

Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Rührwerken in Speiserkanälen

Von Eckart Conze und Günther Woelk, Aachen

(Vortrag auf der 54. Glastechnischen Tagung am 14. Mai 1980 in Aachen)

(Mitteilung aus dem Lehrgebiet für Industrieofenbau und Wärmetechnik im Hüttenwesen der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen)

(Eingegangen am 21. April 1980)

Eines der wesentlichen Probleme der Hohlglashersteller ist die Erzeugung eines im Gewicht konstanten und in der Temperatur homogenen Tropfens. Voraussetzung für die Gewichtskonstanz ist eine stabile, homogene Temperaturverteilung über den gesamten Querschnitt im Speiserkopf. Da diese Homogenität nicht allein durch Heizen oder Kühlen an der Badoberfläche erreicht werden kann, werden vielfach mechanische Mehrfachrührwerke eingesetzt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Strömungsbilder dreier Rührer analysiert. Die Strömungen vor und hinter einem im Speiserkanal eingebauten Zwillingrührwerk werden auf ihre Beeinflussbarkeit durch diese Rührwerke hin untersucht. Gesondert betrachtet wird die Strömung im Speiserkopf zwischen Rührwerk und Plunger. Der Einfluß des Plungers auf diese Strömung wird nachgewiesen.

Experimental investigations of the use of stirrers in forehearth

The production of gobs of constant weight and homogeneous temperature is an important problem in container manufacture. A requirement for constant weight is a stable uniform temperature distribution over the whole of the cross section of the nose of the forehearth. Because such uniformity cannot be achieved only by heating or cooling from the surface of the glass many types of complex mechanical stirrers are used.

In this work the flow patterns of three different stirrers are analyzed. The effects of a twin stirrer in the forehearth channel on the flows both in front of and behind it were investigated. The flow in the nose of the forehearth between stirrer and plunger is examined separately and the influence of the plunger on this flow is confirmed.

Essais portant sur l'utilisation d'agitateurs dans les canaux de distribution

L'obtention d'une paraison à poids constant et à température homogène est l'une des principales préoccupations des fabricants de verre creux. Une température uniforme et constante à travers toute la section du distributeur est une condition nécessaire pour l'obtention d'un poids constant. Etant donné qu'il est impossible d'obtenir cette température homogène uniquement par chauffage et refroidissement de la surface du bain, on a souvent utilisé des ensembles d'agitateurs mécaniques.

Ce travail avait pour but d'analyser les configurations de courants provoquées par trois agitateurs. A cet effet, on a étudié l'influence d'un agitateur double placé dans le canal de distribution, sur les courants en amont et en aval du canal. De plus, on a étudié séparément les courants dans le distributeur entre l'agitateur et le poinçon. On a réussi à mettre en évidence l'influence du poinçon sur ce courant.

1. Einleitung

Eines der wesentlichen Probleme der Hohlglashersteller ist es, am Ende des Speiserkanals einen Tropfen von stets gleichem Gewicht und gleicher Temperaturverteilung zu erzeugen. Eine Voraussetzung dafür ist, daß man in der Schmelze im Speiser eine möglichst stabile und homogene Temperaturverteilung schafft. Auf Grund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Glases ist dies nur in Ausnahmefällen durch Heizen oder Kühlen von der Badoberfläche her möglich. In den meisten Fällen werden zusätzlich mechanische Rührwerke [1 und 2] zur thermischen Konditionierung eingesetzt [3]. Welchen Einfluß diese Rührwerke auf die Strömung in Speiserkanälen haben, ist Gegenstand dieser Untersuchung.

Für die Experimente stand das Modell eines Speisers der Fa. Schott & Gen., Mainz, im Maßstab 1 : 5,5 zur Verfügung, das u. a. der Untersuchung eines Prozeßführungssystems diente [4 bis 6]. Beim

Bau dieses Modells wurde auf größtmögliche geometrische Ähnlichkeit besonderer Wert gelegt. Um optimale Beobachtbarkeit zu schaffen, wurde das gesamte Speisermodell aus Makrolon, einem durchsichtigen Polycarbonat, gebaut. Die Modellflüssigkeit, ein Silikonöl AK 500000, konnte in einem Vorratsbehälter temperiert werden und floß dann durch einen kurzen Einlauf in den Speiserkanal. Dieser war in acht Zonen unterteilt, die unabhängig voneinander mit Heiß- oder Kaltluft beaufschlagt werden konnten. Die Anzahl und Anordnung der Heiß- und Kaltluftdüsen entsprachen der der Brenner- und Kaltluftanschlüsse im Original.

2. Ähnlichkeitstheoretische Grundlagen

Neben den rein geometrischen Gegebenheiten wurde auch im Rahmen der Modelltheorie [7 bis 9] auf möglichst gute Übertragbarkeit geachtet. Mit der Voraussetzung, daß der Modellstoff eine Newtonsche

Flüssigkeit ist, erhält man folgende Liste der Einflußgrößen:

h	=	Badhöhe
ν	=	kinematische Viskosität
\bar{v}	=	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
λ	=	Wärmeleitfähigkeit
α	=	Wärmeübergangskoeffizient
ρ	=	Dichte
$\Delta\rho/\Delta\vartheta$	=	Dichteänderung
$\Delta\vartheta$	=	Temperaturdifferenz
g	=	Erdbeschleunigung
c	=	spezifische Wärmekapazität

Nach dem Buckingham'schen Theorem ergeben sich bei zehn Einflußgrößen und vier Grunddimensionen – M = Masse, L = Länge, t = Zeit, ϑ = Temperatur – sechs Kennzahlen. Bei geeigneter Wahl der freien Exponenten und nach Umformung erhält man:

$$\frac{\bar{v} h}{\nu} \quad \text{Reynoldszahl} \quad (\text{Re});$$

$$\frac{\alpha h}{\lambda} \quad \text{Nusseltzahl} \quad (\text{Nu});$$

$$\frac{\bar{v} \nu}{h^2 g} \quad \text{Stokeszahl} \quad (\text{Sto});$$

$$\frac{h \bar{v}}{a} \quad \text{Pecletzahl} \quad (\text{Pe});$$

$$\frac{\beta h^3 g \Delta\vartheta}{a \nu} \quad \text{Rayleighzahl} \quad (\text{Ra});$$

$$\frac{c h^2 \Delta\vartheta}{\nu^2} \quad \Pi_6^{(1)};$$

$$\text{mit} \quad a = \frac{\lambda}{c \rho}; \quad \beta = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\Delta\rho}{\Delta\vartheta}.$$

Die Strömung im Speiser kann als schleichend und inkompressibel angenommen werden. Daher können die Trägheitskräfte gegenüber den Viskositätskräften vernachlässigt werden. Bei Strömungen unter Einfluß von Viskositäts- und Schwerkraften wird die kinematische Ähnlichkeit durch die Stokeszahl beschrieben:

$$\text{Sto} = \frac{\bar{v} \nu}{h^2 g}. \quad (1)$$

Neben der kinematischen Ähnlichkeit muß für nicht isotherme Vorgänge noch die thermische Ähnlichkeit berücksichtigt werden. Dies geschieht durch die Pecletzahl,

$$\text{Pe} = \frac{h \bar{v}}{a}, \quad (2)$$

¹⁾ Diese 6. Kennzahl ist nach Wissen der Autoren noch nicht benannt.

die das Verhältnis des konvektiven zum diffusiven Wärmestrom wiedergibt.

Ein gleichzeitiges Einhalten von Stokes- und Pecletzahl im Modellversuch wäre nicht möglich, wenn mit einer Variation der Strömungsgeschwindigkeit v_H in der Hauptausführung gerechnet werden müßte, weil das Verhältnis der Geschwindigkeit im Modell zur Geschwindigkeit in der Hauptausführung v_M/v_H bei beiden Kennzahlen von unterschiedlichen Potenzen des Maßstabsfaktors h_H/h_M abhängt. Beschränkt man sich jedoch auf einen konstanten Wert der Strömungsgeschwindigkeit v_H , können bei geeigneter Wahl der Stoffgrößen der Modellflüssigkeit beide Kennzahlen eingehalten werden. Die Bedingung für die Stoffgrößen erhält man, indem man v durch Quotientenbildung eliminiert.

$$\left(\frac{\text{Sto}}{\text{Pe}}\right)_H = \left(\frac{\text{Sto}}{\text{Pe}}\right)_M, \quad (3)$$

$$\frac{a_H \nu_H}{h_H^3 g} = \frac{a_M \nu_M}{h_M^3 g}.$$

Aus fertigungstechnischen Gründen wird der geometrische Maßstab auf $\lambda = h_H/h_M = 5,5$ festgelegt, und man erhält:

$$a_H \nu_H = \lambda^3 a_M \nu_M. \quad (4)$$

Dieser Bestimmungsgleichung genügt ein hochviskoses, synthetisches Öl auf Silikonbasis mit einer Viskosität von 490 Pa s bei 25 °C. Das Öl erfüllt zugleich folgende an die Modellflüssigkeit zu stellenden Anforderungen:

- Es muß eine Newtonsche Flüssigkeit sein.
- Die Modellflüssigkeit muß durchsichtig sein, damit die Strömung und der Einfluß von Rührern und Plunger auf die Strömung beobachtet werden können.
- Der Arbeitsbereich des Modells soll zwischen Raumtemperatur und 100 °C liegen. In diesem Temperaturintervall soll die relative Viskositätsänderung des Öls der der Glasschmelze im Betriebsintervall der Hauptausführung ähneln.

Da die beiden Stoffgrößen ν_M und a_M durch Mischen verschiedener Stoffe im Prinzip in weiten Bereichen unabhängig wählbar sind, könnte bei konstantem v_H auch die Reynoldszahl eingehalten werden. Entsprechend Gleichung (3) erhält man aus dem Quotienten

$$\left(\frac{\text{Sto}}{\text{Re}}\right)_H = \left(\frac{\text{Sto}}{\text{Re}}\right)_M, \quad (5)$$

die Bedingung: $\nu_H = \lambda^{3/2} \nu_M$.

Wählt man zusätzlich: $a_H = \lambda^{3/2} a_M$,

ist auch die Bedingung (4) erfüllt, das heißt, für konstantes v_H könnten die Kennzahlen Sto , Re und Pe gleichzeitig im Modell reproduziert werden. Bei den Versuchen wurde jedoch auf die Gleichheit der Reynoldszahlen verzichtet, weil im Bereich schleichender Strömung die Trägheitskräfte zu vernachlässigen sind.

Die Strömungsgeschwindigkeit im Modell errechnet sich aus der kinematischen Ähnlichkeit:

$$\begin{aligned} Sto_H &= Sto_M, \\ \frac{\bar{v}_H v_H}{h_H^2 g} &= \frac{\bar{v}_M v_M}{h_M^2 g}, \\ \bar{v}_M &= \bar{v}_H \cdot \frac{v_H h_M^2}{v_M h_H^2} = \bar{v}_H \cdot \frac{v_H}{v_M} \lambda^{-2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Bei einem Glasmassenstrom von 74 t/d und einem Viskositätsverhältnis von $v_H/v_M = 1,08$ ergibt sich eine mittlere Modellgeschwindigkeit von etwa $5,5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} = 3,3 \text{ mm/min}$.

Ausgehend von der kinematischen Ähnlichkeit folgt durch Einsetzen von

$$\dot{V} = A \bar{v} \quad (7)$$

in Gleichung (6) für das Volumenstromverhältnis

$$\frac{\dot{V}_M}{\dot{V}_H} = \frac{v_H}{v_M} \lambda^{-4}. \quad (8)$$

Bei 74 t/d in der Hauptausführung entspricht dies 1,6 kg/h im Modell.

Aus der Bestimmungsgleichung für die mittlere Geschwindigkeit der Modellflüssigkeit kann der Zeitmaßstab abgeleitet werden:

$$\frac{t_M}{t_H} = \frac{v_M}{v_H} \lambda. \quad (9)$$

Auf die Bestimmung der Rührerdrehzahl haben die Viskositäts- und Schwerekräfte den größten Einfluß. Als beschreibende Kennzahl ergibt sich wieder die Stokeszahl für den Rührvorgang, in der die mittlere Geschwindigkeit durch die Drehzahlen und die Badhöhe durch den Durchmesser d des Rührers ersetzt werden:

$$Sto_R = \frac{n v}{g d}. \quad (10)$$

Hieraus ergeben sich die Drehzahlen für die Modellrührer

$$\frac{n_M}{n_H} = \frac{v_H d_M}{v_M d_H} = \frac{v_H}{v_M} \lambda^{-1}. \quad (11)$$

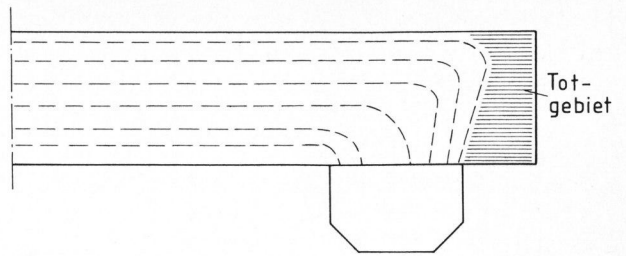


Bild 1. Schematische Darstellung von Auslauf und Totgebiet im Modell.

Die Rührer drehen also um den Faktor $1/\lambda$ langsamer als in der Hauptausführung.

Der in der Hauptausführung wesentliche Wärmetransport durch Strahlung kann im Modell nicht nachgeahmt werden. Durch Einstellung der Temperaturen an den Heiz- und Kühlflächen wurde jedoch annähernd Ähnlichkeit des Temperaturfeldes und damit der Viskositätsverteilung erreicht.

3. Strömungsform ohne Rührwerk

Unter den vorher beschriebenen modelltheoretischen Voraussetzungen wurden die Versuche im Speiserkanal gefahren. Um die generelle Veränderung beim Einsatz von Rührwerken erkennen zu können, wurden zuerst Versuche ohne Rührwerk und Plunger, dann ohne Rührwerk, aber mit Plunger gefahren.

Bei dem Versuch ohne Rührer und Plunger erhält man im isothermen Fall eine Kanalströmung mit parabelförmig ausgebildetem Geschwindigkeitsprofil. Das Geschwindigkeitsmaximum liegt in der Kanalmitte an der Badoberfläche. Das parabelförmige Geschwindigkeitsprofil bleibt über dem gesamten untersuchten Kanalabschnitt bis zur Höhe des Ausflusses erhalten, solange keine Übergänge durch Geometrieänderungen auftreten. Der Einlauf der verschiedenen Schichten in den Auslauf läßt sich genau beobachten und ist durch Temperaturunterschiede im Bad, soweit sich diese im Modell verwirklichen lassen, nicht zu beeinflussen, da die Strömungen in Speisern immer laminar sind und die Wärmeübertragung durch Leitung gering ist. Die Modellflüssigkeit, die in Flußrichtung hinter dem Ausfluß liegt, muß als strömungstote Zone angesehen werden. Eingebraachte Farbmarkierungen konnten länger als 24 h an gleichem Ort und in gleicher Größe beobachtet werden (Bild 1).

Betrachtet man das System mit eingebautem und arbeitendem Plunger, so verändert sich das Strömungsbild sowohl vor dem Plunger als auch im Auslauf gegenüber der Kanalströmung ohne Einbauten ganz wesentlich. Durch die Geometrie des Auslaufes und durch den sich im Beispiel links drehenden Plunger bildet sich ein Wirbel aus, der auf die abfließende Flüssigkeit zentrierenden Einfluß

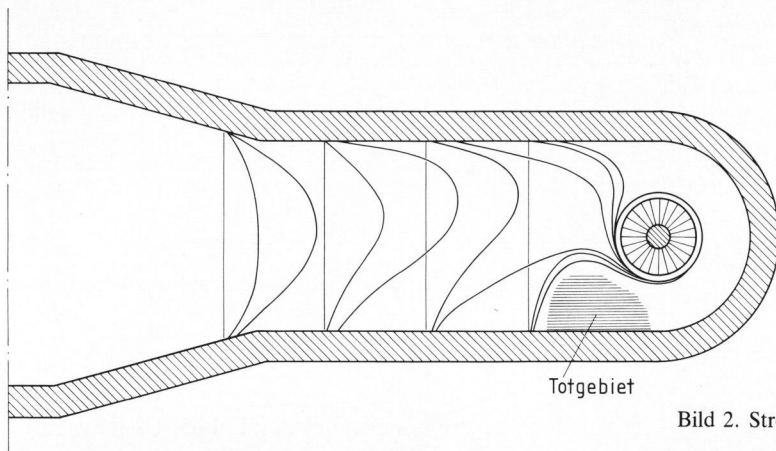


Bild 2. Strömungsbild im Speiserkopf bei drehendem Plunger.

hat. Dieser Wirbel löst auch das Totwassergebiet hinter dem Auslauf auf. Modellflüssigkeit von der Oberfläche wird spiralförmig zum Plungerschaft hin transportiert. Mit enger werdender Spirale wird die Flüssigkeit nach unten gezogen, so daß eine trichterförmige Auslaufströmung entsteht. Die Modellflüssigkeit von der Oberfläche bildet den inneren Kern dieses Trichters. Mit einigen wenigen Windungen legt sich Flüssigkeit aus tieferen Schichten um diesen Kern herum. Die Bodenflüssigkeit fließt bereits nach einer halben Windung in den Auslauf.

Die Strömung im Kanal vor dem Plunger wird ebenfalls durch die Plungerdrehung stark beeinflusst (Bild 2). An Stelle der parabelförmigen Geschwindigkeitsverteilung tritt nun eine Strömungsform mit einem deutlich außermittigen Geschwindigkeitsmaximum. Diese Verlagerung wird durch ein Abquetschen der Flüssigkeit am rechten Kanalrand bewirkt. Hierdurch werden die rechten Flüssigkeitspartikel am Einströmen in den Wirbel behindert. Es entsteht ein Gebiet mit sehr geringer Geschwindigkeit, in dem sich auch keine Nebenwirbel ausbilden. Farbspuren konnten hier etwa 15mal länger beobachtet werden als Markierungen in der Hauptströmung. Diese Strömungsform ist über die gesamte Badtiefe gleich, die Geschwindigkeit nimmt zum Boden hin ab.

Das Strömungsbild ändert sich im Prinzip nicht, wenn im Bad Temperaturdifferenzen und damit Veränderungen der Viskosität eintreten. Auch Rührwerke im üblichen Abstand vom Plunger verändern den Weg der Hauptströmung nur unwesentlich. Durch die stabile Strömung im Auslauf wird die Zusammensetzung des Tropfens aus verschiedenen Badhöhenpartien festgelegt. Der Strömungsverlauf läßt vermuten, daß Oberflächenschmelze die Tropfenmitte bildet, die weiter außen liegenden Schichten aus der Badmitte stammen und Schmelze vom Boden die Tropfenoberfläche bildet. Dies gilt nur für einen einfachen Plunger. Baut man den Plunger etwa wie einen Rührer, so zerstört man den beschriebenen Aufbau. Man erhält dann die Möglichkeit einer nochmaligen Durchmischung.

4. Strömungsformen bei verschiedenen Rührwerkseinbauten

Baut man ein Doppelrührwerk, bei dem in horizontaler Richtung beide Rührer in Strömungsrichtung nach innen fördern, in einen Kanal ein, so hat man für die vertikale Richtung die Wahl zwischen zwei Varianten: a) beide Rührer fördern in die gleiche Richtung aufwärts oder abwärts; b) ein Rührer fördert aufwärts, der andere abwärts.

Die Untersuchungen an Rührwerken mit gleicher Förderrichtung beider Rührer führte unabhängig vom eingebauten Rührertyp zu wenig befriedigenden Ergebnissen. Zwar wurden für markierte Flüssigkeitspartien, die so lagen, daß sie von den Rührern optimal eingezogen wurden, befriedigende Mischergebnisse mit der Umgebung erzielt, jedoch verschlechterte sich die Mischgüte schnell mit der Entfernung von diesem Optimalpunkt. Für die nach unten fördernden Rührer liegt die optimal einlaufende Stelle an der Badoberfläche, für die nach oben fördernden Rührer liegt sie am Badboden. Bei einem nach unten fördernden Rührwerk passiert eine markierte Flüssigkeitspartie am Badboden das Rührwerk fast völlig unvermischt.

Betrieibt man die Rührer jedoch so, daß sie in entgegengesetzter Richtung fördern, bleibt zwar das Strömungsbild des einzelnen Rührers unverändert, die Gesamtwirkung des Rührwerks wird aber erheblich verbessert. Bei einer solchen Rührwerksanordnung erhält man im Gegensatz zu gleichsinnig fördernden Rührwerken keine symmetrische Einlaufformation. Es entstehen zwei einander entgegengesetzte Strömungen. Markiert man das Bad, wie es Bild 3 zeigt, etwa 40 mm vor dem Rührwerk an der Oberfläche, so ist deutlich zu erkennen, daß der Rührer, der aufwärts fördert, so viel Flüssigkeit nach oben pumpt, daß die Markierung entgegen der Hauptströmungsrichtung zurückgedrängt wird, während der nach unten fördernde Rührer die Markierung, das heißt also die Oberflächenflüssigkeit, zügig einzieht. Das zurückgedrängte Material

fließt langsam in den abwärts fördernden Rührer ab. Die umgekehrten Verhältnisse bilden sich am Badboden. Die nach unten geförderte Flüssigkeit drängt eine entsprechende Markierung am Boden zurück, die Flüssigkeit strömt quer zur Transportrichtung in den nach oben fördernden Rührer. Markiert man das Bad in der Mitte, so erkennt man eine Teilung der markierten Flüssigkeitspartien. Der eine Teil strömt nach oben, der andere nach unten. Für beide Strömungen sind weite Spiralen charakteristisch.

Bei Versuchen mit verschiedenfarbigen Markierungen auf der Badoberfläche, in Badmitte und am Badboden konnte festgestellt werden, daß bei dieser Rührerkonfiguration ein Übergang von einem zum anderen Rührer stattfindet. Die Modellflüssigkeit wird von einem Rührer zum Boden gepumpt, fließt teilweise quer zur Transportströmung in den anderen Rührer, der sie wieder nach oben fördert. Die damit erzielte Mischgüte ist sehr gut, es konnten in der Gemischwolke, die das Rührwerk verließ, keine einzelnen Farbkomponenten unterschieden werden (Bild 4).

Betrachtet man nicht nur den unmittelbaren Einlauf, sondern auch die Strömung weiter aufwärts vor dem Rührwerk, so sieht man deutlich das Zustandekommen der Querströmung (Bild 5). Die anfänglich reine Kanalströmung wird gestört, in der Mitte entsteht ein Stau, und es wird durch die von den Rührern erzeugten Walzen Flüssigkeit von den Seiten herangeführt. Dieser Effekt ist von der Rührerform unabhängig und kann mit Zylinderrührern ebenso hervorgerufen werden wie mit beschauften Rührern. Diese Vorgänge bewirken bereits eine erhebliche Vermischung, insbesondere, weil die Flüssigkeit aus der Kanalmitte nur sehr zögernd in das Rührwerk mit eingezogen wird.

5. Strömungsverlauf zwischen Rührwerk und Plunger

Betrachtet man hinter dem Rührwerk nicht allein den Austrittsquerschnitt, sondern das gesamte Kanalstück zwischen Rührwerk und Plunger, so sind folgende Vorgänge zu erkennen: Der nach oben fördernde Rührer beschleunigt die Oberflächenschichten und bremst durch den Ansaugvorgang die Transportströmung am Boden. Für einen nach unten fördernden Rührer gilt Entgegengesetztes. Diese unterschiedlichen Beschleunigungsvorgänge beeinflussen die Strömung zwischen Rührer und Plunger anfangs ganz erheblich. Baut man das nach oben fördernde Rührwerk auf der Seite des Speiserkanals ein, auf die auch der Ansaugmechanismus des Plungers wirkt, so führt dies zu einer einseitigen Strömung im Speiserkopf. Daher sollte der Einbau so erfolgen, daß der aufwärts fördernde Rührer und die sich ausbildende Ansaugströmung in den Plunger auf entgegengesetzten Seiten des Speiserkanals liegen. Die Strömungsform in Plungernähe wird dadurch

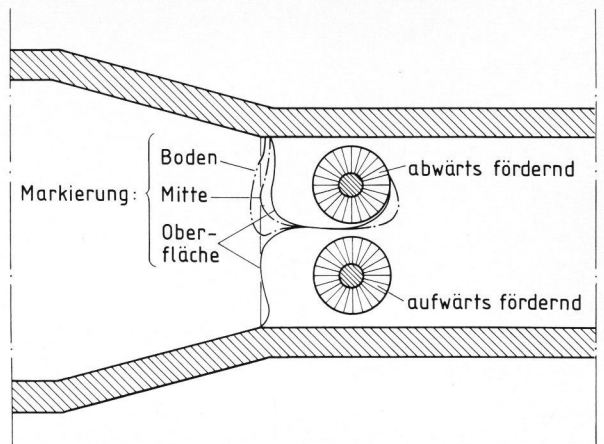


Bild 3. Einzug einer Flüssigkeitsmarkierung in ein Doppelrührwerk.

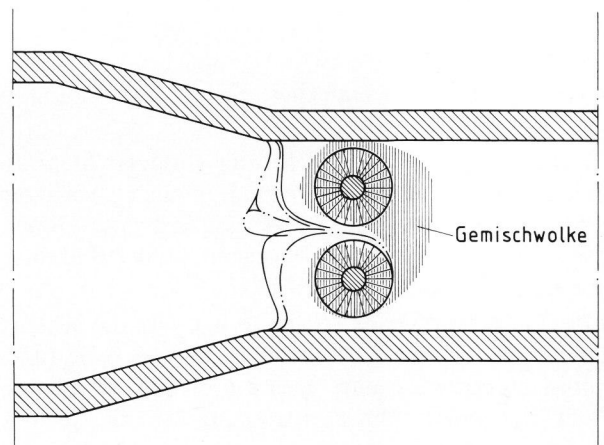


Bild 4. Flüssigkeitsmischung in einem Doppelrührwerk.

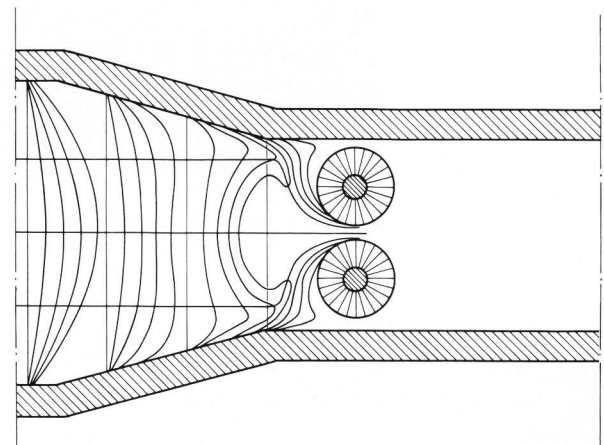


Bild 5. Querströmungen vor einem Doppelrührwerk.

nicht geändert. Es tritt aber keine einseitige Speiserkanalströmung mehr auf.

Großen Einfluß übt ein Rührwerk naturgemäß auf die Badhomogenität aus. Ohne Rührwerk hat man eine reine Schichtenströmung. Je nach Rühr-

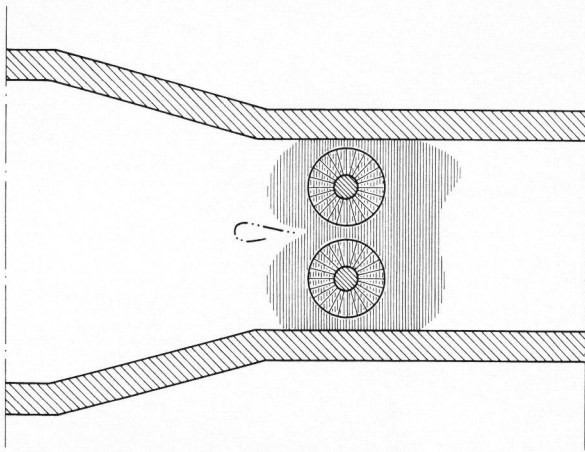


Bild 6. Homogene Gemischwolke um ein gegenförderndes Doppelrührwerk.

werkstyp verändert man diese Schichtenströmung in folgender Weise:

a) Durch gleichfördernde Rührer verlagert man die Schichten fast unzerstört von unten nach oben oder von oben nach unten. Die Flüssigkeit vom Boden wird in die Mitte und die Flüssigkeit aus der Badmitte nach oben oder unten gedrückt.

b) Bei gegenfördernden Rührwerken wird die Schichtenströmung, wie sie vor dem Rührwerk besteht, völlig zerstört. Es bildet sich hinter dem Rührwerk zwar eine neue Schichtenströmung aus, die jedoch anders zusammengesetzt ist. Eingegebene Farbmärkungen vor dem Rührwerk konnten hinter dem Rührwerk nicht mehr beobachtet werden (Bild 6). Es

erfolgt eine vollständige Umwälzung des Bades durch das Rührwerk.

Betrachtet man eingefärbte Kontrollschlieren, so ist zu erkennen, daß hinter dem Rührwerk in allen Schichten Farbpartikel aus allen Kontrollschlieren zu finden sind. Daraus erkennt man, daß eine vollständige Umwälzung des Bades durch das Rührwerk erfolgt.

6. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Funktionsweise von Doppelrührwerken in offenen Kanälen geklärt. Zur Durchführung der praktischen Versuche wurde ein geometrisch sehr genaues Modell erstellt. Untersucht wurden drei Rührertypen, eingebaut in ein Doppelrührwerk im Kanal. Zwei davon – Schrauben- und Propellerrührer – sind aus Rührwerken in Reaktoren bekannt; der dritte wurde aus einem Propellerrührer für die Anwendung bei hochviskosen Flüssigkeiten weiterentwickelt. Es zeigte sich, daß eine gute Mischwirkung nur erzielt werden konnte mit Rührwerken, die unterschiedliche Förderrichtungen hatten.

Weiterhin konnte nachgewiesen werden, daß die Strömungsform zwischen Rührwerk und Plunger von der eingesetzten Rührerform unabhängig ist. Der große Einfluß der Rührerform auf die Zusammensetzung der einzelnen Schichten steht dazu nicht im Widerspruch.

Durch die richtige Abstimmung von Förderrichtung der Rührer und Ansaugströmung des Plungers kann eine einseitige Kanalströmung zwischen Rührwerk und Speiserkopf vermieden werden.

7. Literatur

- [1] Nagata, S.: Mixing. Principles and applications. New York: Wiley 1975.
- [2] Uhl, V. W.: Mixing. Theory and practice. Vol. 1. New York, London: Academic Press 1966.
- [3] Geffcken, W.: Vorgänge der Homogenisierung in der Schmelze, Ausziehen der Schlieren, Diffusion. Glastechn. Ber. **30** (1957) S. 143–145.
- [4] Franz, E.; Fröhlich, W.; Gundrum, H. u. a.: Führung eines Glasspeisers mit einem Prozeßbrecher. Karlsruhe: Kernforschungszentrum 1978. [Ref. Glastechn. Ber. **52** (1979) 79R2046.]
- [5] Reetmeyer, H.: Entwicklung und Anwendung von Algorithmen zur Regelung eines Temperaturprofils in einem Glasspeisermodell. Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen, Dr.-Ing.-Diss. 1979.
- [6] Wilming, H.: Mathematisches Modell der Glasströmung in einem Speiserkanal als Grundlage für eine Prozeßsteuerung. Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen, Dr.-Ing.-Diss. 1979.
- [7] Pawlowski, J.: Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1971. [Ref. Glastechn. Ber. **45** (1972) R72-1070.]
- [8] Wolf, P. und Staudte, W.: Anwendung von Kennzahlen bei der Modellierung von Aggregaten der Glasindustrie. Silikat-techn. **28** (1977) S. 266–268. [Ref. Glastechn. Ber. **52** (1979) 79R0562.]
- [9] Truckenbrodt, E.: Strömungsmechanik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1968.