

Neues Verfahren der Rheometrie: Gradienten-Ultraschall-Puls-Doppler-Verfahren

New Rheometric Technique: the Gradient-Ultrasound Pulse Doppler Method

M. Müller, Stuttgart,
P.O. Brunn
and T. Wunderlich,
Erlangen, Germany



In der vorliegenden Arbeit wird ein neues berührungsloses Verfahren zur Messung von Geschwindigkeitsgradienten vorgestellt. Dieses Verfahren beruht auf der sog. Ultraschallpuls-doppler (UPD)-Methode, die schon seit längerem in der Technik und Medizin zum Einsatz kommt. Durch Abänderung der Meßtechnik kann man direkt die Scherrate in einer viskosimetrischen Strömung ermitteln und unter Messung der Schubspannung über den Druckverlust die Fließkurve einer Flüssigkeit (oder Viskositätskurve) bestimmen.

Neben der Vorstellung des neuen Verfahrens werden einige Viskositätskurven im Vergleich zu herkömmlichen Laborrheometern gezeigt. Die wesentlichen Vorteile dieses Systems liegen neben der berührungslosen Messung vor allem in dem einfachen Aufbau und dem Einblick in die Strömung.

1 Einleitung

In der Rheometrie ist es meist wünschenswert, die rheometrischen Größen Scherrate $\dot{\gamma}$, Schubspannung τ oder die Normalspannungsdifferenzen N_1 und N_2 direkt zu bestimmen. Gerade bei Auftreten von Rand- (Gleiten, Separation, Kristallisation) oder sekundären Strömungseffekten (hervorgerufen durch elastische oder zentrifugale Kräfte) kann man nur scheinbare oder fiktive Größen erhalten, die eine rheologische Interpretation nur noch bedingt zulassen. Auch sind Korrekturen ohne Kenntnis des tatsächlichen physikalischen oder chemischen Sachverhaltes nur sehr eingeschränkt anzuwenden. Ein Ansatz für eine direkte Ermittlung der rheologischen Daten ist das Gradienten-Ultraschall-Puls-Doppler-(GUPD) Verfahren.

This paper presents a new contact-free method to measure velocity gradients. The technique is derived from the so-called Ultrasound Pulse Doppler (UPD) method, which has long been used in medicine and other technical disciplines. By adapting the technique, one can directly determine shear rate in a viscometric flow. In addition, by measuring shear stress (via pressure loss), one can determine the fluid's flow (viscosity) curve.

We will present a comparison of viscosity curves obtained with this new method to those obtained with commercial laboratory rheometers. Besides being a contact-free technique, principal advantages of the new system include its simple construction and the capability it provides for visual insight into the flow.

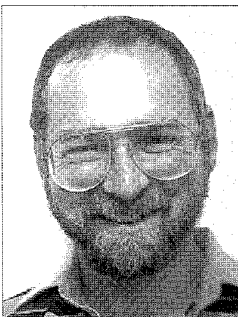
1 Introduction

In rheometry one usually wishes to directly measure the quantities shear rate $\dot{\gamma}$, shear stress τ , or the normal stress differences N_1 and N_2 . If boundary effects (slip, separation, crystallization) or secondary flow effects (caused by elastic or centrifugal forces) are important, than one can measure only apparent (or fictitious) quantities; such parameters provide only limited information about the rheological characteristics of the fluid. Also, without knowledge of the physical or chemical nature of the fluid, corrections to these apparent properties are applicable only to a limited extent. The Gradient-Ultrasound Pulse Doppler (GUPD) method provides a means to directly measure rheological quantities.

2 Fundamentals

The measurement principle of the UPD technique is depicted in Fig. 1. The transmitter emits an ultrasound impulse of specific frequency f_0 that is reflected from a particle conveyed in the flowstream. Due to the Doppler effect, the frequency of the ultrasound pulse reflected from the moving particle f_D is shifted by an amount directly proportional to the velocity u . Figure 2 shows the design of the transmission/receive system.

Immediately after transmitting an impulse, the sensor is switched to the receive mode. At specific time increments t_i ($i = 1 \dots n$) it detects the impulse reflected from the particle. The sensor system can only detect velocities traveling congruent to its own axis of alignment. The velocity u is determined from Equation (1), where c_s is the speed of sound. From the time inter-



Prof. Dr. P.O. Brunn

studierte Physik an der Uni Erlangen, promovierte an der Univ. of Minnesota (USA) und habilitierte an der Uni Dortmund. Nach einem mehr-jährigen Aufenthalt an der Columbia Univ., New York (USA), kehrte er nach Deutschland zurück. Heute ist er Universitätsprofessor für Strömungsmechanik an der Uni Erlangen.

studied physics at Erlangen University, obtained his doctorate at the University of Minnesota, USA and qualified as professor at Dortmund University. After spending several years at Columbia University, New York, USA, he returned to Germany and is now university professor for flow mechanics at Erlangen University.



Im Rahmen der Meßgenauigkeit wird eine gute Übereinstimmung der Viskositätsfunktion zwischen beiden Systemen erreicht. Damit kann zumindest für die vorliegende newtonsche Flüssigkeit gesagt werden, daß dieses Verfahren gut für die Ermittlung der Viskosität geeignet ist.

5 Polymer-Lösungen

5.1 Polyacrylamid

Polyacrylamid (PAAm) ist ein technisch hergestelltes langkettiges Polymer, das sich schon in geringsten Mengen in wäßrigen Systemen stark nicht-newtonsch verhält und sich durch die Ausbildung extrem elasti-

5.2 Hydroxypropyl guar gum

A polymer solution based on Hydroxypropyl guar gum (HPG) was also tested. Guar gum is the endosperm of the legumin family *Cyamopsis tetragonloba* (guar bean). In our experiments an aqueous solution of 8000 ppm HPG was used. Figure 9 shows a comparison of the viscosity functions measured using the two different techniques.

The agreement between the viscosity curves is very good, i.e., indistinguishable within the accuracy of the measurements. The data indicate that the new technique yields very good results for non-Newtonian fluids, and that values measured via GUPD are identical to those obtained using a rotational rheometer.

The Complete Rheology "Made by HAAKE"

Molecular Information with RheoStress®

The HAAKE rheometer RheoStress gives you inside information about the molecular structure of your material and features:

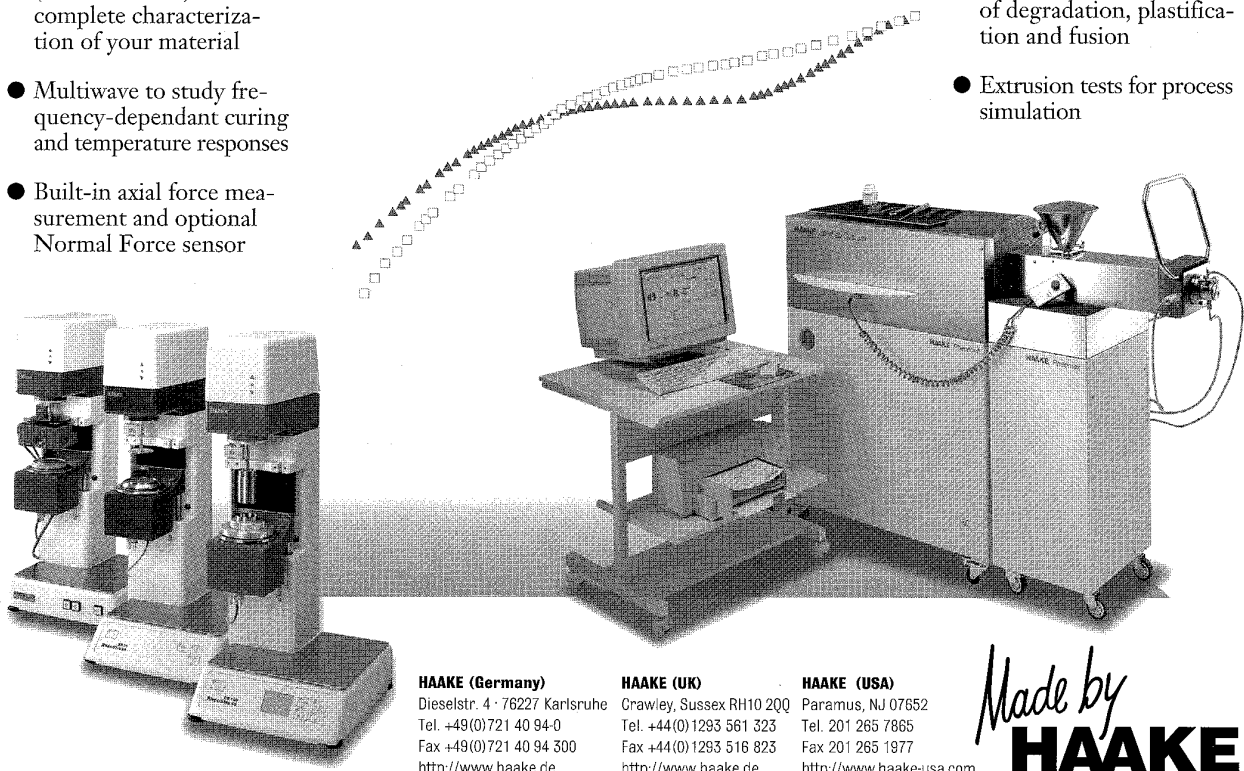
- Wide frequency range (10^{-4} to 10^2 Hz) for the complete characterization of your material
- Multiwave to study frequency-dependant curing and temperature responses
- Built-in axial force measurement and optional Normal Force sensor

- Very high torque values (up to 150 mNm) and high torque resolution (10^{-8} Nm)
- Very small torque values ($2 \cdot 10^{-7}$ Nm) and high strain resolution with $6 \cdot 10^{-7}$ rad to quantify sensitive structures

Handling and Processability with PolyLab®

The HAAKE torque rheometer PolyLab quantifies the processability of your polymer, ceramic paste or other filled materials in understandable terms with:

- Extrusion capillary rheometer option
- Optical tests for die swell and pigment distribution
- Compounding with laboratory twin screw extruder
- Mixer tests for the analysis of degradation, plastification and fusion
- Extrusion tests for process simulation



HAAKE (Germany)
 Dieselstr. 4 · 76227 Karlsruhe
 Tel. +49(0)721 40 94-0
 Fax +49(0)721 40 94 300
<http://www.haake.de>

HAAKE (UK)
 Crawley, Sussex RH10 2QQ
 Tel. +44(0)1293 561 323
 Fax +44(0)1293 516 823
<http://www.haake.de>

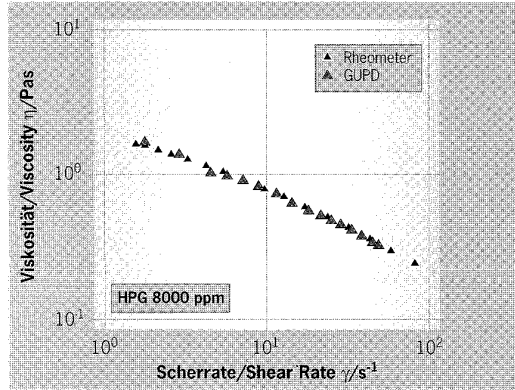
HAAKE (USA)
 Paramus, NJ 07652
 Tel. 201 265 7865
 Fax 201 265 1977
<http://www.haake-usa.com>

Made by
HAAKE

This is an extract of the complete reprint-pdf, available at the Applied Rheology website
<http://www.appliedrheology.org>

This is an extract of the complete reprint-pdf, available at the Applied Rheology website
<http://www.appliedrheology.org>

Abb. 9:
siehe Abb. 8
Fig. 9:
see Fig. 8



scher Eigenschaften auszeichnet. Für die Versuche wurde eine wäßrige PAAm-Lösung verwendet (4000 ppm).

In Abb. 8 ist der Vergleich der Viskosität zwischen dem GUPD-Verfahren und einem Rotationsviskosimeter dargestellt. Wie bei der newtonschen Flüssigkeit ergibt sich auch hier eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Werten aus beiden Systemen.

5.2 Hydroxypropylguar-Gum

Eine weitere Polymerlösung, die getestet wurde, ist eine Hydroxypropylguar-Gum-Lösung (HPG). Als Guar Gum bezeichnet man das Endosperm der indischen, zu den Leguminosen zählenden *Cyamopsis tetragonoloba* (Guar Bohne). Für die Versuche wurde eine wäßrige 8000 ppm HPG-Lösung gewählt. In Abb. 9 der Vergleich der Viskositätsfunktion aus einem Rotationsviskosimeter und dem GUPD-Verfahren dargestellt.

Die Übereinstimmung beider Verläufe ist im Rahmen der Meßgenauigkeit sehr gut. Abschließend kann bemerkt werden, daß das neue Verfahren für die bisher nicht-newtonschen Flüssigkeiten sehr gute Resultate liefert, die denen des Rotationsrheometer gleichwertig sind.

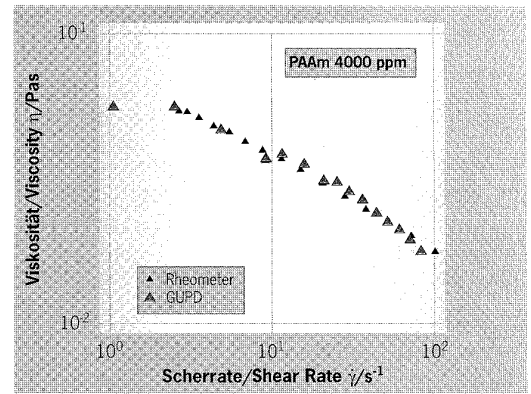
6 Zusammenfassung

Das Gradienten-Ultraschall-Puls-Doppler ist ein berührungsloses Verfahren, mit dem man direkt Geschwindigkeitsgradienten ermitteln kann. Es konnte gezeigt werden, daß in einer viskosimetrischen Rohrströmung vergleichbare Ergebnisse zu handelsüblichen Rheometern erzielt werden können. Nur im wandnahen Bereich der Strömung werden nur eingeschränkt Daten erhalten.

Der mögliche Anwendungsbereich kann in der Prozeßrheometrie, bei der Gradientenmessung in komplexen Strömungen, bei Dehnströmungen, für die Anwendung bei Gleiten, Sedimentation oder Kristallisation liegen.



Abb. 8:
Vergleich der
Viskositätsfunktion
Fig. 8:
Comparison of
viscosity functions



6 Conclusions

The Gradient-Ultrasound Pulse Doppler technique provides a non-contact method to directly determine velocity gradients. This investigation verified that using the GUPD method to characterize viscometric pipe flows yields comparable results to those obtained using a commercial rheometer. Only in the regions near pipe walls was data collection somewhat limited.

Possible applications of this technique include process rheometry, measurement of gradients in complex flows, investigation of extensional flows, and applications in which slip, sedimentation, or crystallization are influential.



Gleichungen/Equations

$$u_s = u \cos \alpha = \frac{r_0 c_s}{2f_0} \quad (1)$$

$$s_i = s_1 + c_s t_i / 2, \quad i > 2 \quad (2)$$

$$\dot{\gamma}(r) = \dot{\gamma} \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) = \left| \frac{du}{dr} \right| \equiv \left| \frac{u_1(r_1) - u_2(r_2)}{\Delta r} \right| \quad (3)$$

$$\tau(r) = \frac{\Delta p}{2L} r \quad (4)$$

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau(r)}{\dot{\gamma}(r)} = \frac{\tau(r)}{\dot{\gamma} \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right)} = \frac{\Delta p}{2L} \left| \frac{\Delta r}{u_1(r_1) - u_2(r_2)} \right| r \quad (5)$$

$$\Delta r = c_s \sin \alpha \delta t \quad (6)$$



- [1] Steger, R.: "Optical and acoustic methods in rheometry", Diss., University of Erlangen (1994)
- [2] Brunn, P.O., Vorwerk, J., Steger, R.: Rheology 3 (1993), No. 1, p. 20
- [3] Wunderlich, A.: "Development of a Gradient-Laser-Doppler Anemometer and its use"

