

Untersuchungen zur Strangaufweitung bei der Tropfenbildung

Vortrag auf der DGG-Jahrestagung 2005 in Würzburg

F. Reeßing, Physikalisch-Technische Beratung Dr. Reeßing, Ilmenau

1. Ziel und Motivation der Untersuchung

1.1 Ausgangspunkt

Zur Erreichung einer hohen Produktqualität z. B. beim Pressen oder Blasen von Hohlglasartikeln ist die Bereitstellung eines dafür gut geeigneten Glastropfens erforderlich. Wichtige Forderungen an diesen Tropfen sind:

- Einhaltung der Tropfenmasse mit geringen Abweichungen,
- Einstellung einer geplanten mittleren Viskosität des Tropfens, angepasst an die Formgebungsbedingungen sowie an die Größe des Produkts,
- Einhaltung einer bestimmten Form je nach Geometrie des Produkts, die besonders durch das Verhältnis von Tropfenlänge zu Durchmesser beschrieben wird, und
- Begrenzung der Einschnürung des Tropfens unter seinem Eigengewicht.

Der Tropfen muss in seinem Verhältnis von Länge zu Durchmesser diesem Verhältnis beim zu fertigenden Produkt angemessen sein. Dabei ist im Einzelfall zu prüfen, in welcher Zone besonders große Verformungsarbeit bei der Formgebung zu leisten ist. Dies trifft besonders bei starken Änderungen der Radien und anderer Maße zu. So stellt z.B. eine Flasche mit engem Hals erhöhte Anforderungen. Spezielle Anforderungen treten bei vielen Produkten auf, die von der Axialsymmetrie stärker abweichen. Es kann verschiedene Gründe geben, mit einem möglichst kleinen Düsendurchmesser zu arbeiten, ohne die bestehenden Forderungen an

- Tropfenmasse und
- Verhältnis von Länge zu Durchmesser L/D

zu verletzen, von denen nachfolgend zwei genannt werden.

1.2 Herstellung großer Tropfen bei kleiner Schnittzahl

Besonders bei Tropfen mit Massen über 1 kg lässt sich das Verhältnis von Länge zu Durchmesser nur bei genügend großem Düsendurchmesser des Tropfrings einhalten. Dann steigt, je größer der Düsendurchmesser und je kleiner die Schnittzahlen sind, um so mehr das Risiko, dass in der Phase des Anhebens des Plungers die Glasmasse nicht mehr komplett im Tropfring gehalten werden kann und eine "Nase" aus der Düse heraushängen kann. Ursache dafür ist dann die nicht angepasste Saugwirkung des Plungers oder gegebenenfalls eine nicht ausreichende thermische Homogenität im Speiserkopf. Man könnte diese Saugwirkung zwar durch einen leicht erhöhten Plungerdurchmesser vergrößern, hätte aber dann möglicherweise das Problem, dass das Nachfließen von Glasmasse nicht mehr ausreicht für den nächsten Glastropfen. Es ist nicht leicht, immer die richtige Saugwirkung des Plungers zu erreichen. Wenn sie auch nur kurzzeitig zu groß wird, wird Luft in den Tropfring eingesaugt und verursacht für eine bestimmte Zeit blasenhaltige Produkte. Es ist also eine gute Abstimmung der Saugwirkung über die Geometrie des Speiserkopfs (einschließlich der Wahl des Tropfrings für das konkrete Produkt) und die Form der Plungerhubkurve notwendig.



Bild 1a-1c: Tropfenformen vor dem Schnitt.

1.3 Schermarken

Ein weiterer möglicher Grund ist die Minimierung von Schermarken. Das kann z.B. durch kurzes Nacherwärmen geschehen, oder durch eine Führung des Formgebungsprozesses in einer solchen Art und Weise, dass diese Marken im Endprodukt keine Rolle spielen. Die Schermarken werden etwas kleiner, wenn der Strangdurchmesser kurz unter dem Tropfring kleiner ist. Bei Einhaltung der vorgegebenen Tropfenmasse bedeutet das eine größere Tropfenlänge. Dies ist oft nicht tolerierbar. Also besteht hier der Bedarf an einem möglichst kleinen Düsendurchmesser bei Gewährleistung von Tropfenmasse und Verhältnis von Länge zu Durchmesser L/D .

1.4 Ziel der Untersuchungen

Eine Hilfe bei der Bereitstellung von Glaspfropfen mit genügend kleinem Verhältnis von L/D kann in vielen Fällen die Ausnutzung der Strangaufweitung beim Verlassen der Unterkante des Tropfrings sein. Diese tritt nur unter bestimmten Bedingungen in einem solchen Ausmaß auf, welches in diesem Zusammenhang hilfreich sein kann. Immerhin würde die Tropfenmasse, wenn man eine mittlere Strangaufweitung von z.B. 5 % annimmt, bei gleichem mittlerem Tropfendurchmesser (Idealisierung als Zylinder) eine Senkung der Tropfenlänge von ca. 10 % ermöglichen. Das kann sehr nützlich sein, wenn das Verhältnis L/D gesenkt werden muss. Daher sind solche Untersuchungen lohnend. Ein erster Schritt dazu ist der Vergleich der Fotos von Tropfen, die unter verschiedenen Bedingungen und Betriebszuständen aufgenommen wurden. Sie geben über die Geometrie Aufschluss.

1.5 Bilder von Tropfen

Die Beispiele in Bild 1 zeigen die Tropfenform, die sich aus dem gleichzeitigen Wirken

- der Dosiergeschwindigkeit,
- des Eigengewichts und
- der Strangaufweitung

ergibt. Sie zeigen die Überlagerung der Einflüsse an. Bei Bild 1a ist eine Strangaufweitung erkennbar, weil die Zeit für das Wirken des Eigengewichts noch kurz war. Auch im Bild 1b nach etwas längerer Dosierzeit ist diese Wirkung noch sichtbar. Im Bild 1c ist bereits eine Einschnürung des Tropfens zu sehen.

So nützlich solche Bilder sind, sie erlauben keine direkte Ermittlung der einzelnen Einflüsse. Daher wurden Berechnungen geplant, welche die Untersuchung der einzelnen Einflüsse gestatten:

- mittlere Viskosität,
- Düsendurchmesser und Düsenlänge,
- Plungersenkgeschwindigkeit,
- Dosierzeit u.a.

1.6 Lösungsweg

Ziel dieser Untersuchung ist es, zu ermitteln, unter welchen Bedingungen diese Strangaufweitung ("Düsenschwellphänomen") eine technologisch interessante Größe annimmt. Dazu werden auf Basis der physikalischen Grundlagen die Bedingungen variiert, die Einfluss auf den Betrag der Strangaufweitung haben, um festzustellen, wann die Strangaufweitung nutzbringend zur Verbesserung der Tropfenform eingesetzt werden kann.

2. Physikalische Grundlagen und Literaturangaben

2.1 Literaturangaben

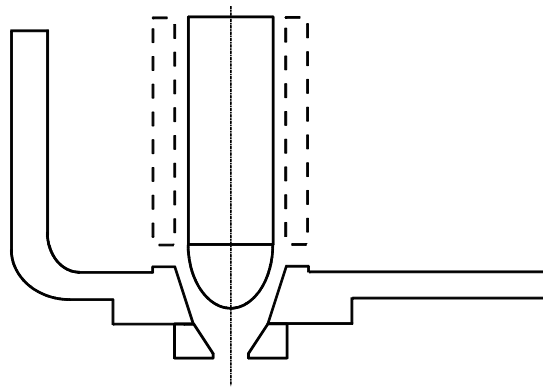
Von Roeder und Achten [1] wird über Untersuchungen zum Düsenschwellphänomen beim Strangpressen von Glasschmelzen berichtet. Dazu wurde ein Glasstrang bei relativ hoher Viskosität um ca. 10^8 dPa s einem hohen Druck bis zu mehreren 100 bar ausgesetzt, um ihn durch eine enge Matrize mit einer Austrittsdüse von 5 mm Durchmesser und 10 mm Länge zu pressen. Unter den gegebenen Bedingungen wurden Strangaufweitungen bis ca. 13,5 % bezogen auf den Durchmesser festgestellt. Diese Strangaufweitung tritt bei einer Matrize aus Grafit nicht auf, da diese nicht benetzt wird. Bei anderen metallischen Matrizen aus Chromnickelstahl oder Grauguss trat der Effekt der Strangaufweitung auf.

Diese Versuche und ihre Auswertung haben gezeigt, dass die Reibung der Glasschmelze an der Innenwand der Düse in Gestalt der Haftbedingung Geschwindigkeit ist gleich Null direkt an der Innenwand eine Grundvoraussetzung für das Auftreten der Strangaufweitung ist. Das Gegenbeispiel der Grafit-Matrize mit Gleiten der Glasschmelze an der Innenwand und fehlender Strangaufweitung zeigt den Unterschied.

Weiter haben die Untersuchungen in [1] ergeben, dass für das Auftreten einer entsprechend großen Strangaufweitung auch eine Mindestlänge der Austrittsdüse der Matrize erforderlich ist. Ein anderes Ergebnis besteht in der Aussage, dass unter den beschriebenen Versuchsbedingungen die Strangaufweitung mit steigendem Pressdruck nicht zunimmt, weil fast der gesamte Druck in der Düse "aufgezehrt" wird.

Grundsätzliche Gedanken zur Strangaufweitung:

In der Düse des Tropfrings muss die strömende Glasschmelze an dessen Innenwand haften, damit nach Verlassen der Düse Strangaufweitung auftreten kann. Bei nicht benetzendem Material wie Grafit findet sie nicht statt. Die allmähliche Umstellung vom parabolischen Geschwindigkeitsprofil, wie es in einer hinreichend langen Düse vorliegt, auf das ebene Geschwindigkeitsprofil außen im freien Strang erzeugt einen inneren Überdruck gegenüber der Randzone ab dem Ende der Düse ("Aufweitungsdruk"). Dieser Überdruck bewirkt die Aufweitung des Strangs solange bis sich ein Ausgleich mit dem Umgebungsdruck und der Oberflächenspannung der Glasschmelze eingestellt hat. Die Strangaufweitung ist beendet, wenn sich ein ebenes Geschwindigkeitsprofil v_z im freien Strang ausgebildet hat. Das ist gemäß [1] nach einem axialen Abstand von etwa dem Düsendurchmesser ab der Unterkante der Düse der Fall.



SK_Schema2cpg 16.2.2005

Bild 2: Querschnitt durch eine Speiserschüssel.

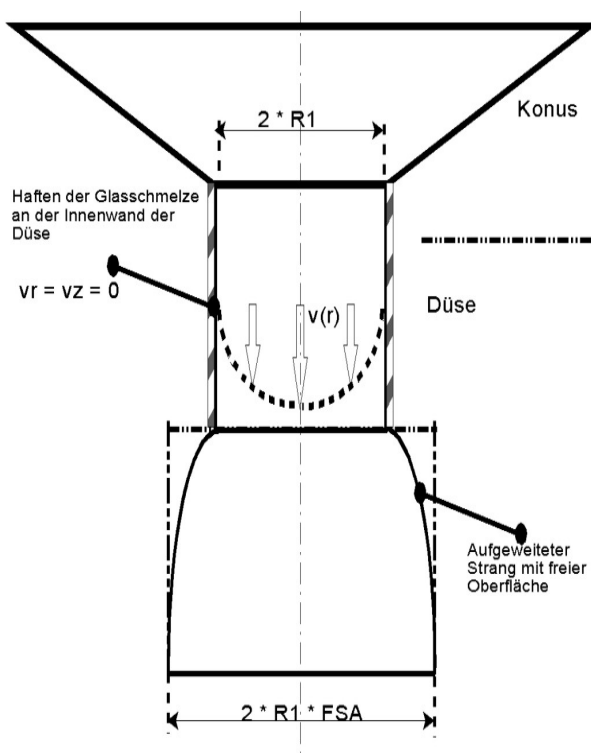


Bild 3: Strömungsquerschnitt einer Speiserschüssel.

2.2 Physikalische Betrachtungen

Bild 2 zeigt das Schema einer Speiserschüssel. Zur Untersuchung der Vorgänge bei der Tropfenbildung wird nachfolgend der Strömungsquerschnitt im Auslaufbereich betrachtet. Bild 3 zeigt schematisch den Strömungsquerschnitt. Das Glas fließt durch Konus und Düse des Tropfrings unter der Wirkung eines Drucks, der sich aus dem hydrostatischen Druck der Glasmasse im Speiserkopf und der Abwärtsbewegung des Plungers ergibt. An der Innenwand der Düse haftet die fließende Glasmasse gemäß

$$v_z = v_r = 0$$

Im Unterschied dazu ist die freie Oberfläche des Strangs nach Verlassen der Düse durch Gleiten an einer gedachten Außenfläche gekennzeichnet. An der sich im Gleichgewicht befindenden freien Oberfläche ab der Unterkante der Düse verschwindet die Kraft F_r , die radial auf die Oberfläche wirkt.

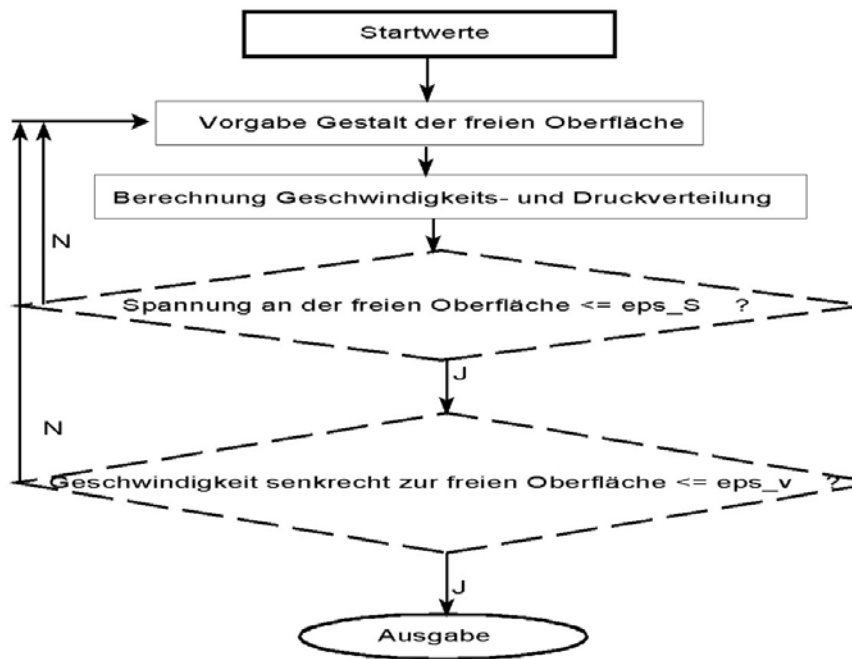


Bild 4: Iterationsverfahren nach Nickell und Tanner.

$$F_r = 0$$

Die in die vertikale z-Richtung wirkende Kraft

$$F_z = F_z(g, \rho)$$

wird durch das Gewicht bestimmt. Damit besteht die Aufgabe, aus der Vorgabe

- des Geschwindigkeitsfeldes in der Düse,
- der Strömungsrandbedingungen in der Düse und im freien Strang sowie
- den wirkenden Zusatzkräften

das sich ausbildende Profil des Glasstrangs unterhalb der Düse zu berechnen.

2.3 Vorgehen bei der Untersuchung

Durch Nickell u.a. [2] wurde ein Iterationsverfahren beschrieben, mit dem man die Gestalt der freien Oberfläche des Glasstrangs ab der Unterkante der Düse näherungsweise berechnen kann, wie im Bild 4 angegeben. Dieses Verfahren wird als Basis für die eigenen Berechnungen verwendet. Um den Effekt der Strangaufweitung deutlich herauszuarbeiten wird sie zunächst unter Vernachlässigung der Strangeinschnürung unter dem Eigengewicht ermittelt. Damit kann der Effekt als solcher studiert werden. Anschließend ist zu prüfen, wie viel von dieser Wirkung der Strangaufweitung durch die Strangeinschnürung anschließend zunichte gemacht wird.

3. Rechenbeispiele

3.1 Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung von der Düse bis in den freien Strang

Nachfolgend wird als Beispiel eine Berechnung der Änderung des Geschwindigkeitsprofils an der Unterkante der Düse beim Übergang in den Strang mit freier Oberfläche vorgestellt. Dazu wurde zunächst das Eigengewicht vernachlässigt, um den Effekt der Strangaufwei-

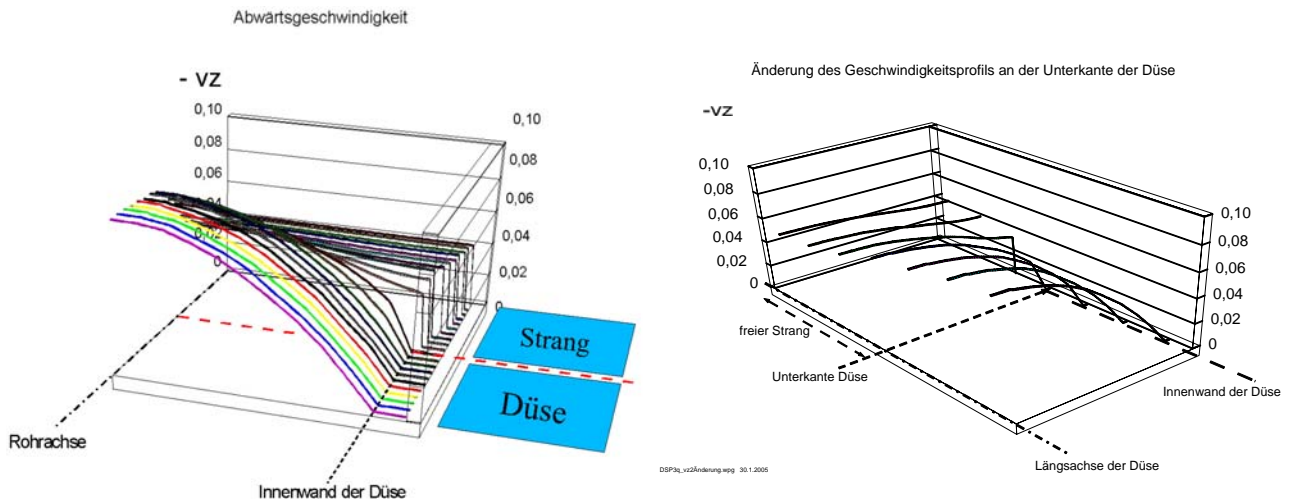
tung separat zu erfassen. Aus Symmetriegründen genügt die Berücksichtigung einer Hälfte des Strömungsquerschnitts. Notwendige Vorgaben sind u.a. die Geometrie des Auslaufbereichs, die Viskosität, der hydrostatische Druck über der Unterkante der Düse, die Plungersenkgeschwindigkeit und dadurch auftretender Druck.

Prüfgröße ist der Faktor der Strangaufweitung. Er beschreibt das Verhältnis des berechneten Durchmessers des aufgeweiteten freien Strangs zum Durchmesser der Düse. Nur dann, wenn sich für einen angenommenen (also den zu prüfenden) Faktor der Strangaufweitung widerspruchsfreie Geschwindigkeits- und Druckverteilungen ergeben, kann dieser als brauchbare Näherungslösung angenommen werden. Das Ergebnis der Berechnung ist die Verteilung des Drucks, der vertikalen und radialen Geschwindigkeitskomponente in der Düse und darunter. Man erkennt, dass sich bei ausreichend langer Düse ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil einstellt. Es wird auch sichtbar, dass dieses Profil bereits vor der Unterkante der Düse beginnt, sich umzustellen in Richtung eines ebenen Profils. Nach Verlassen der Unterkante der Düse geht die Umstellung auf das ebene Geschwindigkeitsprofil zügig voran.

Die radiale Geschwindigkeitskomponente v_r in Bild 6 zeigt am Ende des Konus eine starke Umstellung des Strömungsprofils an, wie zu erwarten. Diese ist nach der halben Düsenlänge weitgehend abgeschlossen. Die Maße der Düse sind im Beispiel Düsenradius 30 mm und Düsenlänge 90 mm. Die Veränderung des Strömungsprofils vom annähernd parabolischen Verlauf im unteren Teil der zylindrischen Düse beginnt noch vor der Unterkante der Düse.

Die relativ hohen Beträge der radialen Geschwindigkeitskomponente v_r kurz unterhalb der Düse zeigen an, dass hier die Umstellung in Richtung des ebenen Geschwindigkeitsprofils besonders zügig erfolgt. Immerhin ist der Aufweitungsdruk im Strang, der an der Unterkante der Düse infolge der radikalen Änderung der Strömungsrandbedingung entsteht, dort am größten. Damit ist die Zunahme des Strangdurchmessers dort auch größer als in weiterem Abstand ab der Unterkante der Düse. Mit zunehmendem Abstand von der Unterkante der Düse, also im freien Strang, wird der Aufweitungsdruk immer geringer und führt immer weniger zur Vergrößerung des Strangdurchmessers bis die Änderungen klein genug werden, um die weitere Berechnung zu größeren Abständen ab der Unterkante der Düse zu stoppen. Bereits bei Roeder [1] wurde darauf verwiesen, dass in einem vertikalen Abstand von ungefähr dem doppelten Düsenradius die Umstellung auf das ebene Geschwindigkeitsprofil weitgehend abgeschlossen ist.

Es wurden zahlreiche Varianten von Druckvorgaben bzw. Plungersenkgeschwindigkeiten für mehrere ausgewählte Geometrien gerechnet. Längst nicht für jede Variante gab es sinnvolle Lösungen mit akzeptablen Geschwindigkeits- und Druckverteilungen. Die typische Druckverteilung sieht so aus, dass der weitaus größte Druckabfall in der Düse erfolgt. Bild 7 zeigt den Verlauf mit Hilfe von Isobaren. Oberhalb einer bestimmten Plungersenkgeschwindigkeit ist es nicht möglich, die Strangaufweitung durch weitere Erhöhung der Plungersenkgeschwindigkeit zu steigern. Das ist erklärbar, denn mit vergrößerter Plungersenkgeschwindigkeit steigt zwar der Aufweitungsdruk, aber in gleichem Maße steigt die mittlere Ausströmgeschwindigkeit aus der Düse, so dass sich beide Einflüsse bezüglich der beabsichtigten Strangaufweitung kompensieren.



Bilder 5: a) Berechnete Verläufe der vertikalen Geschwindigkeitskomponenten v_z oberhalb und unterhalb der Unterkante der Düse sowie b) Detailansicht aus a).

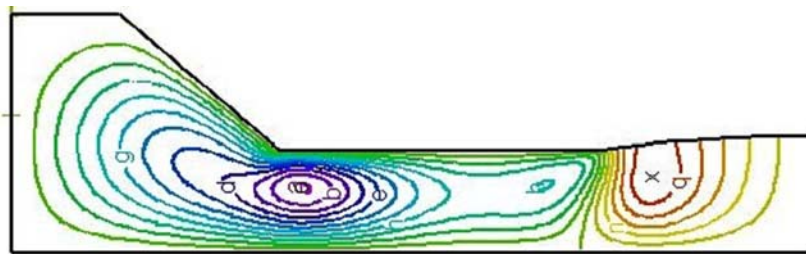


Bild 6: Radiale Geschwindigkeitskomponenten v_r (um 90° gedreht).



Bild 7: Druckverteilung in einer Düse (um 90° gedreht).

3.2 Variation des Verhältnisses Düsenlänge/Düsendurchmesser

Für einen gegebenen Düsendurchmesser von 60 mm wurde die Länge der Düse variiert und die Strangaufweitung näherungsweise ermittelt. Das Gewicht des Strangs wurde zur Ermittlung des eigentlichen Effekts der Strangaufweitung vernachlässigt. Bild 8 zeigt die Änderung der Strangaufweitung bei Variation der Düsenlänge L_1 . Damit ist ersichtlich, dass die Strangaufweitung umso geringer wird, je kürzer die Düse ist.

Die Vergrößerung des Verhältnisses von Düsenlänge zu Düsendurchmesser bis zu einem Wert von 2 erhöht die Strangaufweitung stetig. Es kündigt sich eine Minderung des Anstiegs bei Düsenlänge = $1.5 \cdot$ Düsendurchmesser an. Es ist plausibel, dass man nicht durch Verlängerung der Düse allein die Strangaufweitung in großem Maße verstärken kann.

3.3 Variation der Viskosität

Bild 9 zeigt die Änderung der Strangaufweitung bei Variation der Viskosität. Es zeigt sich, dass mit sinkender Viskosität die Strangaufweitung wegen der dann leichteren Verformbarkeit des Strangs zunimmt. Das ist jedoch kein Weg, den Effekt der Strangaufweitung in verfahrenstechnisch sinnvoller Weise zu vergrößern weil sich einerseits mit sinkender Viskosität auch die Strangeinschnürung vergrößern würde und andererseits die Bandbreite der für gute Formgebung nutzbaren Viskosität nur klein ist. In Richtung steigender Viskosität nimmt die Strangaufweitung wegen der dann schlechteren Verformbarkeit des Strangs bei sonst gleichen Bedingungen ab. Daher war bei [1] ein sehr hoher Pressdruck notwendig, um bei einer Viskosität von ungefähr 10^7 Pa s die geplante Durchflussmenge zu erreichen.

3.4 Variation der Randtemperatur in der Düse

In der Mehrzahl der Fälle wird ein nicht beheizbarer Tropftring verwendet. Dann ist die Randtemperatur des Glases in der Düse niedriger als in der Mittelachse. Auch dies hat einen Einfluss auf die Größe der maximal möglichen Strangaufweitung. Dazu wird ein Beispiel betrachtet:

Bei Borosilicatglas 3.3 im Bereich um den Einsinkpunkt (1000 Pa s) von ca. 1260 °C ändert sich die Viskosität bei Temperaturänderung um 20 K um den Faktor $1,27$, bei Temperaturänderung um 40 K um den Faktor $1,61$, bei Temperaturänderung um 60 K um den Faktor $2,02$. Wenn das Glas am Rand der Düse kälter als in der Mitte ist, dann muss ein höherer Druck angewendet werden um den gleichen Durchsatz wie bei isothermen Bedingungen zu erreichen. Die viskose Reibung und die Haftung des Glases an der kälteren Düsenwand ist größer. Daraus folgt, dass ab der Unterkante der Düse in diesem Falle ein höherer Aufweitungsdruk gegeben ist.

Also ist die erreichbare Strangaufweitung umso größer, je höher die Temperaturdifferenz zwischen dem heißeren Kernglas in der Mittelachse und dem Glas nahe der Wandung der Düse ist. Diese Vergrößerung kann gegenüber dem Fall isothermer Bedingungen in der Düse mit einem Faktor größer als 1 beschrieben werden. Dieser Faktor wird durch die eben genannten Viskositätsunterschiede bestimmt. Im umgekehrten Falle, wenn bei einer stark beheizten Düse das Kernglas kälter als das Randglas ist, wird die Strangaufweitung kleiner.

3.5 Einbeziehung der Wirkung des Eigengewichts

Ohne Berücksichtigung des Eigengewichts des Glasstrangs wurde für

- Düsenradius $R_1 = 30 \text{ mm}$, Düsenlänge $L_1 = 90 \text{ mm}$ und Viskosität 250 Pa s
- bei einer Länge des freien Strangs bis $2 \cdot R_1$ ab der Düse

eine Strangaufweitung um den Faktor $1,16$ berechnet. Damit wurde der reine Effekt der Strangaufweitung näherungsweise ermittelt. Um zu realen Bedingungen mit Einbeziehung der Schwerkraft zurückzukommen wurde diese nachfolgend mit in die Berechnung einbezogen:

- ⇒ Wenn man die Tropfenlänge auf $L_4 = 1,2 \cdot R_1$ begrenzt, dann ergibt sich eine Vergrößerung des Strangdurchmessers (unter Einbeziehung der Schwerkraft) noch um den Faktor $1,05$.
- ⇒ Bei Tropfenlängen größer als das $1,4$ -fache des Düsenradius überwiegt im Beispiel die Einschnürung an der Unterkante der Düse die Aufweitung.

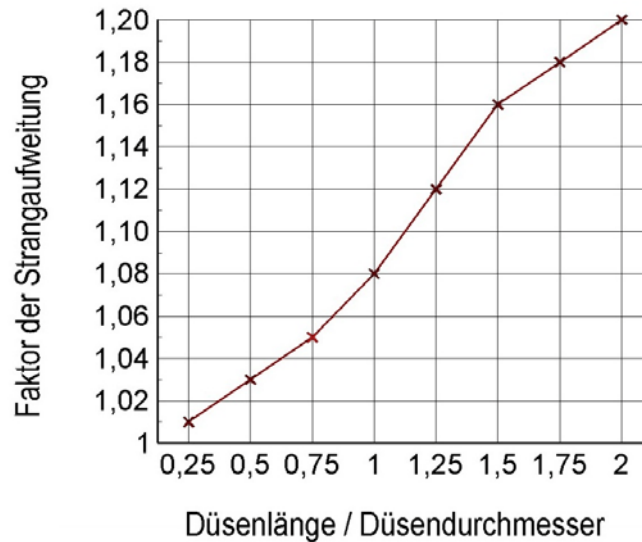


Bild 8: Strangaufweitung in Abhängigkeit vom Verhältnis Düsenlänge / Düsendurchmesser.

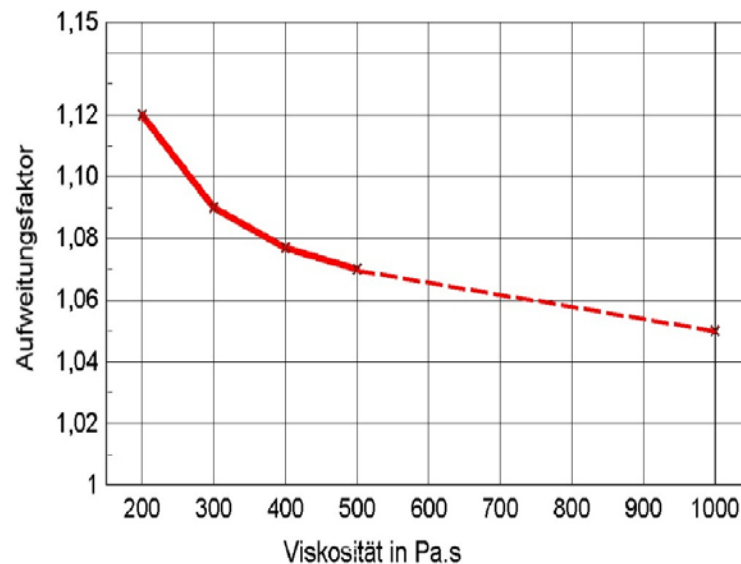


Bild 9: Strangaufweitung als Funktion der Viskosität.

Man muss im Gedächtnis behalten, dass es bei gleicher Masse ohne Strangaufweitung noch längere Tropfen geben würde.

4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Voraussetzungen für das Auftreten einer Strangaufweitung sind:

- a) Wandhaftung der in der Düse fließenden Schmelze tritt auf.
- b) Die Düsenlänge ist ausreichend groß in Relation zum Düsenradius.
- c) Die Viskosität ist so, dass die Schmelze noch leicht verformbar ist.

Aus den Berechnungen ergeben sich die folgenden Eigenschaften der Strangaufweitung:

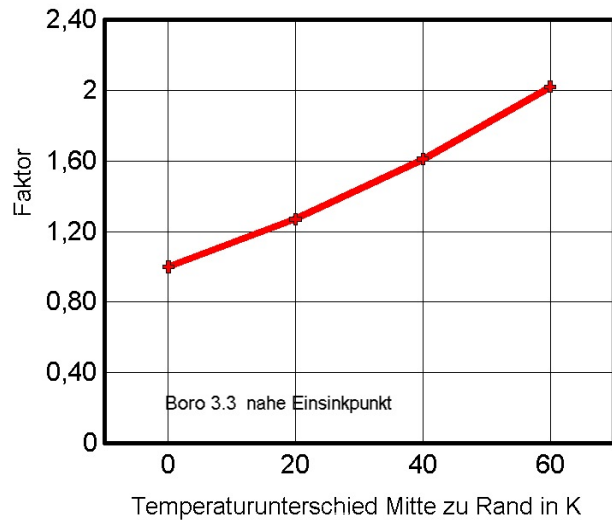


Bild 10: Viskositätsänderung bei Temperaturänderung.

- Die Strangaufweitung kann mit der Erhöhung der Plungersenkgeschwindigkeit nicht vergrößert werden.
- Bei kälterem Randglas, wie z.B. bei einem unbeheizten Tropfring vergrößert sich die mögliche Strangaufweitung.
- Die erreichbare Strangaufweitung ist umso geringer, je kürzer die Düse im Verhältnis zu ihrem Durchmesser ist.

Je länger der gerade gebildete und noch herausgedrückte Tropfen sich bis zum Schnitt unter dem Einfluss des Eigengewichts verlängern und einschnüren kann, um so mehr wird die Einschnürung die vorher erfolgte Strangaufweitung kompensieren oder schließlich überkompensieren. Als Gegenmaßnahme kommen sowohl die geeignete Gestaltung der Geometrie des Tropfrings und des Plungers als auch die kurzzeitige Erhöhung der Plungersenkgeschwindigkeit infrage (Form der Plungerkurve). Wenn der Ringspalt zwischen der Innenwand des Tropfrings und dem Unterteil des Plungers beim planmäßigen Senken des Plungers in der Tropfenbildungsphase in ausreichendem Maße nach unten enger wird, dann wird in diesem kurzen Zeitabschnitt das Ausstoßen von Glasmasse beschleunigt. Dies ergibt tendenziell die gleiche Wirkung wie wenn man bei konstanten Maßen des Ringspalts (im Verlaufe des Absenkens) die Plungergeschwindigkeit erhöht.

Die bewusste Ausnutzung der Strangaufweitung kann also, ergänzt durch andere Maßnahmen zur Beeinflussung der Dosiercharakteristik, zur Senkung des Längen-Durchmesser-Verhältnisses des Glastropfens beitragen und die Zahl von Vorversuchen an der Produktionsanlage bei Einführung neuer Produkte senken.

5. Literatur

- [1] Roeder, E., Achten, N.; Das Düsenschwellphänomen - Eine Erscheinung beim Strangpressen von Glasschmelzen; Glast. Ber. 54 (1981) 5, S. 131-135
- [2] Nickell, R.E., Tanner, R.J.; Caswell, B.; The solution of viscous incompressible jet and free-surface flows using finite element methods; J. Fluid Mech. 65 (1974), S. 189-206