

Das Düsenschwellphänomen – eine Erscheinung beim Strangpressen von Glasschmelzen¹⁾

Von Erwin Roeder und Norbert Achten, Kaiserslautern

(Mitteilung des Lehrstuhls für Werkstoffkunde und Mechanische Technologie der Universität Kaiserslautern)

(Eingegangen am 12. November 1980)

Beim Strangpressen von Glasschmelzen weicht das Querschnittsprofil des austretenden Stranges, sofern keine besonderen Vorkehrungen getroffen werden, im allgemeinen vom Öffnungsprofil der Matrize in Form einer Aufweitung (Düsenschwellung) ab. Diese beruht auf einer inhomogenen Geschwindigkeits- und Druckverteilung über den Kanalquerschnitt am Matrizenaustritt. Die Größe der Düsenschwellung ist sowohl von der äußeren Reibung an der Wand des Matrizenkanals als auch von der inneren Reibung der Glasschmelze abhängig. Experimentelle Untersu-

chungen im Druckbereich von 50 bis 300 bar ergaben für Matrizen mit Wandhaftung, daß die Strangaufweitung bei L/R_0 -Verhältnissen kleiner ≈ 1 gegen Null geht. Ebenso trat bei Verwendung von Matrizen aus Elektrographit infolge der geringen Wandreibung keine Düsenschwellung auf. Demgegenüber wurde eine Zunahme der Strangaufweitung mit abnehmender innerer Reibung (Zähigkeit) der Glasschmelze bis auf 16 % ermittelt. Ein Einfluß des Preßdruckes auf die Düsenschwellung konnte nicht eindeutig festgestellt werden.

The die swell phenomenon – a feature of the extrusion of glass melts

If no special precautions are taken in the extrusion of glass melts the extruded section usually differs in cross section from that of the opening of the die and shows a swelling. This is related to an inhomogeneous velocity and pressure distribution at the exit of the die. The magnitude of the swelling depends on both the external friction at the die channel wall and on internal friction within the glass melt. Experimental investigations in the pressure range 50 to

300 bar showed that for dies with wetted walls and L/R_0 ratios less than about one the swelling is negligible. Also the use of dies made from electro-graphite gives no die swelling because of the very small wall friction. On the other hand decreasing the viscosity of the glass gave an increased swelling, up to 16 %. The influence of extrusion pressure on the die swelling is not yet sufficiently clear.

Le phénomène de renflement à la sortie de la buse lors de l'extrusion de fontes de verre

Lors de l'extrusion de fontes de verre le profil de la section du boudin sortant, dans la mesure où on n'effectue aucune intervention spéciale, s'élargit par rapport à celui de la buse. Ceci est dû à une répartition hétérogène des vitesses et des pressions dans la section du canal de la buse à son extrémité. L'importance de ce renflement dépend aussi bien du frottement sur la paroi du canal que du frottement interne de la fonte. Des études expérimentales

entre 50 et 300 bar montrent que pour des matrices présentant une certaine adhérence sur les parois, le renflement du boudin pour des rapports $L/R_0 \approx 1$ tend vers zéro. De même avec des matrices en électrographite, il n'y a pas de renflement par suite du faible frottement sur les parois. Par contre, la section du boudin peut augmenter jusqu'à 16 % lorsque le frottement interne (viscosité) décroît. Une influence de la pression sur le renflement n'a pas pu être établie de façon nette.

1. Einführung

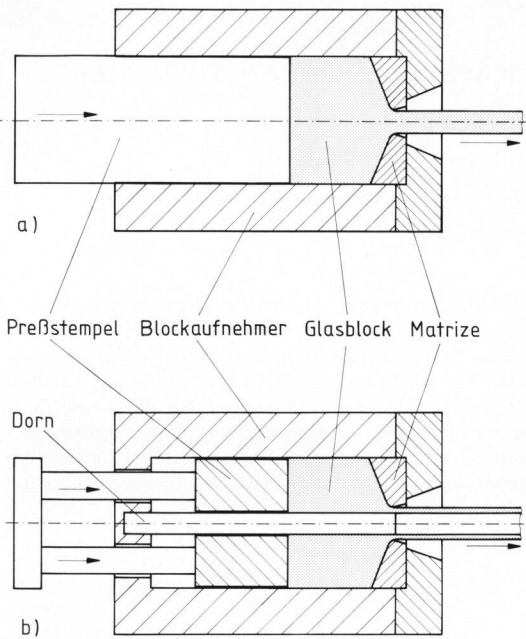
Das Strangpressen als Umformverfahren zur Herstellung von Stangen, Rohren und sonstigen beliebigen Innen- und Außenprofilen findet seit langem einen breiten Anwendungsbereich in der metall- und kunststoffverarbeitenden Industrie. Es erscheint daher naheliegend und zweckmäßig, diese Methode auch auf die Formgebung von Glasschmelzen zu übertragen.

Ein besonderes Kennzeichen des Verfahrens liegt darin, daß es infolge der nahezu allseitigen Umschließung des Preßlings durch Blockaufnehmer, Preßstempel und Matrize sehr hohe Verformungskräfte auf das Preßgut auszuüben erlaubt. Auf diese Weise lassen sich Glasschmelzen bei wesentlich höheren Zähigkeiten verarbeiten, als dies im Vergleich zu den

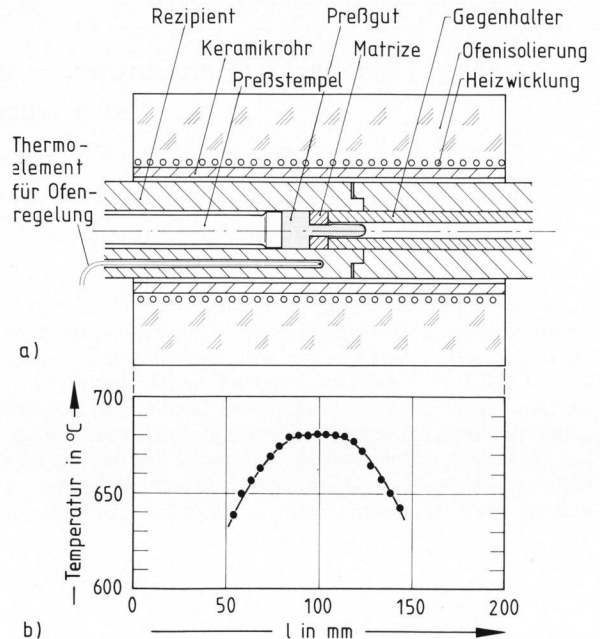
herkömmlichen Verarbeitungsmethoden, wie etwa dem Ziehen oder Blasen, der Fall ist. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß die Temperatur während der Umformung weitgehend konstant bleibt. Dies wirkt sich besonders günstig bei der Verarbeitung von Gläsern mit steiler Viskositäts-Temperaturkurve (sogenannten kurzen Gläsern) aus.

Weiterhin wird durch die höhere Zähigkeit der Glasschmelze während der Formgebung die Wirkung der kantenverrundenden Oberflächenspannung weitgehend unterbunden. Diese Tatsache gestattet die Herstellung komplizierter Innen- und Außenprofile mit scharfen Kanten, je nach Gestaltung des formgebenden Werkzeuges (Matrize) [1 bis 3].

¹⁾ Auszugsweise vorgetragen von E. Roeder auf der 54. Glastechnischen Tagung am 14. Mai 1980 in Aachen.



Bilder 1a und b. Schematische Darstellung zweier Strangpreßrichtungen; a) für das direkte Strangpressen von Stangen, b) für das direkte Strangpressen von Hohlprofilen.



Bilder 3a und b. Verwendete Versuchseinrichtung (Bild a) und zugehöriges axiales Temperaturprofil (Bild b).

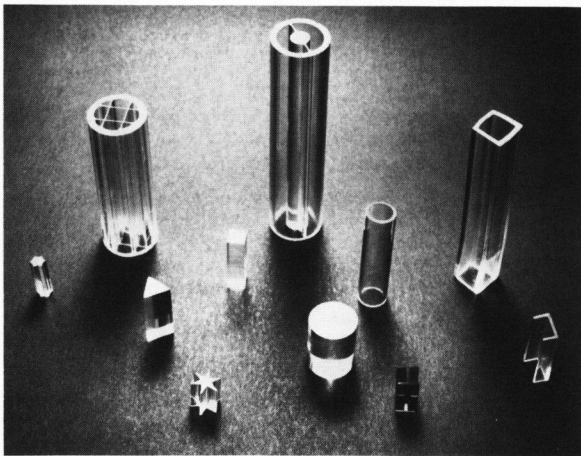


Bild 2. Stranggepreßte Glasprofile.

2. Strangpreßverfahren

Das Prinzip des Strangpressens von Vollprofilen ist aus Bild 1a ersichtlich. Ein in den Blockaufnehmer (Rezipient) eingesetzter zylindrischer Glasblock wird nach Erwärmung etwa auf seine Erweichungstemperatur (Zähigkeit $\eta \approx 10^{7,6}$ dPa s) mittels eines Stempels unter einem Druck von einigen Hundert bar durch die Matrize ausgepreßt. Man erhält auf diese Weise Halbzeuge, deren Querschnitt durch das Profil der Matrizenöffnung bestimmt ist. Dabei werden bei Rundprofilen zur Zeit Strangaustrittsgeschwindigkeiten von etwa 100 mm/min erreicht. Durch Einbringen eines Dornes ist es auch möglich, Rohre oder andere

Hohlprofile herzustellen (Bild 1b). Einige typische stranggepreßte Profile sind in Bild 2 dargestellt.

Als Konstruktionswerkstoffe werden hitze- und zunderbeständige Stähle aus Nickelbasis-Legierungen verwendet, die sich durch eine schwache Oxidationsneigung und damit durch eine möglichst geringe Klebewirkung gegenüber der Glasschmelze auszeichnen [4]. Die Bilder 3a und b zeigen einen Ausschnitt aus dem für die nachfolgenden Untersuchungen verwendeten Versuchsaufbau und das zugehörige axiale Temperaturprofil.

3. Strangaufweitung

Sofern nicht besondere Vorkehrungen getroffen werden, stimmt das Querschnittsprofil des austretenden Glasstranges im allgemeinen nicht genau mit dem der Matrizenöffnung überein. Diese Erscheinung wird als Strangaufweitung, Düsen-schwellphänomen oder auch Barus-Effekt bezeichnet [5]. Sie ist im Hinblick auf die Formtreue und Maßgenauigkeit der stranggepreßten Halbzeuge sowie auf die zweckmäßige Gestaltung der Öffnungsprofile der Preßwerkzeuge von großer praktischer Bedeutung.

Das Düsen-schwellphänomen ist bei der Verarbeitung von Kunststoffschmelzen und -lösungen besonders stark ausgeprägt und dort seit langem bekannt. Es beruht hier vornehmlich auf dem viskoelastischen Fließverhalten dieser Stoffe, d. h. auf einer elastischen Rückfederung der fadenförmigen Makromoleküle nach Verlassen der Matrize [6 und 7].

Glasschmelzen zeigen hingegen in dem zum Strangpressen geeigneten Temperaturbereich rein viskoses (Newtonsches) Fließverhalten, so daß hier eine elastische Rückfederung nicht auftritt [8]. Die Ursache für die Strangaufweitung liegt vielmehr in einer inhomogenen Geschwindigkeits- und der damit einhergehenden ungleichmäßigen Druckverteilung über den Querschnitt des austretenden Stranges begründet [9 und 10]. Für Newtonsche Flüssigkeiten wurde durch theoretische Untersuchungen wie auch experimentelle Ergebnisse eine Strangaufweitung (Durchmesservergrößerung) bis zu 13,5 % ermittelt [11 und 12].

Im Falle einer laminaren Rohrströmung läßt sich beim Glasstrangpressen die Geschwindigkeitsverteilung innerhalb des Matrizenkanals bei genügend schlanken Matrizen ($L/D_0 > 1$) mit guter Genauigkeit durch das Hagen-Poiseuillesche Gesetz darstellen [1 und 2]

$$w_z(r) = \frac{\Delta p}{4 \eta L} (R_0^2 - r^2) \tag{1}$$

Hierin bedeuten: $w_z(r)$ die Geschwindigkeit im Abstand r von der Kanalachse, Δp die Druckdifferenz zwischen Matrizenein- und ausgang, L und R_0 die Länge bzw. den Radius des Matrizenkanals und η die dynamische Viskosität der Glasschmelze.

Die theoretische Behandlung des Düsen-schwellphänomens [11] zeigt, daß sich das vorliegende parabelförmige Geschwindigkeitsprofil $w_z(r)$ bereits unmittelbar vor dem Austritt und nach Verlassen des Matrizenkanals allmählich zu einem Kastenprofil mit der Geschwindigkeit $w_{z\infty}$ einebnet (Bild 4). Dieser in einem homogenen Temperaturfeld erfolgende Prozeß wird in praxi durch die stetige Abkühlung (Einfrieren) des austretenden Glasstranges noch begünstigt (Bild 3b). Die zu dieser Geschwindigkeitsverteilung gehörende axiale Druckverteilung ist in Bild 5 dargestellt [10]. Die Abweichung des Druckabfalls von der Linearität unmittelbar vor Erreichen des Matrizenausgangs kann anschaulich auch dadurch erklärt werden, daß die maximale Strömungsgeschwindigkeit der Glasschmelze in der Kanalachse ($r = 0$)

$$w_{zmax} = \frac{\Delta p R_0^2}{4 \eta L} \tag{2}$$

auf die mittlere Geschwindigkeit des austretenden Stranges

$$w_{z\infty} = \frac{\Delta p R_0^2}{8 \eta L} \tag{3}$$

verzögert wird, wie sich leicht durch Integration von Gleichung (1) über den Radius r und anschließende Division durch den Kanalquerschnitt πR_0^2 zeigen läßt.

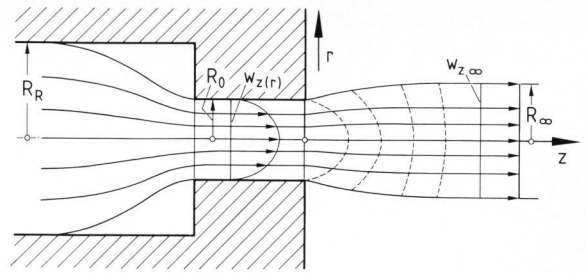


Bild 4. Schematische Darstellung des Stromlinienverlaufs beim Strangpressen einer Newtonschen Flüssigkeit mit Wandhaftung im Matrizenkanal.

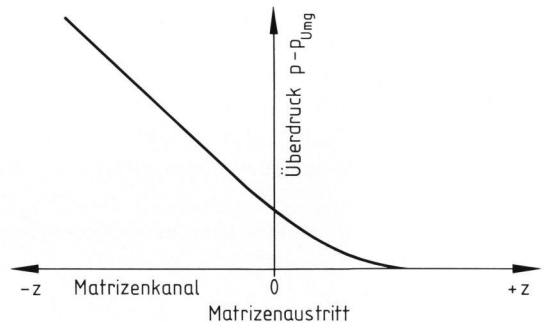


Bild 5. Schematische Darstellung des Druckverlaufs in axialer Richtung für $r = 0$ nach Richardson [10].

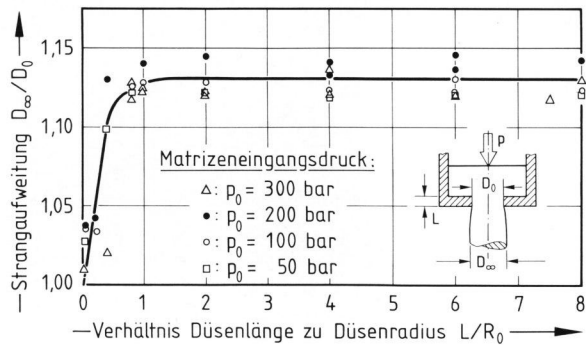


Bild 6. Abhängigkeit der Strangaufweitung von der Länge des Matrizenkanals für eine Alkali-Kalksilicatschmelze. Preßtemperatur $\vartheta = 685^\circ\text{C}$, Viskosität $\eta = 10^{8,05}$ dPa s, Matrizendurchmesser $D_0 = 5$ mm.

Am Matrizenausgang besteht daher im Inneren des Stranges gegenüber der Umgebung noch ein gewisser Überdruck, der die Aufweitung des Stranges solange bewirkt, bis sich ein Ausgleich mit dem Umgebungsdruck und der Oberflächenspannung eingestellt hat. Dieser Vorgang ist innerhalb einer Entfernung von etwa $2 R_0$ abgeschlossen.

Zugleich mit der Strangaufweitung ist infolge der Volumenkonstanz eine Verkürzung des austretenden Stranges und damit eine Verminderung der Strang-

geschwindigkeit $w_{z\infty}$ verbunden. Für eine Durchmesserergrößerung von beispielsweise 13 % beträgt diese Abnahme etwa 23 % gegenüber einem Strangaustritt bei Abwesenheit des Düsen-schwellphänomens.

Zur eingehenden Untersuchung des Düsen-schwellphänomens wurde der Einfluß der Matrizenkanallänge, der Preßtemperatur (Zähigkeit) und des Matrizeingangsdrucks auf die Strangaufweitung von Rundprofilen experimentell ermittelt²⁾. Hierzu zeigt Bild 6 für eine Alkali-Kalksilicatschmelze zunächst den Zusammenhang zwischen der Strangaufweitung

$$\frac{D_\infty}{D_0}$$

und der bezogenen Matrizenlänge L/R_0 . Für große Matrizenlängen beträgt dieses Durchmesser Verhältnis unter den vorliegenden Versuchsbedingungen bis zu 14 % und geht andererseits bei einem L/R_0 -Ver-

²⁾ Eine eingehende theoretische Behandlung dieses Problems erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt.

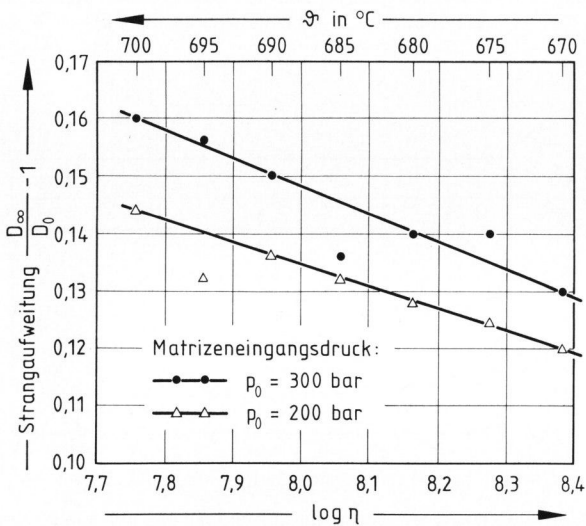


Bild 7. Abhängigkeit der Strangaufweitung von der Viskosität für eine Alkali-Kalksilicatschmelze. Matrizendurchmesser $D_0 = 5$ mm, Matrizenlänge $L = 10$ mm.

hältnis kleiner ≈ 1 gegen Eins. Hieraus ist ersichtlich, daß die Strangaufweitung mit verschwindender äußerer Wandreibung ausbleibt.

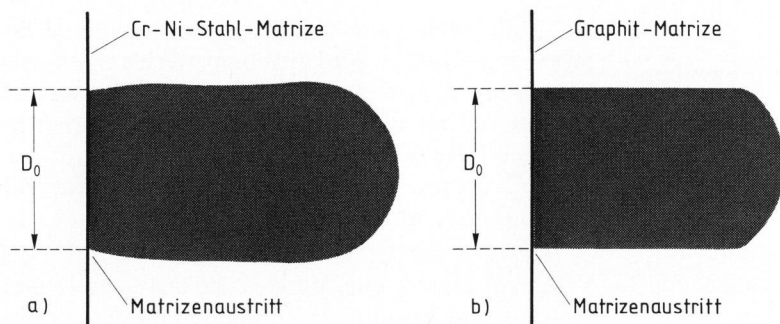
Neben dieser äußeren Reibung ist auch die innere Reibung der Glasschmelze von Einfluß auf die Strangaufweitung. Dies geht aus Bild 7 hervor, in dem die Abhängigkeit der Strangaufweitung von der Zähigkeit aufgetragen ist. In dem untersuchten Temperaturbereich von 670 bis 700 °C, entsprechend $\eta = 10^{8,38}$ bis $10^{7,75}$ dPa s, nimmt die Strangaufweitung bei dem angewendeten Preßdruck von 300 bar von 13 auf 16 % zu.

Die Größe der Strangaufweitung nimmt nach diesen Befunden mit wachsendem Verhältnis von äußerer zu innerer Reibung der strömenden Glasschmelze zu und steht in ursächlichem Zusammenhang mit dem Geschwindigkeitsgradienten an der Kanalwand unmittelbar vor dem Matrizenaustritt

$$\frac{dw_z}{dr} = f \left[\tau_{(r=R_0)}, \frac{1}{\eta} \right]. \quad (4)$$

Strangaufweitung und Geschwindigkeitsgefälle sind gleichsinnig miteinander verknüpft.

Eine weitere Bestätigung für das Ausbleiben der Strangaufweitung bei verschwindender Wandreibung zeigen die Bilder 8a und b. Hier wurde eine Alkali-Kalksilicatschmelze einmal durch eine Cr-Ni-Stahlmatrize (Bild 8a), zum anderen durch eine Matrize aus Elektrographit (Bild 8b) verpreßt. Im ersten Falle liegt vollständige Haftung der Schmelze an der Wand des Matrizenkanals vor. Die Strangaufweitung ist hier stark ausgeprägt. Im zweiten Falle tritt Wandgleitung auf, da Graphit von der Glasschmelze nicht benetzt wird und außerdem auf Grund seiner hexagonalen Schichtstruktur die Wandreibung in hohem Maße herabsetzt. Infolgedessen stellt sich eine erheblich gleichmäßigere Geschwindigkeits- und Druckverteilung am Matrizenaustritt als bei Wandhaftung ein. Dies wird auch aus dem Vergleich der Krümmung der Stirnflächen beider Glasstränge deutlich. Eine Strangaufweitung ist hier nicht erkennbar. Ein gleiches Ergebnis läßt auch die Anwendung von Hochtemperatur-Schmierstoffen



Bilder 8a und b. Extrusion einer Alkali-Kalksilicatschmelze a) bei einer Cr-N-Stahl-Matrize, b) bei einer Graphit-Matrize. Matrizeingangsdruck $p_0 = 200$ bar, Preßtemperatur $\vartheta = 685$ °C, Viskosität $\eta = 10^{8,05}$ dPa s, Matrizendurchmesser $D_0 = 5$ mm, Matrizenlänge $L = 10$ mm.

erwarten, die allerdings mit der Glasschmelze nicht nachteilig (z. B. durch Verunreinigung oder Änderung der chemischen Zusammensetzung) reagieren dürfen.

Die in Bild 8 gezeigten Strangkonturen wurden für Kreisquerschnitte ermittelt, wobei die Aufweitung radialsymmetrisch erfolgte. Beim Einsatz von Matrizen mit nicht kreisförmigem Öffnungsprofil stellen sich hingegen kompliziertere Abweichungen vom Öffnungsprofil der Matrizen ein, die z. T. ein „kissenförmiges“ Aussehen aufweisen (Bilder 9a und b). Solche Abweichungen lassen sich neben den oben beschriebenen Möglichkeiten auch durch eine Kompensation der Strangaufweitung durch eine entsprechende „Negativ“-Korrektur des Matrizenöffnungsprofils beseitigen.

Eine Abhängigkeit der Strangaufweitung vom Preßdruck konnte in dem hier untersuchten Druckbereich von 50 bis 300 bar in Ergänzung zu bereits früher veröffentlichten Ergebnissen [2] nicht eindeutig festgestellt werden (Bild 10).

4. Formelzeichen

D_R, D_0, D_∞ Rezipienten-, Matrizenkanal- und Strangenddurchmesser

$\frac{dw_z}{dr}$ Geschwindigkeitsgefälle

L Matrizenlänge

p_{Umg} Umgebungsdruck

p_0 Matrizeineingangsdruck

Δp Druckdifferenz zwischen Matrizenein- und ausgang

r radiale Ortskoordinate

R_R, R_0, R_∞ Rezipienten-, Matrizenkanal- und Strangendradius

w_z axiale Strömungsgeschwindigkeit

w_{zmax} maximale Strömungsgeschwindigkeit

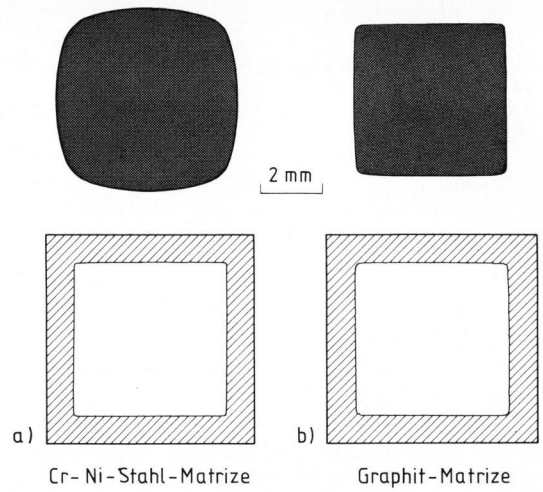
$w_{z\infty}$ mittlere Strangaustrittsgeschwindigkeit

z axiale Ortskoordinate

ϑ Preßtemperatur

η dynamische Viskosität der Glasschmelze

$\tau_{(r=R_0)}$ Schubspannung an der Matrizenkanalwand



Bilder 9a und b. Querschnittsprofile stranggepreßter Stäbe aus Alkali-Kalksilicatglas bei Verwendung einer Matrize aus Cr-Ni-Stahl (Bild a) und einer Matrize aus Graphit (Bild b). Preßtemperatur $\vartheta = 685^\circ\text{C}$, Viskosität $\eta = 10^{8,05}$ dPa s, Matrizenlänge $L = 10$ mm.

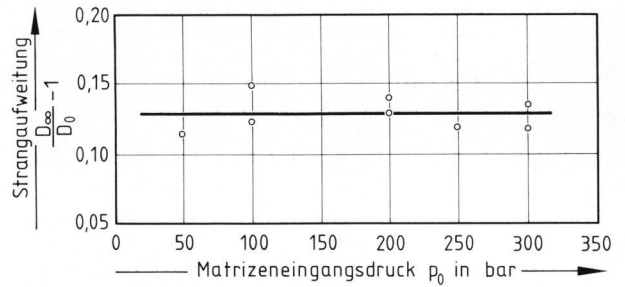


Bild 10. Abhängigkeit der Strangaufweitung vom Matrizeineingangsdruck für eine Alkali-Kalksilicatmelze. Preßtemperatur $\vartheta = 685^\circ\text{C}$, Viskosität $\eta = 10^{8,05}$ dPa s, Matrizendurchmesser $D_0 = 5$ mm, Matrizenlänge $L = 10$ mm.

5. Literatur

[1] Roeder, E.: Extrusion of glass. *J. Non-Crystalline Solids* **5** (1970/71) S. 377–388. [Ref. *Glastechn. Ber.* **46** (1973) 73R0285.]

[2] Roeder, E.: Flow behaviour of glass during extrusion. *J. Non-Crystalline Solids* **7** (1972) S. 203–220. [Ref. *Glastechn. Ber.* **46** (1973) 73R0008.]

[3] Scholz, S. und Roeder, E.: Verfahren zur Herstellung von Stangen, Rohren oder dgl. aus Glas. DBP. – Nr. 1 596 545. N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven. Pat. ab 14. 10. 1967, ausg. 23. 8. 1973. [Ref. *Glastechn. Ber.* **46** (1973) 73P0829.]

[4] Roeder, E.: Strangpressen von Glas. *Philips techn. Rdsch.* **32** (1971/72) S. 116–121.

[5] Barus, C.: *Amer. J. Med. Sci.* **45** (1893) S. 87.

[6] Meissner, J.: Rheologie der Polymerschmelzen und ihre Bedeutung für die Kunststofftechnik. *Chem. Rdsch.* **28** (1975) Nr. 39, S. 25–27.

[7] Menges, G.: *Werkstoffkunde der Kunststoffe*. München: Hanser 1979. S. 85 ff.

[8] Meerlender, G.: Einige Ergebnisse und meßtechnische Fragen zur Viskosimetrie an Glasschmelzen. *Rheol. Acta* **2** (1962) S. 283–292. [Ref. *Glastechn. Ber.* **37** (1964) S. 482.]

[9] Zidan, M.: Zur Rheologie des Spinnprozesses. *Rheol. Acta* **8** (1969) S. 89–123.

[10] Richardson, S.: The die swell phenomenon. *Rheol. Acta* **9** (1970) S. 193–199.

[11] Horsfall, F.: A theoretical treatment of die swell in a Newtonian liquid. *RAPRA* (= Rubber and Plastics Res. Assoc. of Great Britain). Res. Rep. No. 12 (1971.)

[12] Nickell, R. E.; Tanner, R. J. und Caswell, B.: The solution of viscous incompressible jet and free-surface flows using finite-element methods. *J. Fluid Mech.* **65** (1974) S. 189–206. 81R0777