

# Über das Fließen von Schaum in Rohren

## Foam Flow in Pipes

In der vorliegenden Arbeit wird über eine neue Methode zur Ermittlung der Schergeschwindigkeit von Schäumen in Rohren berichtet. Dabei werden das Wandgleiten, die Kompressibilität und das nichtnewtonsche, viskoelastische Verhalten berücksichtigt.

Hier wurden erstmalig rheologische Messungen an Schäumen unter realen Druck- und Wandgleitbedingungen durchgeführt. Beim Erhöhen des Absolutdrucks fällt die Schaumviskosität ab. Bei hohen Druckwerten nimmt die Viskositätsfunktion  $\eta_{\dot{\gamma}}$  die näherungsweise die Form der Viskositätsfunktion der reinen, aufzuschäumen- den Flüssigkeit an.

### 1 Einleitung

Das Pumpen von Schäumen durch Rohrleitungen ist eine industriell vielgenutzte Transportmethode bei der Nahrungsmittelherstellung. Daher ist die in-line Rheologie eine wichtiger Qualitäts- und Steuerparameter. Im allgemeinen sind Schäume nichtnewtonsche, kompressible und viskoelastische Flüssigkeiten, die in Strömungsprozessen ein ausgeprägtes Wandgleitverhalten zeigen (z.B. in Rohrleitungen). Dennoch wurden in den Publikationen [1 bis 4] zur Schaumrheologie Schäume als newtonsche, inkompressible Flüssigkeiten behandelt. Darüberhinaus korrigierte [4] die Gleitgeschwindigkeit rein theoretisch auf Basis von [5] oder [6] mit einer linearen Relation zwischen Gleitgeschwindigkeit und Wandschubspannung.

Infolgedessen wurde die Schaumrheologie in Prozeßauslegungen nicht korrekt berücksichtigt. Bei einer richtigen Beschreibung von Strömungsvorgängen aufgeschäumter Fluide in Prozessen ist die Berücksichtigung der druckabhängigen Viskosität und der Wandgleit effekt unabdingbar. In dieser Arbeit wurde eine neue Methode entwickelt, um die Rohrleitungsströmung von Schäumen in Prozessen unter Berücksichtigung der oben genannten Faktoren zu beschreiben.

Darüberhinaus wurde ein neuer funktionaler Zusammenhang zwischen Wandschubspannung und Wandgleitgeschwindigkeit für die untersuchten Schäume gefunden. Weiterhin wurde erstmals das rheologische Verhalten von Schäumen unter statischem Überdruck untersucht.

### 2 Berechnung von Schubspannung und Schergeschwindigkeit in einer Rohrleitung

#### 2.1 Strömungsverhältnisse

Strömungsverhältnisse können durch die dimensionslose Reynolds Zahl beschrieben werden. In Rohr- und Kanalströmungen beträgt die kritische Reynoldszahl

In this study, a new way to calculate the shear rate for foams in pipes is presented which includes wall slip effects, compressibility and the non-Newtonian, viscoelastic behaviour of foams.

For the first time, foam rheology measurements under real pressure and wall slip conditions were performed. Increasing the absolute pressure, a decrease in foam viscosity was observed. The viscosity function  $\eta_{\dot{\gamma}}$  at higher pressures approaches the function for the pure foaming liquid.

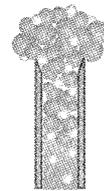
### 1 Introduction

Pumping foams through pipes is an important transport step in the industrial food foam production. Therefore, especially in-line rheology is an essential quality and process control parameter.

In general, foams behave like non-Newtonian, compressible, viscoelastic fluids which show strongly developed wall slip in process flow (e.g. in pipes). Nevertheless [1], [2], [3] and [4] assumed foams to be Newtonian, incompressible fluids for their calculations. Moreover, [4] corrected the slip velocity only theoretically based on [5] or [6] with a linear slip velocity/wall shear stress dependency.

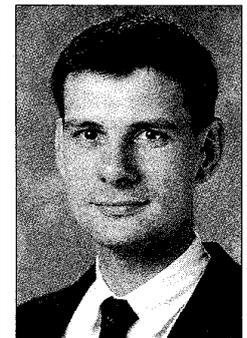
Consequently, foam rheology was not treated accurately. A correct calculation of foam flow in a process has to include pressure dependent viscosity and wall slip aspects. In this study, a new way to describe process pipe flow of foams was derived with the above mentioned factors. Furthermore, a new functional relationship between wall shear stress and wall slip velocity for the investigated foams was found. Moreover, for the first time, foam rheology was performed under static pressure.

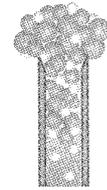
W. Hanselmann  
and E. Windhab,  
Zurich,  
Switzerland



**Dr. sc. techn. William Hanselmann**

Geboren 1966 in Chur (Schweiz) studierte der Autor Lebensmitteltechnologie an der ETH Zurich. 1993 begann er seine Doktorarbeit beim Nestle Forschungszentrum in Lausanne unter der Leitung von Prof. Windhab, ETHZ. Ende 1996 beendete er seine Doktorarbeit über industrielle Schaumtechnologie.	born in Chur (Switzerland) in 1966, studied food engineering at ETH Zurich. In 1993, he began his Ph.D. at Nestle Research Center in Lausanne under the supervision of Prof. E. Windhab, ETHZ. In the end of 1996 he finished his thesis about industrial foam technology.
--	--





geschert wird. Bei höheren Volumenströmen tritt ein deutlicher Unterschied zwischen Wandgleitgeschwindigkeit und mittlerer Schaumgeschwindigkeit auf. In diesem Bereich wird der Schaum deutlich geschert.

Beim Bipro/ Guar-Schaum ist die Wandgleitgeschwindigkeit im Vergleich zur mittleren Schaumgeschwindigkeit, auch bei geringen Schaumvolumenströmen, deutlich kleiner. Sie ist dadurch auch viel kleiner als die Gleitgeschwindigkeit eines reinen Bipro-Schaums. Dies kann man mit der höheren Viskosität der flüssigen Phase im Bipro/Guar-Schaum erklären.

In *Abbildung 3* ist die mittlere Gleitgeschwindigkeit  $u_{slip}$  über der Wandschubspannung für eine Rohr von 9,5 m Länge für Bipro/Guar-Schäume mit einem Overrun von 400% bei verschiedenen statischen Überdrücken aufgezeichnet. Die mittlere Gleitgeschwindigkeit ist der Mittelwert der gemessenen Einlaß- und Auslaß-Gleitgeschwindigkeiten.

Wie man *Abbildung 3* leicht entnimmt, besteht kein linearer Zusammenhang zwischen der Gleitgeschwindigkeit und der Wandschubspannung, wie dies fälschlicherweise von anderen Autoren (z.B. oben genannten) angenommen wurde. In dieser Arbeit wurde ein exponentieller Zusammenhang zwischen der Wandgleitgeschwindigkeit und der Wandschubspannung gefunden und mittels Gleichung (9) ausgedrückt, wobei  $a$  und  $b$  Konstanten sind.

#### 4.1 Verbesserungen

Die folgende *Abbildung 4* zeigt die Größenordnung der verschiedenen durchgeführten Korrekturschritte. Diese Korrekturschritte für die Schergeschwindigkeit sind am Beispiel eines Bipro/Guar-Schaums mit einem „Overrun“ von 400% aufgetragen.

Der Abszissenparameter  $\tau(\dot{\gamma}_n)$  ist die scheinbare newtonsche Fließfunktion, wie sie als erstes mittels dem Gesamtvolumenstrom am Rohraustritt berechnet wurde.

Als zweites erfolgt die Korrektur des Wandgleitens. Diese führt auf kleinere Scherraten, da der resultierende Schervolumenstrom durch die Berücksichtigung von Wandgleiteffekten kleiner wird. Die gleitkorrigierte Fließfunktion wird als  $\tau(\dot{\gamma}_n \text{ slip corrected})$  bezeichnet (vgl. *Abbildung 4*).

Der dritte Schritt besteht in der Berücksichtigung der Schaumkompressibilität zur Berechnung der Scherrate. Folglich müssen die Expansionseffekte im Rohr in Abhängigkeit vom Druckabfall einbezogen werden. Diese expansionskorrigierte Fließfunktion wird in *Abbildung 4* als  $\tau(\dot{\gamma}_n \text{ slip + pressure corrected})$  bezeichnet. Bedingt durch die Kompression und daraus folgende geringere Volumenströme führt diese Korrektur zu kleineren Scherraten.

For the Bipro+guar foam, the slip velocity is much smaller compared to the average foam velocity, even at low foam flow rates. It is thereby also much smaller compared to the slip velocity of a pure Bipro foam. This can be explained by the higher viscosity liquid phase of Bipro+guar.

In *figure 3*, the average slip velocity  $u_{slip}$  is plotted versus the wall shear stress for a pipe length of 9.5 meters for Bipro+guar foams at different pressures but a constant overrun of 400%. The average slip velocity is the mean of measured inlet and outlet slip velocity.

As can be easily seen from *figure 3*, there is no linear relationship between slip velocity and wall shear stress as assumed by other authors like the above mentioned. In this study, an exponential relationship between wall slip velocity and wall shear stress was found and expressed in equation (9), where  $\alpha$  and  $\beta$  are constants.

#### 4.1 Corrections

The following chart illustrates the magnitudes of the different corrections made.

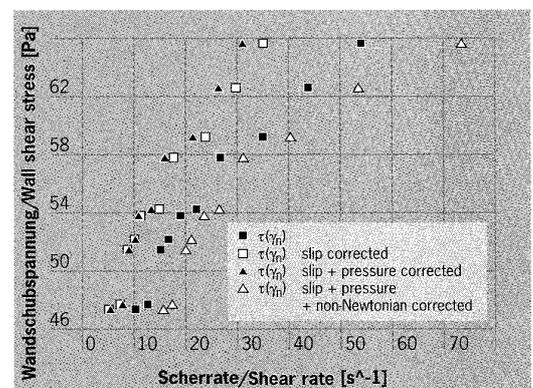
*Figure 4* shows the different correction steps for the shear rate of a Bipro+guar foam at 400% overrun  $\tau(\dot{\gamma}_n)$  is the apparent Newtonian flow function calculated with the total volume flow at the outlet of the pipe.

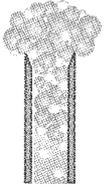
A second step is the wall slip correction. This leads to smaller shear rates, because the resulting shear volume flow is smaller. The slip corrected flow function is denoted as  $\tau(\dot{\gamma}_n \text{ slip corrected})$  (*figure 4*).

The third step is to take foam compressibility into account. Consequently the expansion effects have to be considered in a pipe depending on the pressure drop. This expansion corrected flow function is expressed in *figure 4* as  $\tau(\dot{\gamma}_n \text{ slip + pressure corrected})$ . This correction leads to smaller shear rates due to the compression leading to in a smaller volume flow rate.

The last step is the correction due to the non-Newtonian flow behaviour of foams. This is done by the Rabinowitsch equation (6). The correction leads to higher shear rates, because of the second term in equation (6) which refers to the increased slope of the velocity profile due to the shear thinning foam behaviour.

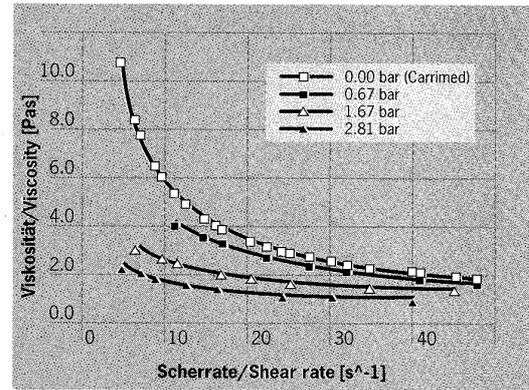
**Abb.4:**  
Wandschubspannung gegen Schergeschwindigkeit in Rohrleitungen für Bipro/Guar-Schaum bei 400% Overrun  
**Fig. 4:**  
Wall shear stress versus shear rate in pipes for a Bipro+guar foam at 400% overrun





**Abb. 5:**  
Schaumviskosität gegen  
Scherrate eines Bipro/Guar-  
Schaumes mit konstantem  
Overrun von 400 % bei  
variablen Druck

**Fig. 5:**  
Foam viscosity versus shear  
rate for a Bipro+guar foam  
with a constant overrun of  
400% and at different  
pressures



Im letzten Korrekturschritt wird das nichtnewtonsche Fließverhalten von Schäumen in die Scherratenberechnung einbezogen. Dies erfolgt durch Anwendung der Rabinowitsch-Gleichung (6). Es resultieren aufgrund des zweiten Terms in Gleichung (6), der die größere Steilheit des Geschwindigkeitsprofils eines strukturviskosen Schaumes berücksichtigt, höhere Scherraten.

In Abbildung 4 ist die vollständig korrigierte Fließfunktion mit  $\tau(\dot{\gamma}_n$  slip + pressure + non-Newtonian corrected) bezeichnet. Sie beschreibt das Verhalten der Fließfunktion eines kompressiblen, nichtnewtonschen Schaumes mit Wandgleiten.

In-line Rheologie kann nur unter Druck durchgeführt werden. Der Druckaufbau hängt von der Rohrlänge, der Viskosität und dem Volumenstrom des Schaumes ab. Zur Untersuchung der Druckabhängigkeit der Schaumviskosität wurde am Rohrende ein Überströmventil eingebaut, um zusätzlichen statischen Überdruck aufzubauen.

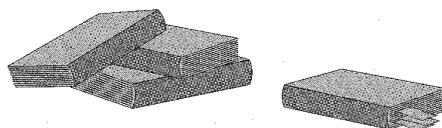
Die in Abbildung 5 angegebenen Druckwerte entsprechen den Mittelwerten aus dem am Rohreintritt und am Rohraustritt gemessenen Druck. Schäume besitzen unter Überdruck geringere Viskositätswerte als unter Normaldruck. Diese Viskositätserniedrigung ist auf die Kompression des Gases unter Druck und dem damit verbundenen geringeren scheinbaren Overrun zurückzuführen. Bei sehr hohen Überdrücken würde sich das Gas vollständig in der Flüssigkeit lösen und das rheologische Verhalten wäre das einer reinen Flüssigkeit.

## 5 Schlußfolgerungen

Die Expansion verschiedener Schäume wurde in einem eigens hierfür entwickelten Entspannungsrohr gemessen. Die Annahme, daß die Gasphase des Schaumes sich gemäß dem idealen Gasgesetz verhält und daß das zugehörige Flüssigkeitsvolumen von geringem Einfluß ist, konnte experimentell bewiesen werden. Diese Ergebnisse sind wichtig, um unter beliebigen Druckbedingungen den tatsächlichen Volumenstrom eines Schaumes in einer Rohrleitung zu berechnen.

Die Wandgleitgeschwindigkeit wurde als Funktion der zugehörigen Wandschubspannung für Schäume quantifiziert.

Rh



In figure 4, the completely corrected flow function is denoted as  $\tau(\dot{\gamma}_n$  slip + pressure + non-Newtonian corrected). This represents the most accurate flow function for a compressible, non-Newtonian foam with wall slip behaviour.

In-line rheology can only be performed under pressure. The pressure build up depends on the length of the pipe, the viscosity and the volume flow rate of the foam. To investigate pressure dependency of foam viscosity, a back pressure valve was installed at the end of the pipe to create an additional static pressure.

The indicated pressure values in figure 5 correspond to the average of the inlet and outlet pressures of the pipe.

Foams under pressure have a lower viscosity (figure 5) than under atmospheric pressure. This can be explained by the compression of the gas and hence by a lower apparent overrun. Under high pressure, the gas would be completely dissolved in the liquid and the rheological behaviour would be the same as for the pure liquid.

## 5 Conclusions

The expansion of different foams was measured in a specially developed expansion tube. The assumption that the gas fraction in a foam expands according to the ideal gas law and the liquid volume fraction is of negligible influence could be experimentally proved. This is important for calculating the real volume flow rate in a pipe at any pressure conditions.

The wall slip velocity as a function of the related wall shear stress for foams was quantified.

Rh

- [1] Burley, R., Shakrin, M.,  
Int. J. Eng. Fluid Mech. 5 (1992), pp. 115 – 141
- [2] Winkler, W., Valko, P. et al.,  
Erdöl Erdgas Kohle 110 (1994), pp. 158 – 162
- [3] Calvert, J.R.,  
Int. J. Heat and Fluid Flow 11 (1990), pp. 236 – 241
- [4] Enzendorfer, C., Harris, R.A. et al.,  
J. of Rheology 39 (1995), pp. 345 – 358
- [5] Mooney, M. 1931, J. of Rheology 2 (1931), pp. 210 – 222
- [6] Jastrzebski, Z.D.,  
Ind. Eng. Chem. Fundam. 6 (1967), pp. 445-453
- [7] Rabinowitsch, B., Z. Phys. Chem. 1 (1929) 145 A