

Kraftbedarf und Austrittsgeschwindigkeit beim Strangpressen einer Alkali-Kalksilicatglasschmelze¹⁾

Teil 1. Fließvorgänge im Matrizenkanal beim Einsatz unterschiedlicher Matrizenwerkstoffe

Von Günter Cox²⁾ und Erwin Roeder, Kaiserslautern

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

(Eingegangen am 19. April 1984)

Die Wirtschaftlichkeit des Strangpreßverfahrens zur Formgebung von Glasschmelzen wird in erster Linie durch die Geschwindigkeit des austretenden Glasstranges sowie durch den zur Umformung erforderlichen Kraftbedarf bestimmt. Beide Größen stehen in engem Zusammenhang mit den Reibungsverhältnissen im Matrizenkanal. Die möglichen Strömungszustände der Glasschmelze innerhalb des Matrizenkanals werden mit Hilfe dreier

Fließmodelle beschrieben. Die Gültigkeit des für die verschiedenen erprobten Matrizenwerkstoffe jeweils zutreffenden Fließmodells wird durch experimentelle Befunde belegt und hiermit zugleich eine Erklärung für die unterschiedlichen, werkstoffabhängigen Strangpreßgeschwindigkeiten gegeben. In Teil 2 dieser Arbeit werden die Umformvorgänge innerhalb der Umformzone und des Blockaufnehmers betrachtet.

Power requirements and exit velocities in the extrusion of alkali-lime-silica glass Part 1. Flows in the orifice channel with the use of different materials of construction

The economics of forming glass by extrusion depends chiefly on the exit velocity of stream of glass and the power needed to sustain it. Both of these are closely related to the frictional behaviour in the orifice. The flow regimes possible in the orifice channel are described using three different flow models. The

validity of these for the various nozzle materials used has been established experimentally and leads to a clarification of the different material dependent extrusion velocities observed. In part 2 of this work the deformation behaviour in between the forming range and the take up drum will be considered.

Énergie nécessaire et vitesse de sortie d'une masse de verre silicocalcique alcaline au cours de son extrusion 1ère partie. Processus d'écoulement dans le canal matriciel lors de l'emploi de matériaux de matrice différents

La rentabilité du processus d'extrusion lors du formage de masses de verre pâteuses, est déterminée en premier lieu par la vitesse du profilé de verre sortant, ainsi que par l'énergie nécessaire à son formage. Ces deux paramètres sont en étroite corrélation avec les conditions de frottement dans le canal matriciel. Les régimes d'écoulement de la masse de verre à l'intérieur du canal matriciel sont décrits à l'aide de trois modèles

d'écoulement. La validité du modèle qui s'applique à chaque fois aux différents matériaux de matrice testés, est démontrée par les données expérimentales et on donne en même temps une explication pour les différentes vitesses d'extrusion dépendant des matériaux. Dans la 2ème partie de cette étude, on considère le processus de formage à l'intérieur de la zone de formage et du cylindre d'extrusion.

1. Einführung

Die Methode des Strangpressens von Glasschmelzen zur Herstellung beliebiger Innen- und Außenprofile wurde bereits in früheren Arbeiten eingehend beschrieben [2 und 3]. Im Gegensatz zur Formgebung metallischer Werkstoffe spielen hierbei die Reibungsverluste im Matrizenkanal eine entscheidende Rolle. Diese Verluste werden maßgeblich durch die Wahl des Matrizenwerkstoffes beeinflusst. Voraussetzung zur Bestimmung der Reibungsverluste im Matrizenkanal ist die Kenntnis des Druckabfalls innerhalb des Kanals bzw. die an der Kanalwand wirksame Schubspannung. Zwischen Höhe und axialem Verlauf des Druckabfalls und der Wandschubspannung einerseits

sowie dem Fließverhalten der Glasschmelze andererseits besteht ein unmittelbarer Zusammenhang.

2. Geschwindigkeitsprofile

Das Fließverhalten einer inkompressiblen Flüssigkeit durch eine Düse kann, für den Fall einer laminaren Strömung, durch drei verschiedene, prinzipiell mögliche Randbedingungen beschrieben werden [4]. In den Bildern 1a bis c sind die dazugehörigen Geschwindigkeitsprofile beim Durchströmen eines Kanals mit kreisförmigem Öffnungsquerschnitt wiedergegeben.

Für den Fall des Haftens der strömenden Flüssigkeit an der Kanalwand ergibt sich aus Bild 1a eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung über dem Kanalradius nach Gleichung (1) [5]:

$$v(r) = \frac{R^2 - r^2}{4\eta L} \Delta p \quad (1)$$

¹⁾ Dieser Arbeit liegt die vom Fachbereich Maschinenwesen der Universität Kaiserslautern genehmigte Dissertation von G. Cox [1] zugrunde.

²⁾ Jetzt: Pfaff Industriemaschinen GmbH, Kaiserslautern.

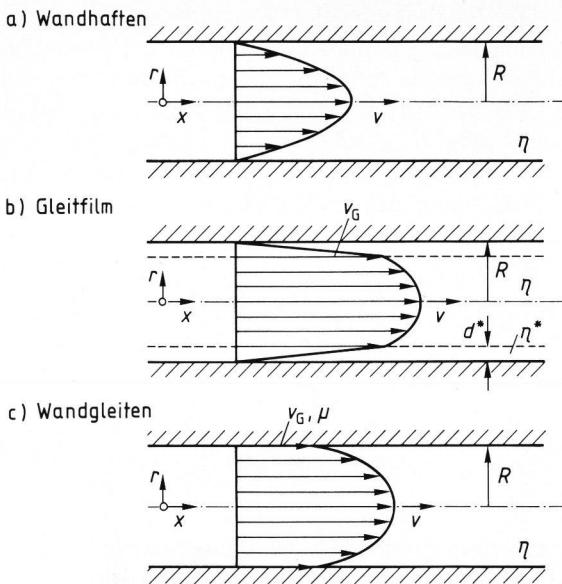


Bild 1. Mögliche Geschwindigkeitsprofile bei der Strömung eines Fluids durch einen Kanal mit kreisförmigem Öffnungsquerschnitt.

Hierin bedeuten R den Kanalradius, r die radiale Wegkoordinate, L die Kanallänge, η die dynamische Zähigkeit des fließenden Mediums und Δp den Druckgradienten zur Überwindung der Zähigkeitskräfte in Strömungsrichtung. Das Strömungsvolumen \dot{V} ist gleich dem Flächenintegral der Geschwindigkeit über dem Gesamtquerschnitt des Kanals.

$$\dot{V} = \frac{\pi R^4}{8 \eta L} \Delta p. \tag{2}$$

Aus dieser als Hagen-Poiseuillesches Gesetz bekannten Beziehung läßt sich nach Division durch den Kanalquerschnitt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit zu

$$\bar{v} = \frac{R^2 \Delta p}{8 \eta L} \tag{3}$$

berechnen.

Die über die gesamte Kanallänge konstante Wandschubspannung beträgt

$$\tau_w = \frac{R \Delta p}{2 L}. \tag{4}$$

Bei einer Kanalströmung wird unter Ausbildung eines „Gleitfilms“ an der Kanalwand (Bild 1b) angenommen, daß sich an der Kanalwand eine dünne Grenzschicht mit einer vergleichsweise niedrigen Viskosität η^* bildet und die Flüssigkeit entlang dieses an der Kanalwand haftenden Films vorbeigleitet [4]. Das Gleiten ist demnach kein vollkommenes Loslösen von der Wand, sondern ein Scherfließen mit

einem abnormal großen Geschwindigkeitsgradienten in der an der Wand haftenden dünnen Schicht. Der Volumendurchsatz setzt sich nach Bild 1b aus zwei Anteilen zusammen, wobei ein Anteil dem Gleiten entlang der Kanalwand, der andere der Scherverformung des fließenden Mediums entspricht.

Für den Gleitanteil gilt mit der Gleitgeschwindigkeit v_G

$$\dot{V}_G = \pi R^2 v_G. \tag{5}$$

Der Volumendurchsatz auf Grund der Scherverformung läßt sich in allgemeiner Form zu

$$\dot{V}_S = \frac{\pi R^3}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau \tag{6}$$

angeben [6], wobei $f(\tau)$ dem Schergefälle gleichzusetzen ist. Damit ergibt sich für den Gesamt-Volumendurchsatz

$$\dot{V} = \pi R^2 v_G + \frac{\pi R^3}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau. \tag{7}$$

Eine Division von Gleichung (7) durch den Kanalquerschnitt πR^2 läßt die verschiedenen Geschwindigkeitsanteile erkennen:

$$\frac{\dot{V}}{\pi R^2} = v_G + \frac{R}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau. \tag{8}$$

In Gleichung (8) entspricht $\dot{V}/(\pi R^2)$ der mittleren Strömungsgeschwindigkeit \bar{v} , v_G der Gleitgeschwindigkeit und

$$\frac{R}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau$$

der Schergeschwindigkeit v_S . Es gilt also:

$$\bar{v} = v_G + v_S. \tag{9}$$

Die auch hier über die gesamte Kanallänge konstante Wandschubspannung τ_w kann wiederum aus der treibenden Druckdifferenz im Kanal nach Gleichung (4) bestimmt werden. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Gleitgeschwindigkeit v_G sowie der Wandschubspannung τ_w wird nach der Beschreibung aller Fließmodelle in Abschnitt 3. erläutert.

Das dritte Fließmodell basiert auf den Gesetzmäßigkeiten der Coulombschen Reibung und gilt für Fluide, die nach Bild 1c direkt an der Kanalwand gleiten bzw. reiben (Wandgleiten) [4]. Ausgehend vom Coulombschen Reibungsgesetz beträgt die an der Kanalwand ($r = R$) herrschende Schubspannung

$$\tau_w = - p \mu \tag{10}$$

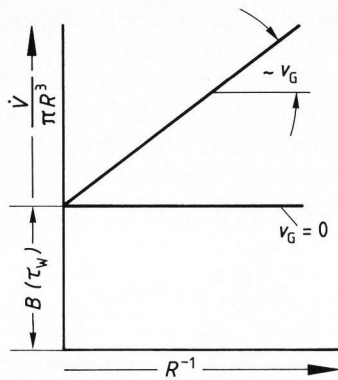


Bild 2. Bezogener Volumenstrom $\dot{V}/(\pi R^3)$ als Funktion des reziproken Radius R^{-1} bei Ausbildung unterschiedlicher Geschwindigkeitsprofile im Matrizenkanal.

mit μ als Coulombschem Reibungskoeffizienten. Andererseits erhält man, von der Schubspannungsverteilung im Kanal ausgehend, für die Wandschubspannung den Ausdruck

$$\tau_w = \frac{R}{2} \frac{dp}{dx} \tag{11}$$

Mit den Gleichungen (10 und 11) ergibt sich der Druckgradient an der Kanalwand in Achsrichtung x zu

$$\frac{dp}{dx} = - \frac{2 \mu p}{R} \tag{12}$$

Durch Integration der Gleichung (12) und unter Berücksichtigung der Randbedingung am Kanalende ($x = L \rightarrow p = p_A = \text{Atmosphärendruck}$) erhält man für den axialen Druckverlauf über die gesamte Kanallänge

$$p(x) = p_A e^{\frac{2\mu}{R}(L-x)} \tag{13}$$

Die Schubspannung entlang der Kanalwand im Falle Coulombscher Reibung läßt sich mit Hilfe der Gleichungen (10 und 13) beschreiben und weist demnach einen exponentiellen Verlauf auf.

$$\tau_w(x) = - \mu p_A e^{\frac{2\mu}{R}(L-x)} \tag{14}$$

3. Bestimmung von Wandgleitgeschwindigkeit und Wandschubspannung im Matrizenkanal

Wie aus den vorangegangenen Ausführungen ersichtlich, kann die Strömung eines Fluids durch einen Kanal mit Kreisquerschnitt auf Grund des Fließverhaltens an der Kanalwand charakterisiert werden. Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der maßgeblichen Kenngrößen, Wandgleitgeschwindigkeit und Wandschubspannung, soll im folgenden näher erläutert werden.

Die Bestimmung der Wandgleitgeschwindigkeit ist nach einer erstmals von Mooney [7] vorgeschlagenen Methode möglich. Hiernach betrachtet man den Volumenstrom durch Kanäle mit unterschiedlichen Radien R bei allerdings konstantem Verhältnis von Matrizenkanallänge L zum -durchmesser D unter der Bedingung, daß die Wandschubspannung τ_w über die gesamte Matrizenkanallänge konstant ist.

Für den Fall eines sich nach dem Gleitfilmmodell einstellenden Strömungszustandes ergibt sich nach Division der Gleichung (7) durch πR^3 der Ausdruck

$$\frac{\dot{V}}{\pi R^3} = \frac{v_G}{R} + B(\tau_w) \tag{15}$$

Demnach bestimmt sich die Gleitgeschwindigkeit v_G aus der Steigung einer Geraden, die man erhält, indem der jeweilige bezogene Volumenstrom $\dot{V}/(\pi R^3)$ über dem reziproken Matrizenradius R^{-1} aufgetragen wird (Bild 2). Die von der Höhe der Wandschubspannung abhängige Größe $B(\tau_w)$ entspricht dabei dem Ordinatenabschnitt. Der Forderung hinsichtlich einer konstant zu haltenden Wandschubspannung wird man gerecht, indem die Preßversuche mit konstantem Matrizenradius durchgeführt werden. Die dabei unter Variation der Matrizenkanaldurchmesser gemessenen Preß- und damit Strömungsgeschwindigkeiten \bar{v} ergeben die jeweiligen Werte für $\dot{V}/(\pi R^3)$.

Die Hagen-Poiseuillesche Strömung stellt einen Sonderfall ($v_G = 0$) des Gleitfilmmodells dar. Ändert man das Hagen-Poiseuillesche Gesetz nach Gleichung (2) dahingehend, daß man beide Seiten durch den Ausdruck πR^3 dividiert, so erhält man für den bezogenen Volumenstrom

$$\frac{\dot{V}}{\pi R^3} = \frac{R \Delta p}{8 \eta L} \tag{16}$$

Gleichung (16) macht deutlich, daß bei konstanten Umformparametern Δp , η und L/R der Ausdruck $\dot{V}/(\pi R^3)$ ebenfalls eine Konstante darstellt. Bedient man sich auch hier der grafischen Darstellungsweise entsprechend Bild 2, so besitzt die Steigung der sich ergebenden Geraden und damit die Geschwindigkeit an der Kanalwand den Wert Null; der Fall des Wandhaftens wird somit bestätigt. Der Betrag für den bezogenen Volumenstrom wird wiederum aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit \bar{v} ermittelt.

Um nun, insbesondere bei einer Abweichung des Fließverhaltens von der Hagen-Poiseuilleschen Strömung, eine Aussage über den Verlauf der Wandschubspannung τ_w zu bekommen, müssen Versuche mit konstanter Stempelgeschwindigkeit ausgeführt werden.

Die im Eintrittsquerschnitt „0“ zur Umformzone wirkende Matrizenkraft F_M (Bild 3) setzt sich zusammen aus der für die eigentliche Umformung erforderlichen Kraft F_{MU} und einem Kraftanteil F_{MR} zur Überwindung der Reibungsverluste im Matrizenkanal.

$$F_M = F_{MU} + F_{MR} \quad (17)$$

Läßt man innerhalb einer Versuchsreihe neben der Stempelgeschwindigkeit auch das Verpressungsverhältnis $U = (A_0/A_1)^2 = (D_0/D_1)^2$ (A_0 = Blockaufnehmerquerschnitt, A_1 = Matrizenöffnungsquerschnitt, D_0 = Blockaufnehmerdurchmesser, D_1 = Matrizenkanaldurchmesser) und die Preßtemperatur ϑ_{Um} unverändert, so führt dies zu konstanten Umformbedingungen in der Umformzone und damit zu einer konstanten Umformkraft F_{MU} . Diese Umformkraft ist der „hypothetischen“ Matrizenkanallänge $L_M = 0$ zuzuordnen (Bild 4).

Für den Fall einer konstanten Wandschubspannung ist die Steigung der Geraden in Bild 4 ein Maß für dieselbe und damit für die Reibungsverluste im Matrizenkanal. Die Wandschubspannung errechnet sich zu [1]

$$\tau_w = \frac{F_{MR}}{U \pi D_1 L_M} \quad (18)$$

Ein exponentieller Verlauf der Matrizenkraft F_M als Funktion der Matrizenkanallänge deutet dagegen auf einen Coulombschen Reibungsmechanismus in der Kontaktzone Glasschmelze/Kanalwand hin (siehe Gleichung (14)).

4. Versuchsergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen zum Fließverhalten der Glasschmelze im Matrizenkanal wurden mittels einer eigens dazu gefertigten Strangpresse mit einer maximalen Preßkraft von 75 kN durchgeführt [1]. Dabei kamen folgende Matrizenwerkstoffe zum Einsatz:

- a) hochlegierter Chrom-Nickel-Stahl X 15 CrNi-Si 2520,
- b) graues Gußeisen GG 26,
- c) Metallkeramik CERMOTHERM 2015,
- d) Elektrographit FE 49.

Tabelle 1 vermittelt einen Überblick bezüglich der chemischen Zusammensetzung und der Warmfestigkeit der verwendeten Matrizenwerkstoffe.

Bei der verpreßten Glassorte handelt es sich um ein optisches Glas (B 270), dessen Zusammensetzung weitestgehend mit der handelsüblicher Alkali-Kalk-silicatgläser übereinstimmt.

Zur Ermittlung der unmittelbar an der Kanalwand vorliegenden Geschwindigkeitsverhältnisse sind in Bild 5 die aus den mittleren Strömungsgeschwindigkeiten \bar{v}_1 der Glasschmelze im Matrizenka-

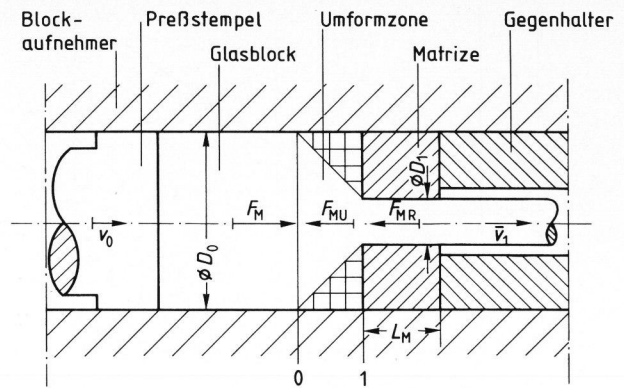


Bild 3. Wirksame Kräfte innerhalb des Matrizenbereiches.

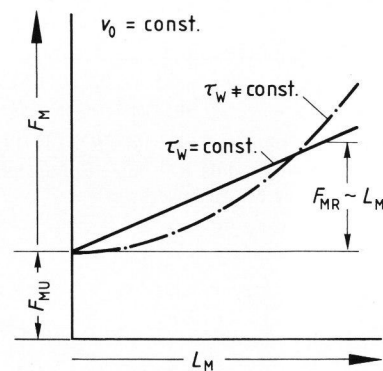


Bild 4. Verlauf der Matrizenkraft F_M als Funktion der Matrizenkanallänge L_M bei unterschiedlichen Randbedingungen.

Tabelle 1. Verwendete Matrizenwerkstoffe

Matrizenwerkstoff	chemische Zusammensetzung (Massengehalt in %)	Warmfestigkeit bei etwa 700 °C in N/mm ²
X 15 CrNiSi 2520	25 Cr; 20 Ni; 2 Si; 2 Mn; 0,15 C; Rest Fe	250
GG 26	3,2 C; 1,8 Si; 0,7 Mn; 0,2 Cr; Rest Fe	150
CERMOTHERM 2015	86 Mo; 9 ZrO ₂ ; Rest CaO	300
Graphit Fe 49	100 C	75

nal berechneten Werte für den bezogenen Volumenstrom $\dot{V}/(\pi R^3)$ über dem jeweiligen reziproken Matrizenkanalradius R^{-1} aufgetragen. Dabei wird die mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{v}_1 mit Hilfe der aufgezeichneten Stempelgeschwindigkeit v_0 aus der Kontinuitätsgleichung für den Volumenstrom ($v_0 D_0^2 = \bar{v}_1 D_1^2$ (siehe auch Bild 3)) bestimmt.

Für die Matrizenwerkstoffe Chrom-Nickel-Stahl, Grauguß GG 26 und CERMOTHERM 2015 ergibt sich ein horizontaler Verlauf der Geraden. Dies bestätigt den Fall der vollkommenen Wandhaftung

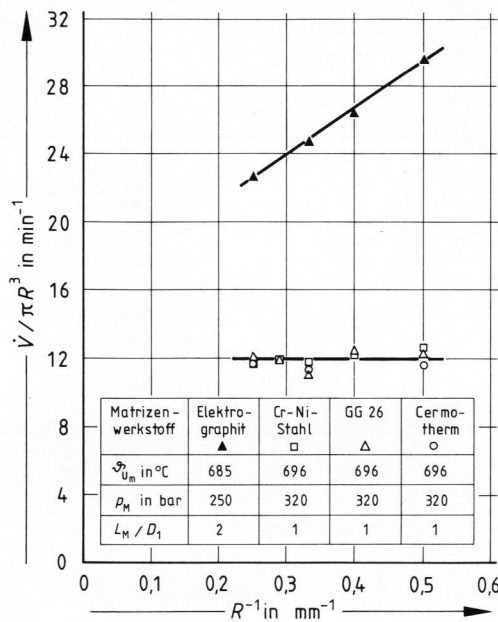


Bild 5. Bezogener Volumenstrom $\dot{V}/(\pi R^3)$ als Funktion des reziproken Matrizenkanalradius R^{-1} beim Einsatz unterschiedlicher Matrizenwerkstoffe.

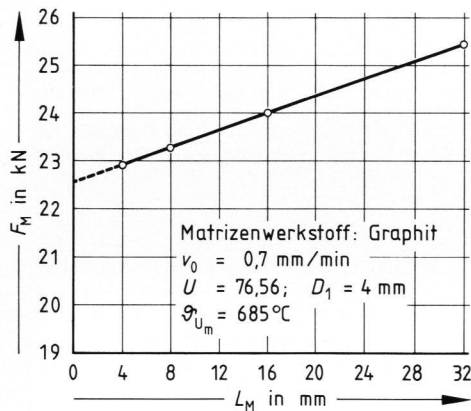


Bild 6. Matrizenkraft F_M in Abhängigkeit von der Matrizenkanallänge L_M .

im Matrizenkanal. Desweiteren wird durch Einsetzen der Versuchsparameter die Gültigkeit des Hagen-Poiseuilleschen Fließgesetzes und damit das Vorliegen einer konstanten Wandschubspannung entlang der gesamten Matrizenkanallänge bestätigt. Dietzel und Coenen [8 und 9] begründen die Ursache des Haftens von Glasschmelzen auf unedlen Metallen und deren Legierungen mit der Bildung von Haftoxiden an der Werkstoffoberfläche.

Im Gegensatz zu den Versuchen mit metallischen bzw. metallkeramischen Matrizenwerkstoffen weisen die sich beim Einsatz von graphitischen Matrizen ergebenden Geraden eine Steigung > 0 auf, wobei der Grad des Anstieges ein Maß für die sich nun ausbildende Gleitgeschwindigkeit v_G an der Kanalwand ist. Die Strömung der Glasschmelze im Ma-

trizenkanal gehorcht nun nicht mehr dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz.

Ein Vergleich der bezogenen Volumenströme und damit der erreichten Geschwindigkeitswerte der Glasschmelze im Matrizenkanal zeigt den dominierenden Einfluß des Matrizenwerkstoffes. Dabei fällt auf, daß bei den Preßversuchen durch Graphitmatrizen infolge der Ausbildung einer Gleitgeschwindigkeit trotz verminderter Preßkraft und -temperatur erheblich höhere mittlere Strömungsgeschwindigkeiten \bar{v}_1 erreicht werden als im Falle einer bei metallischen Matrizen vorliegenden vollkommenen Wandhaftung ($v_G = 0$).

Um auch bei der Verwendung graphitischer Matrizen eine Aussage über den Verlauf der Wandschubspannung zu erhalten, sind weitere Versuche mit konstanter Stempel- und damit Preßgeschwindigkeit erforderlich. Wie bereits erwähnt, ermöglicht die genaue Kenntnis des Matrizenkraftverlaufes über der Matrizenkanallänge Rückschlüsse auf Verlauf und Größe der Schubspannung an der Kanalwand.

In Bild 6 ist für die angegebenen Versuchsparameter der Verlauf der gemessenen Matrizenkräfte F_M als Funktion der Matrizenkanallänge L_M aufgetragen. Der lineare Anstieg der Matrizenkraft weist auf eine konstante Wandschubspannung innerhalb des Matrizenkanals hin. Dies legt den Schluß nahe, daß das auf der Coulombschen Wandreibung basierende Fließmodell, welches bekanntlich zu einem exponentiellen Verlauf der Wandschubspannung entsprechend Gleichung (14) führt, zur Beschreibung des Fließverhaltens nicht herangezogen werden kann. Die Tatsache, daß andererseits die Strömung der Glasschmelze durch Graphitmatrizen auch nicht mit dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz beschrieben werden kann, läßt vielmehr auf die Gültigkeit des Gleitfilmmodells schließen. Auf Grund der Versuchsdaten erhält man für den Gleitfilm eine um den Faktor $\approx 1,4 \cdot 10^2$ geringere Viskosität als die, welche sich unter alleiniger Zugrundelegung der Umformtemperatur ergeben würde. Bei dieser Berechnung wird angenommen, daß sich der Wert für die Gleitfilmviskosität η^* über die gesamte, hier unbekannte Dicke des Gleitfilms sowie über die Kanallänge nicht ändert.

Die starke Verminderung der Viskosität in der Nähe der Kanalwand kann auf das Zustandekommen chemischer Reaktionen in der Kontaktzone zwischen Glasschmelze und Matrizenwerkstoff zurückgeführt werden. Dabei ist es denkbar, daß während des Gleitens der Glasschmelze entlang der Kanalwand innerhalb der Graphitmatrize eine Reaktion zwischen dem Kohlenstoff und den in der Glasschmelze befindlichen Sauerstoffionen unter Bildung von CO und/oder CO₂ stattfindet. Die damit verbundene Auflösung der Sauerstoffbrücken innerhalb des unregelmäßigen SiO₂-Netzwerkes dürfte eine Herabsetzung der Glasviskosität zur Folge haben. Zugleich

könnte auch die Bildung der zuvor erwähnten Gase in grenzflächennahen Bezirken der Glasschmelze deren Zähigkeit erniedrigen. Schließlich erscheint es auch möglich, daß die in die Glasschmelze eindiffundierenden Kohlenstoffatome zu einer Verminderung der Viskosität beitragen. Hingegen kann, im Gegensatz zur Extrusion von Kunststoffen, eine derartig starke Viskositätserniedrigung infolge der Reibungswärme an der Kanalwand ausgeschlossen werden. Eine Abschätzung unter Zuhilfenahme der entsprechenden Stoffdaten sowie unter Berücksichtigung der vergleichsweise geringen Strömungsgeschwindigkeiten ergibt eine Temperatursteigerung der Glasschmelze im Matrizenkanal von weniger als 3 K.

Eine andere Erklärung für die beobachteten hohen Strangaustrittsgeschwindigkeiten bei der Verwendung von Graphitmatrizen auf Grund der das Wandgleiten begünstigenden Schmierwirkung des Graphits infolge seiner hexagonalen Schichtstruktur konnte durch die vorliegenden Versuche und theoretischen Überlegungen nicht bestätigt werden.

5. Zusammenfassung

Im Gegensatz zur Formgebung metallischer Werkstoffe spielen bei der Heißumformung anorganischer Gläser mittels des direkten Strangpressens durch axialsymmetrische Flachmatrizen die Reibungsverluste im Matrizenkanal eine entscheidende

Rolle. Diese Verluste werden maßgeblich durch die Wahl der Matrizenwerkstoffe beeinflusst und lassen sich auf unterschiedliche Fließmechanismen der Glasschmelze im Matrizenkanal zurückführen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kommen als Matrizenwerkstoffe metallische, metallkeramische und graphitische Werkstoffe zur Anwendung.

Sowohl beim Einsatz metallischer als auch metallkeramischer Matrizenwerkstoffe findet das mit dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz zu beschreibende Geschwindigkeitsprofil und damit das Vorliegen vollkommener Wandhaftung der Glasschmelze an der Matrizenkanalwand seine Bestätigung.

Die bei der Verwendung von Matrizen aus Elektrographit erreichten, im Vergleich zu Preßversuchen durch metallische Matrizen erheblich höheren Strangaustrittsgeschwindigkeiten sind auf ein Gleiten der Glasschmelze entlang der Matrizenkanalwand zurückzuführen. Diese Erscheinung läßt sich auf Grund der Versuchsergebnisse mit dem sogenannten Gleitfilmmodell beschreiben. Die erforderlichen Voraussetzungen des Auftretens einer Wandgleitgeschwindigkeit und einer konstanten Wandschubspannung werden durch die ausgeführten Versuche bestätigt. Als Ursache für die Bildung eines Gleitfilms verminderter Viskosität in Wandnähe wird eine örtliche Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Glasschmelze in Betracht gezogen.

6. Literatur

- [1] Cox, G.: Strangpressen anorganischer Glasschmelzen – Einfluß des Matrizenwerkstoffes auf Kraftbedarf und Strangaustrittsgeschwindigkeit. Univ. Kaiserslautern, Dr.-Ing.-Diss. 1983.
- [2] Roeder, E.: Extrusion of glass. *J. Non-Cryst. Solids* **5** (1970/71) S. 377–388. [Ref. *Glastech. Ber.* **46** (1973) 73R0285.]
- [3] Roeder, E.: Flow behaviour of glass during extrusion. *J. Non-Cryst. Solids* **7** (1972) S. 203–220. [Ref. *Glastech. Ber.* **46** (1973) 73R0008.]
- [4] Uhland, E.: Modell zur Beschreibung wandgleitender Substanzen durch Düsen. *Rheol. acta* **15** (1976) S. 30–39.
- [5] Truckenbrodt, E.: *Fluidmechanik*. Bd.1 u. 2. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1980.
- [6] Rabinowitsch, B.: Über die Viskosität und Elastizität von Solen. *Z. Phys. Chem.* **145** (1929) S. 1–26.
- [7] Mooney, M.: Explicit formulas for slip and fluidity. *J. Rheology* **2** (1931) S. 210–222.
- [8] Dietzel, A.: Reaktionen und Haftung zwischen Glas und Metall beim Verschmelzen. *Glastech. Ber.* **24** (1951) S. 263–268.
- [9] Dietzel, A.; Coenen, M.: Zusammenhang zwischen Benetzbarkeit durch Glasschmelzen und elektrochemischen Eigenschaften bei Edelmetallen. *Glastech. Ber.* **32** (1959) S. 357–361. 84R1073