

HVG-Mitteilung Nr. 2063

Berechnungen zur Dimensionierung von Plungerzelle und Speiserkopf

F. Reeßing, Physikalisch - Technische Beratung, Ilmenau

E. Schötz, EGLASS MACHINERY & PARTS GmbH, Ilmenau

Vortrag auf der DGG - Jahrestagung am 9.6.2004 in Nürnberg

1. Einleitung

Die Tropfenbildung für die Hohlglasformung kann in zwei Phasen eingeteilt werden:

- a) Ausstoßen des Tropfens mit gewünschter Masse und Länge bis zum Schnitt und
- b) Heben des Plungers zur Vorbereitung der nächsten Ausstoßphase.

Solange an einer bestehenden Anlage das gleiche Sortiment produziert wird, kann man auf bestehende Erfahrungen mit Plungerhubkurven und Tropfringen zurückgreifen.

Diese Erfahrungen reichen oft nicht aus, wenn das Sortiment oder die Viskositätskurve des Glases erheblich geändert wird. Dann sind orientierende Berechnungen zur Einsparung von Versuchen an der Produktionsanlage hilfreich. Mit der nachfolgend dargestellten Berechnungsmethode kann u.a. geprüft werden, ob unter den geplanten Bedingungen die Erzielung einer bestimmten Tropfenmasse bei vorgegebenem Verhältnis von Länge zu Durchmesser möglich ist.

2. Geschwindigkeitsverteilung im Ringspalt beim Senken des Plungers

Für eine Plungerzelle oder einen Speiserkopf kann man die Geschwindigkeitsverteilung im Spalt zwischen Plunger und Innenwand sowie im Tropfring berechnen.

Bild 1 zeigt schematisch den Ringspalt einer Plungerzelle. Neben der Geometrie müssen die Schnitzzahl, der Plungerhub, die Viskosität und die Dichte des Glases und die sonstigen Bedingungen für die Strömung angegeben werden. Für die Berechnung genügt wegen der axialen Symmetrie die Betrachtung einer Hälfte der Anordnung. Im Ergebnis kann man die Geschwindigkeitsverteilung im Ringspalt und Tropfring, beginnend vom Einlaufbereich bis zur Unterkante der Düse des Tropfrings erhalten. Bild 2 zeigt beispielhaft die vertikale Geschwindigkeitskomponente. Sie hat ihr Maximum in der Mitte der Düse und dominiert gegenüber der radialen Komponente. Die Ergebnisse dieser Berechnungen enthalten mehr Information, als für die betriebliche Praxis meist benötigt wird. Das hier angestrebte vereinfachte Rechenverfahren soll im Ergebnis aussagen, welche Tropfringgeometrie und welche Senkgeschwindigkeit des Plungers für den geplanten konkreten Einsatzfall geeignet ist. Im Falle einer zu konzipierenden neuen Anlage, die deutlich von den bisherigen Betriebsbedingungen (Tropfenmasse, Schnitzzahl, Plungerhubkurve, Ringspaltgeometrie u.a.) abweicht, können mit Hilfe dieser Berechnungen ungeeignete geometrische Lösungen im Vorfeld ausgeschlossen werden.

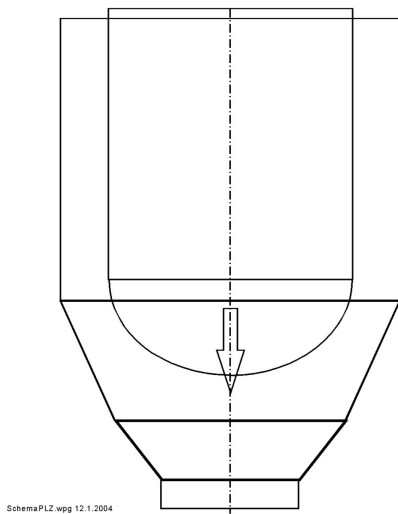


Bild 1: Schema einer Plungerzelle mit Strömungsquerschnitten.

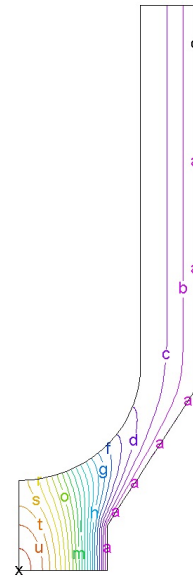


Bild 2: Vertikale Geschwindigkeitskomponente.

3. Beispielrechnungen

3.1 Eingabedaten

Benötigt werden die geometrischen Randbedingungen für die Strömung mit den Maßen von Zelle, Plunger, Konus und Düse einschließlich Plungerposition, die Glaseigenschaften mit Viskosität und Dichte und die Plungerhubkurve.

3.2 Abhängigkeit der Tropfenmasse vom Düsendurchmesser

Für die gemäß 3.1 eingegebenen Bedingungen wurde der Düsendurchmesser variiert und die sich für 0,1 s Plungersenkungen mit 200 mm/s ergebende Tropfenmasse berechnet. Bild 3 zeigt das Verhältnis von Länge zu Durchmesser (L/D) und die Tropfenmasse für einen Zeitschritt von 0,1 s als Funktion des Düsendurchmessers. Die Tropfenmasse zeigt einen stetigen Anstieg mit dem Düsendurchmesser. Oberhalb von 50 mm Durchmesser sind Erhöhungen der Tropfenmasse vor allem durch Änderung von Spaltbreite bzw. Plungergröße, weniger durch Vergrößerung des Düsendurchmessers erreichbar. Die darüber liegende Kurve zeigt den Abfall des Verhältnisses von Tropfenlänge zu Tropfendurchmesser mit dem Düsendurchmesser.

Da nach dem Verlassen der Unterkante der Düse der Tropfen sich unter dem Eigengewicht einschnürt und verlängert wird in einem ersten Schritt dieser Einfluss pauschal berücksichtigt durch Anwendung eines empirischen Verlängerungsfaktors. Dieser empirische Verlängerungsfaktor VLF muss entweder aus Beobachtungen aus dem Anlagenbetrieb oder durch zusätzliche Berechnungen ermittelt werden. Er sinkt mit der Viskosität und steigt mit der Dosierzeit stärker als linear an und wurde im Beispiel für 0,1 s Zeit auf $VLF = 1,33$ abgeschätzt.

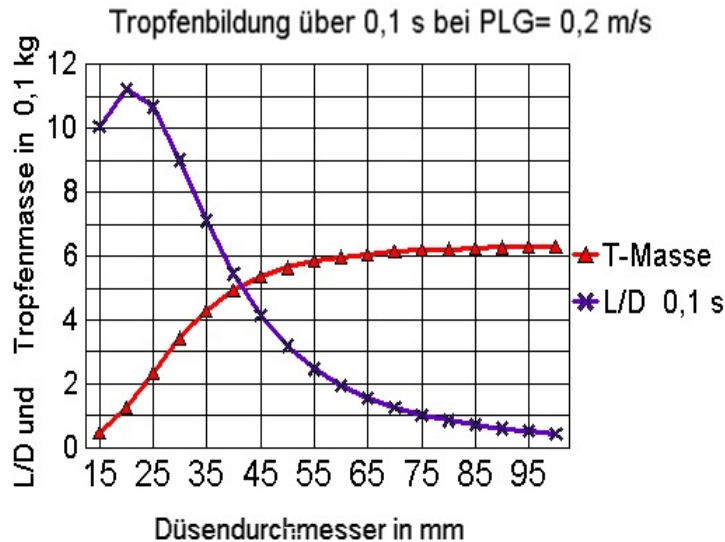


Bild 3: Zusammenhang zwischen Länge/Durchmesserverhältnis und Tropfengewicht.

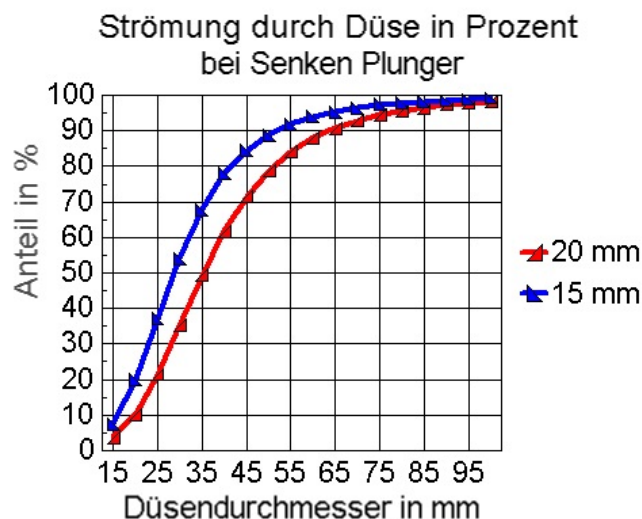


Bild 4: Tropfenmasse bei vorgegebener Tropfenlänge.

Man kann weiter abschätzen, wie sich die Tropfenmasse und Tropfenlänge auch bei bis zu ca. 0,2 ... 0,3 s Dosierzeit entwickeln. Bild 4 zeigt den berechneten Verlauf der Tropfenmasse bei Einhaltung einer als Beispiel angenommenen Nebenforderung: Tropfenlänge nicht größer als 2,5 mal Tropfendurchmesser.

Die obere Kurve mit VLF = 1,33 ist nur bis zu Dosierzeiten unter 0,2 s anwendbar, in diesem Falle also bis zu Düsendurchmessern von ca. 70 mm bzw. bis zu Tropfenmassen von ca. 1 kg. Für Dosierzeiten bis 0,3 s bzw. für die größeren Düsendurchmesser ist die untere Kurve zu verwenden. Die Beispielrechnung zeigt, dass für Tropfenmassen über 1,8 kg bei Einhaltung $L/D \leq 2,5$ eine höhere Senkgeschwindigkeit des Plungers als die hier angenommenen 0,2 m/s notwendig ist. Auch dieser Fall mit z.B. 0,3 m/s kann mit der gleichen Software berechnet und geprüft werden, um eine besser gesicherte Anlagendimensionierung zu ermöglichen.

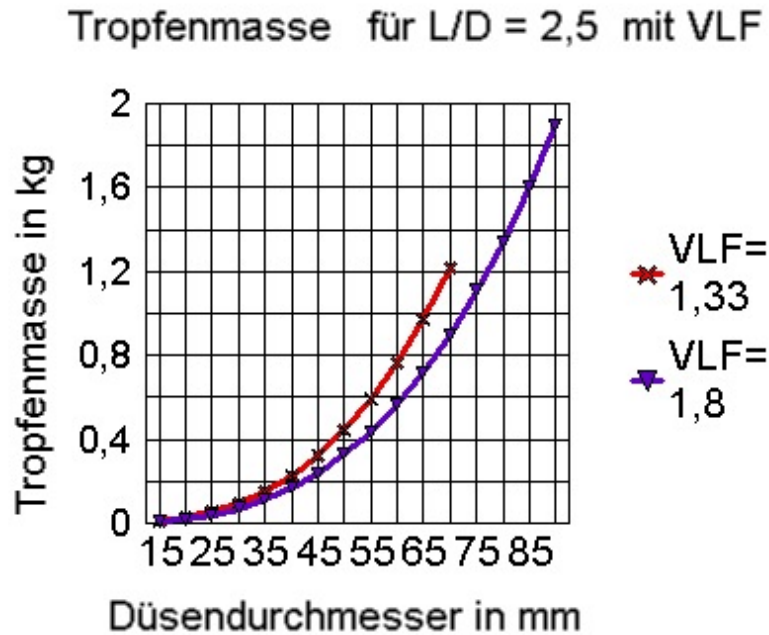


Bild 5: Anteil verdrängten Glases.

Bild 5 zeigt an, wieviel Prozent des vom Plunger beim Senken verdrängten Glases bei Spaltbreiten zwischen Plunger und Wand von 15 mm und 20 mm durch Tropfring und Düse fließt. Von kleinen Düsendurchmessern ausgehend steigt die Kurve schnell, danach immer langsamer an. Dies spiegelt die Verhältnisse der Strömungswiderstände im Ringspalt oben und im Tropfring unten wider.

3.3 Zum Einfluss der Ringspaltbreite

Im nächsten Rechenbeispiel wird die radiale Breite des Ringspalts zwischen Plunger und Zellenwand von 15 mm auf 20 mm erhöht. Es ergibt sich dann:

Durchmesser Zelle innen: 150 mm

Durchmesser Plunger außen: 110 mm

Bild 6 zeigt die Abhängigkeit der Tropfenmasse und des Längen/Durchmesser-Verhältnisses vom Düsendurchmesser. Im Unterschied zum vorigen Beispiel ergibt sich

a) eine Senkung der maximal erreichbaren Tropfenmasse um 30% (100mm-Düse) und

b) eine Senkung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit durch die Düse um 65%.

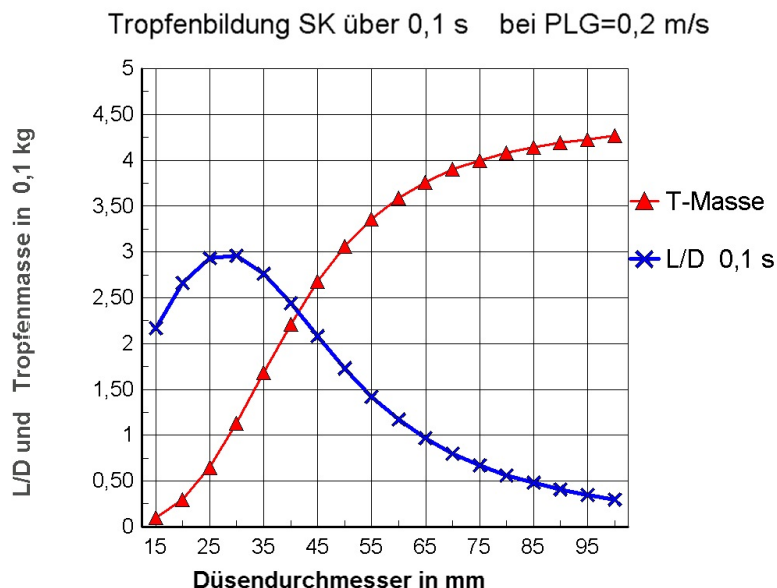


Bild 6: Abhängigkeit der Tropfenmasse und des Längen/Durchmesser-Verhältnisses vom Düsendurchmesser.

4. Zur Hubphase des Plungers mit zylindrischer Geometrie

4.1 Einfluss der Hubgeschwindigkeit

Durch die Schnitzzahl ist die Zeit für das Anheben des Plungers weitgehend festgelegt und in Verbindung mit dem Hub auch die Geschwindigkeit. Bild 7 zeigt eine Plungerkurve mit schnellem Senken des Plungers beim Ausstoßen des Tropfens.

Die Berechnungen ermöglichen also auch Vorhersagen zum Verhalten der Glasmasse bei verschiedenen Ringspaltgeometrien, Viskositäten und Hubgeschwindigkeiten des Plungers, um das "Halten" zu ermöglichen ohne Luft einzuziehen. Bild 8 zeigt die berechnete Geschwindigkeitsverteilung $v(r)$ im Ringspalt für den Fall einer festen Viskosität von 400 Pas und verschiedener Plungergeschwindigkeiten. Bei 2 mm/s Hubgeschwindigkeit und 15 mm Spaltbreite gibt es noch eine Abwärtsströmung des Glases, wie es die untere Kurve anzeigt. Sie kann bei mehr als 6 mm/s (siehe obere Kurve) gestoppt werden.

4.2 Einfluss der Viskosität

Das Bild 9 zeigt den Einfluss der Viskosität auf die Bewegung des Glases im Ringspalt bei fester Hubgeschwindigkeit des Plungers von 6 mm/s. Bei 500 Pas (obere Kurve) wird eine Abwärtsströmung verhindert, bei 300 Pas (untere Kurve) nicht.

Die Viskosität wurde in diesen Beispielen als konstant angenommen. Wenn man z.B. die Wärmeverluste im Bereich des Tropfrings berücksichtigen will, dann kann man dies tun, indem für den Bereich Tropferring oder die Düse allein, je nach Sachverhalt, mit einer anderen, höheren Viskosität gerechnet wird.

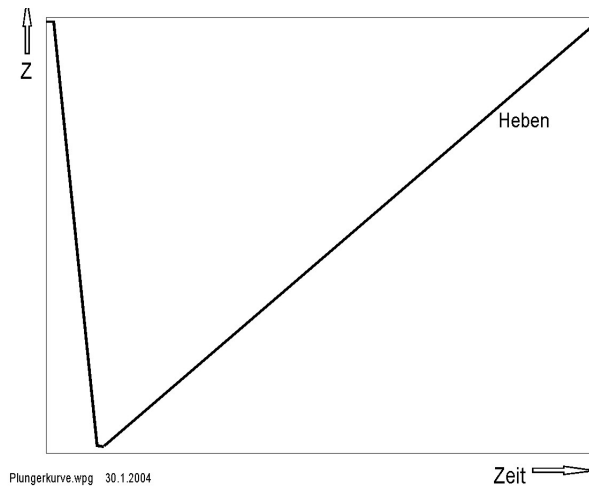


Bild 7: Plungerhubkurve.

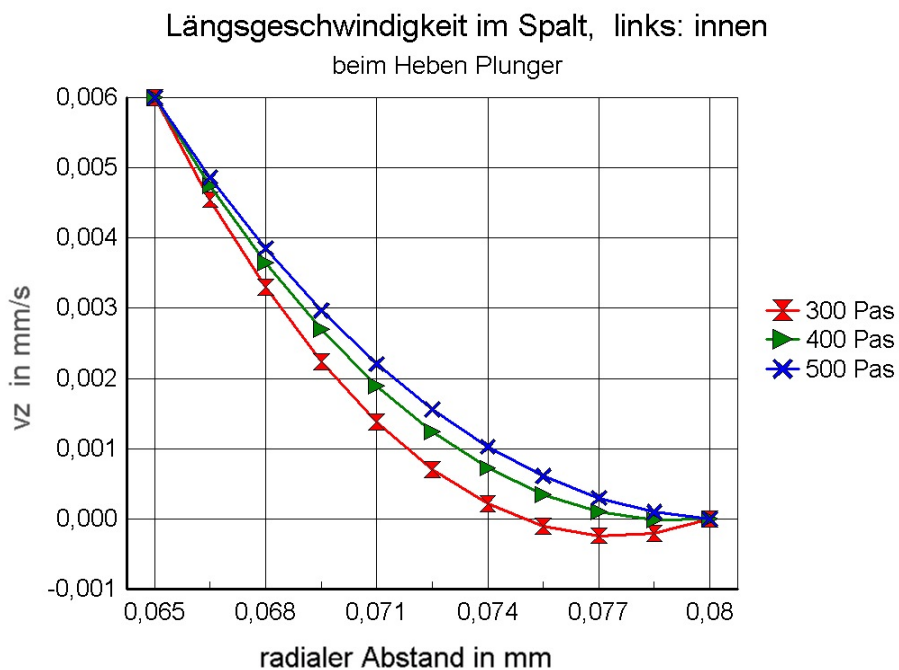


Bild 8: Längsgeschwindigkeit im Spalt beim Heben eines Plungers.

5. Schraubenplunger

Bei einem Schraubenplunger ist die Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes im Spalt zwischen dem Plunger infolge der Schraubengänge komplizierter. Bild 10 zeigt schematisch ein Trapezzgewinde und Bild 11 den Ringspalt zwischen der Plungerschraube und der Zellenwand im Schnitt. Solange es eine Vertikalbewegung des Schraubenplungers gibt ist diese in der Regel aufgrund ihrer höheren Geschwindigkeit der dominierende Einfluss gegenüber dem Einfluss der Rotation der Schraube. Der Einfluss der Vertikalbewegung des Plungers wurde bereits untersucht. Nachfolgend soll die Wirkung der Schraubenrotation allein auf die Bewegung der Glasmasse im Ringspalt zwischen Schraube und Zellenwand geprüft werden.

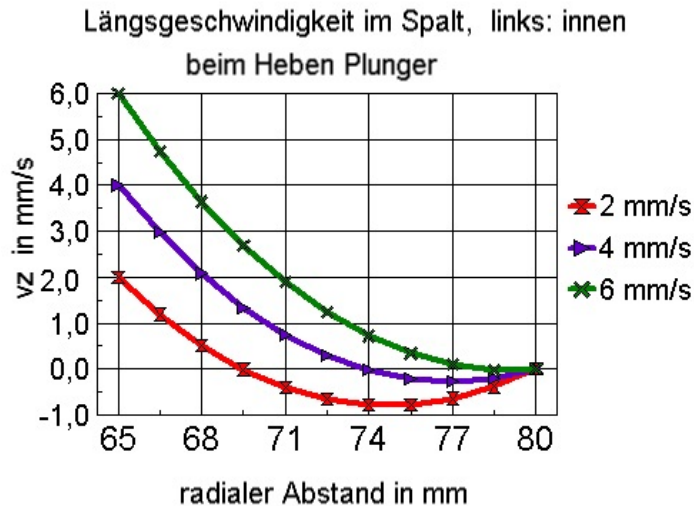


Bild 9: Einfluss der Viskosität auf die Bewegung des Glases im Ringspalt.

Im nächsten Beispiel wird angenommen, dass der Plunger keine unmittelbare Vertikalbewegung ausführt und nur durch die Rotation der Schraube eine Einwirkung auf das Glas in diesem Bereich erfolgt. Man begibt sich auf den Standpunkt des Beobachters im rotierenden Koordinatensystem. Dann kann die Wirkung der Rotation der Schraube durch eine vertikale Bewegung beschrieben werden.

Bei fehlender linearer Vertikalbewegung des rotierenden Schraubenplungers gilt:

a) Fall: kleiner Düsendurchmesser

Man kann in Einklang mit Beobachtungen an technischen Anlagen feststellen, dass bei engem Ringspalt und gleichzeitig kleinem Düsendurchmesser ein Halten der Glasmasse allein durch Rotation des Schraubenplungers möglich sein kann.

b) Fall: mittlerer und großer Düsendurchmesser

Während im konischen Teil des Ringspalts unterhalb der Schraube bei deren Rotation höchstens noch eine schwache Sogwirkung möglich ist, wird spätestens im Bereich der Düse das Gewicht der Glasmasse dominieren und zum Ausströmen nach unten führen. Dann ist ein Halten der Glasmasse im Orifice trotz Oberflächenspannung nur bei zusätzlicher linearer Vertikalbewegung des Plungers möglich. Die Vertikalbewegung des Plungers zum Wiedererreichen der Ausgangsposition ist ohnehin notwendig und gehört zum normalen Betrieb.

Mit diesem Beispiel soll gezeigt werden, dass man bei Rotation der Schraube eine zusätzliche Einflussgröße besitzt, welche weitere Spielräume zusätzlich zur normalen linearen Hubbewegung des Plungers schafft. Bestimmte Tropfenmassen in Verbindung mit bestimmten Schnittzahlen werden erst mit der zusätzlichen Einflussgröße Plungerdrehzahl möglich.

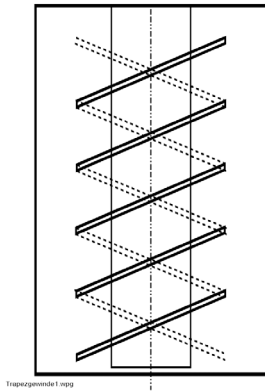


Bild 10: Schema eines Trapezgewindes.

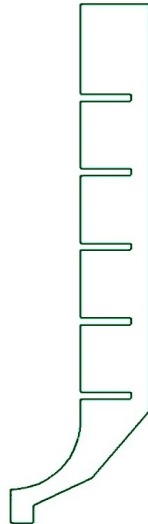


Bild 11: Ringspalt zwischen Plungerschraube und Zellenwand.

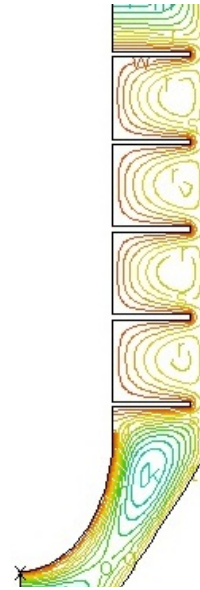


Bild 12: Vertikalgeschwindigkeit im Ringspalt zwischen Plungerschraube und Zellenwand.

Bild 12 zeigt den Ringspalt zwischen Plungerschraube und Zellenwand mit Isolinien gleicher Vertikalgeschwindigkeit der Glasmasse. Nahe an der Schraubenwendel ist ihre Wirkung markant, bereits bei Abständen über 5 mm davon geht der Einfluss der Plungerrotation auf die Bewegung der Glasmasse deutlich zurück. Nur im Falle eines engen Ringspalts zwischen Plunger und Wand einerseits und bei einem gleichzeitig genügend kleinen Düsendurchmesser (Tropfring) ist es möglich, allein mit der Rotation der Schraube die Glasmasse im Tropfring zu halten. Bei sehr engem Ringspalt, kleinem Düsendurchmesser und schneller Rotation der Schraube kann diese sogar imstande sein, unerwünschterweise Glas und gleichzeitig Luft in den Tropfring einzuziehen. Deshalb empfiehlt es sich nicht, den Ringspalt sehr eng zu machen. Ein weiterer Grund zu dieser Empfehlung besteht in der größeren Gefahr, dass bei leicht unrundem Lauf der Plungerschraube (radiale Abweichung $> 0,2 \dots 0,4$ mm, abhängig von der Gesamtlänge des Plungers) zusätzliche Tropfenmasseschwankungen verursacht werden können. Je größer die axiale Länge der Schraube des Plungers und je größer seine Gesamtlänge ist, um so mehr muss dieser Punkt beachtet werden.