrudates mit fallenden Preßtemperaturen zu.
- ⊃ Oberhalb der Erweichungstemperatur des Glases ( $\eta = 10^{7,6}$  dPas) nimmt durch Reduzierung der Zähigkeit die Formtreue der erzeugten Produkte ab.

Hieraus läßt sich ableiten, daß für Strangpressen anorganischer Glasschmelzen durch CrNi-Stahlmatrizen Viskositäten etwas oberhalb des Erweichungspunktes am geeignetsten sind.



- ⊃ An increase in the dynamic viscosity leads to a pronounced decrease in the critical extrudate velocity. As a result, at viscosities above  $10^8$  dPas, there is no acceptable extrudate velocity that allows one to avoid melt fracture. On the other hand, the shape of the extrudate becomes more desirable at lower processing temperatures.
- ⊃ Above the softening temperature of the glass ( $\eta = 10^{7,6}$  dPas) the precision in the shape of the manufactured product decreases, due to the decreased stiffness of the material.

This investigation indicates that processing at viscosities slightly above the softening temperature is most appropriate for the extrusion of inorganic glass melts through a CrNi-steel die.



- [1] Roeder, E.: Philips techn. Rdsch 32 (1971/72), No. 4, p. 116–121
- [2] Roeder, E.; Dengel, A.: Glastechn. Ber. 61 (1988), No. 3, p. N14
- [3] Dengel, A.; Roeder, E.: Glastechn. Ber. 64 (1991), No. 10, p. 268–271
- [4] Dengel, A.: „Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Entstehung von Schmelzbrüchen beim Strangpressen anorganischer Glasschmelzen“, Diss. Univ. Kaiserslautern 1991
- [5] Cox, G.: „Strangpressen anorganischer Glasschmelzen – Einfluß des Matrizenwerkstoffes auf Kraftbedarf und Strangaustrittsgeschwindigkeit“, Diss. Univ. Kaiserslautern 1983
- [6] Achten, N.: „Das Düsenanschwellphänomen beim Strangpressen anorganischer Glasschmelzen“, Diss. Univ. Kaiserslautern 1982
- [7] Achten, N.; Roeder, E.: Glastechn. Ber. 56 (1983), No. 9, S. 248–253 und No. 10, S. 257–260
- [8] Egel-Hess, W.: „Experimentelle und theoretische Untersuchungen des Düsenanschwellphänomens beim Austritt anorganischer Glasschmelzen aus nichtkreisförmigen Matrizenprofilen während des Strangpressens“, Diss. Univ. Kaiserslautern 1986
- [9] Roeder, E.; Egel-Hess, W.: Rheol. Acta 25 (1986), 4, p. 365–371
- [10] Uhland, E.: „Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum anomalen Strömungsverhalten von extrahochmolekularem Polyäthylen hoher Dichte (HDPE)“, Diss. Univ. Stuttgart 1978
- [11] Uhland, E.: Rheol. Acta 15 (1976), p. 30–39