

## Messung von Spaltströmungsprofilen mit einem LDA-Profilsensor nach dem Referenzstrahl-Streustrahl-Verfahren

### Measurement of gap-flow profiles with a LDA profile sensor based on the reference-beam scattering-beam procedure

**S. Oertel, B. Mickan, H. Müller, H. Többen**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

**M. Dues**

Intelligent Laser Applications Research and Development (ILA R&D) GmbH  
Karl-Heinz-Beckurts-Straße 13, 52428 Jülich, Deutschland

Schlagworte: Referenzstrahl-Streustrahl-LDA, phasenaufgelöste Messung, Spaltströmung  
Key words: reference-beam scattering-beam LDA, phase resolved measurement, gap-flow

#### Zusammenfassung

Die Untersuchung von Spaltströmungen spielt in vielen technischen Anwendungen, wie zum Beispiel Rotor-Stator-Konfigurationen, eine wichtige Rolle. Das Strömungsprofil innerhalb des Spaltes wird dabei maßgeblich durch die Eigenschaften des strömenden Fluids festgelegt. Umgekehrt können aus der Messung von Strömungsprofilen wichtige Informationen über die rheologischen Eigenschaften des Fluids gezogen werden, wie beispielsweise die geschwindigkeitsabhängige Scherspannung und Viskosität von nicht-newtonschen Flüssigkeiten. Eine verlässliche Messung derartiger Profile erfordert eine hohe Ortsauflösung in der relevanten Grenzschicht der Strömung, die in diesem Beitrag durch ein ortsauflösendes Laser-Doppler-Anemometer (LDA) nach dem Referenzstrahl-Streustrahl Verfahren (RS-LDA) erzielt wird. Es werden Messungen vorgestellt bei einer Spaltbreite von 1 mm, sowohl an newtonschen Flüssigkeiten (Wasser), als auch an nicht-newtonschen (Habon-G, Triton-X), wobei letztere eine klare Abweichung von einem parabolischen Spaltströmungsprofil aufweisen.

#### Einleitung

Viele Flüssigkeiten, die in technischen und in industriellen Anwendungen eingesetzt werden, folgen in ihrem Fließverhalten nicht dem Newton'schen Reibungsgesetz, d.h. ihre dynamische Viskosität  $\eta$  ändert sich mit zunehmender Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$ . Die Untersuchung solcher Flüssigkeiten ist Gegenstand der Rheologie, auch unter Einsatz von Laser-Doppler-Verfahren, siehe Chara et al. 1993. Eine verlässliche Messung der Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie setzt eine genaue Ermittlung der Scher- und Grenzschicht von Strömungsprofilen derartiger Flüssigkeiten voraus.

Das Messvolumen konventioneller Laser-Doppler-Anemometer ist durch die Größe des Bereiches der sich kreuzenden Laserstrahlen gegeben. Für Scher- und Grenzschichten ist dieses Messvolumen oft zu groß. Mittels diverser Techniken kann die Position von Streupartikeln auch innerhalb des Messvolumens ermittelt werden, wobei eine das hier verwendete Referenzstrahl-Streustrahlverfahren (RS-LDA) ist, siehe Strunck und Dopheide 1993, Borys et al. 2000, Czarske et al. 2002, Strunck et al. 2002.

## Referenzstrahl-Streustrahl LDA

Während beim Standard-LDA (STD-LDA) das Messvolumen durch die sich kreuzenden Laserstrahlen definiert wird, befindet sich beim RS-LDA das Messvolumen innerhalb des Beleuchtungsstrahls B (s. Abb. 1). Der Empfänger E wird bei letzterem Verfahren in den zweiten Strahl, d.h. den Referenzstrahl R platziert. Die Orientierung des Streifensystems und der Streifenabstand ist in der Messvolumenmitte identisch zu dem des STD-LDA. Die effektive Messvolumenlänge ist im Wesentlichen gegeben durch die Apertur des Detektors und seines Abstands zum Kreuzungspunkt.

Typischerweise wird der Messvolumenrand bei einem STD-LDA durch die Abnahme des Produktes der Feldstärken beider Laserstrahlen auf den Wert  $1/e^2$  beschrieben. Bei einem RS-LDA bleibt die Feldstärke des Referenzstrahls jedoch konstant und es gilt für das Verhältnis der Messvolumenlängen  $l_{RS}$  und  $l_{STD}$  annähernd:

$$\frac{l_{RS}}{l_{STD}} = \frac{8 e^2 f}{D} \tan(\vartheta/2)$$

Mit einer Fokusslänge  $f = 500$  mm, einem Strahldurchmesser  $D$  an der Linse von 5 mm und einem Schnittwinkel  $\vartheta$  der Laserstrahlen von  $5^\circ$  ist die Messvolumenlänge  $l_{RS}$  des RS-LDAs um drei Größenordnungen länger als die des Standard-LDAs für einen Detektor mit sehr kleiner Apertur, Buschmann et al. 2003.

Analog zum Interferenzfeld im Kreuzungsvolumen bildet sich auch auf der Detektorfläche ein Interferenzfeld aus Streulicht und Referenzstrahl-Licht aus. Der Modulationsgrad des über die Detektorfläche integrierten Laser-Doppler-Signals ist abhängig von dem Abstand der Interferenzstreifen dieses Interferenzfeldes und nimmt mit kleiner werdendem Interferenzstreifenabstand ab. Der Bereich konstruktiver Interferenz wird Kohärenzkegel genannt, siehe Drain 1980. Der Öffnungswinkel dieses Kegels ergibt sich aus

$$\alpha_c = \sin^{-1}(\lambda/2b)$$

mit der Wellenlänge  $\lambda$  und dem Durchmesser  $b$  der Apertur des Detektors. Damit wird die Messvolumenlänge  $l_{RS}$  aus

$$l_{RS} \leq \frac{r \sin \alpha_c}{\sin(\vartheta + \alpha_c)}$$

ermittelt bei einem Abstand  $r$  des Detektors zum Kreuzungspunkt, siehe Borys et al. 1998.

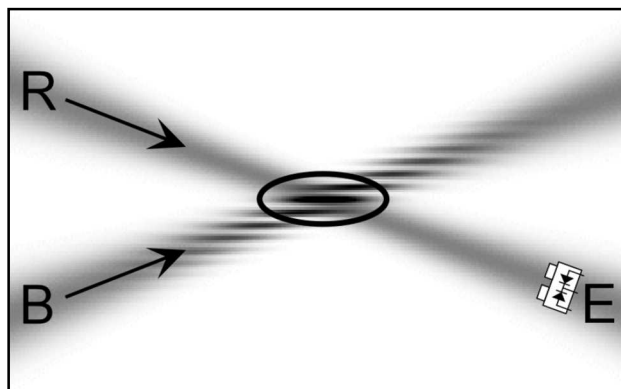


Abb. 1: RS-LDA-Messvolumen und Standard-LDA-Messvolumen (eingekreist)

Für die Bestimmung der Position  $z$  innerhalb des Messvolumens (entlang des Beleuchtungsstrahls) wird eine Duo-PIN-Photodiode (mit einem Diodenabstand  $x_E$ ) benutzt, die die dazu notwendige Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  nach Auswertung der Doppler-Signalaare bereitstellt:

$$z = \frac{\lambda r}{2\pi x_E \sin \vartheta} \Delta\varphi$$

Neben der Limitierung des Messvolumens auf den Bereich konstruktiver Interferenz, d.h. auf den Kohärenzkegel, ist das Messvolumen zusätzlich auf den Bereich beschränkt, innerhalb dem eine eindeutige Zuordnung der Position zur Phasendifferenz möglich ist. Für die Phasendifferenzmethode erhält man eine Phaseneindeutigkeit, d.h.  $(-\pi \leq \Delta\varphi \leq \pi)$ , innerhalb der Messvolumenlänge

$$l_{2\pi} = \frac{\lambda r}{x_E \sin \vartheta}$$

Bei einem bestehenden LDA-System und vorgegebenem Photodetektor ( $x_E$  fest) kann nur über den Abstand des Detektors zum Kreuzungspunkt Einfluss auf die Messvolumenlänge genommen werden. In der praktischen Anwendung unterliegt der Zugang zum Messort allerdings häufig technischen Einschränkungen bezüglich der Positionierung des Detektors. Zusätzlich nimmt die Streulichtintensität quadratisch mit dem Abstand ab, so dass für eine ausreichend hohe Signalstärke der Detektor nicht beliebig weit vom Kreuzungsort entfernt positioniert werden kann.

Bei Messungen in Fluiden mit einem Brechungsindex  $n > 1$  ändert sich der Schnittwinkel  $\vartheta$  und damit auch die Messvolumenlänge  $l_{2\pi}$  und der virtuelle Streifenabstand  $\Lambda$  des RS-LDAs. Trifft der Referenzstrahl senkrecht auf das Medium mit  $n > 1$ , so ergeben sich folgende, durch einen Strich ' gekennzeichneten, Änderungen:

$$\sin \vartheta' = \frac{\sin \vartheta}{n}, \quad l'_{2\pi} = \frac{\lambda r}{x_E \sin \vartheta'} \quad \text{und} \quad \Lambda' = \Lambda \frac{\sin(\vartheta/2)}{\sin(\vartheta'/2)}$$

## Versuchsaufbau

Für die Messungen wurde ein Spaltströmungskanal aufgebaut, der aus zwei parallelen Plexiglasplatten (Dicke 5 mm) besteht, welche in einem Abstand von 1 mm in einer Metallkonstruktion befestigt sind (siehe Abb. 2). Die Abmessungen des Kanals betragen 500 mm x 1 mm x 40 mm (Länge x Breite x Höhe). Das LDA-Messvolumen wurde in die Mitte des Strömungskanals gelegt, d.h. in einem Abstand von 20 mm zur unteren und oberen Kante und von 250 mm zu den seitlichen Rändern. Als LDA-Sonde wurde ein *fp50 shift*-Sonde der ILA R&D GmbH verwendet (Brennweite  $f = 400$  mm, Streifenabstand  $\Lambda = 4,634438$   $\mu\text{m}$ , Schnittwinkel  $\vartheta = 6,595^\circ$ , Shift-Frequenz 40 MHz und einer eingestellten Laser-Leistung von 5 mW), die so positioniert wurde, dass der Referenzstrahl senkrecht auf den Strömungskanal traf. Die Detektion der Doppler-Signalaare erfolgte in Vorwärtsstreureichtung mit einem Eigenbau-Duo-Photodetektor (Abstand des Detektors zum Kreuzungspunkt  $r = 200$  mm). Vor der Digitalisierung der Doppler-Signale wurden diese um 40 MHz ins Basisband heruntergemischt, um eine ausreichend hohe Phasenauflösung zu gewährleisten. Bei den Wassermessungen erfolgte der Durchfluss über den hydrostatischen Druck eines um ca. 1 m gegenüber dem Strömungskanal erhöhten 10 Liter-Kanisters. Ein Nadelventil am Kanaleinlass diente zur Regulierung der Durchflussgeschwindigkeit. Für die Messungen an den nicht-newtonschen Flüssigkeiten wurde ein Kolbenverdränger (Zylindervolumen ca. 1 Liter) benutzt, dessen Geschwindigkeit

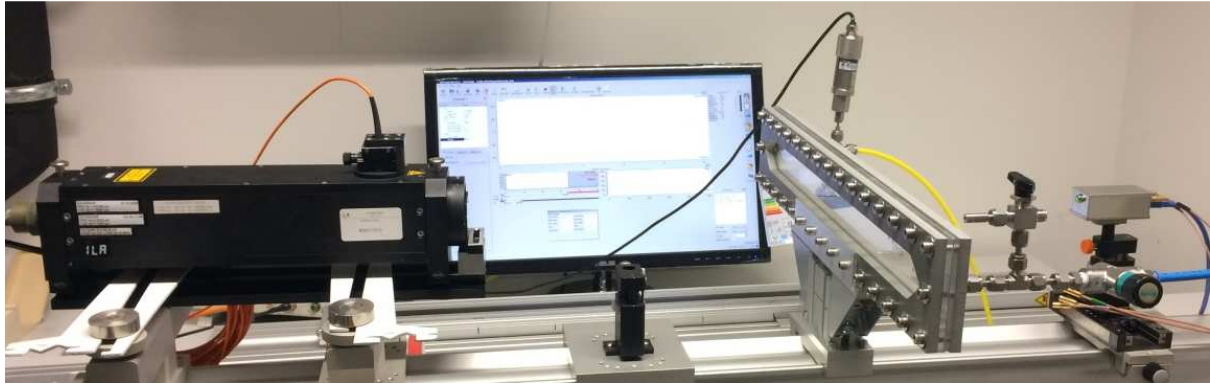


Abb. 2: Versuchsaufbau

über den antreibenden Schrittmotor eingestellt werden konnte. Die Durchflussgeschwindigkeiten wurden so eingestellt, dass die Reynoldszahlen  $Re$  unter 500 lagen. Die Berechnung von  $Re$  erfolgte über

$$Re = \frac{v_m d_h \rho}{\eta}, \quad d_h = \frac{2 b h}{b + h}$$

mit der querschnittsgemittelten Geschwindigkeit  $v_m$ , dem hydraulischen Durchmesser  $d_h$ , der Dichte  $\rho$  und der Kanalbreite und -höhe  $b$  und  $h$ , siehe Wibel 2009.

Als nicht-newtonschen Flüssigkeiten wurden Habon-G und Triton-X verwendet:

„Habon-G“:	Habon-G® (Fa. Hoechst; CAS: 196936-27-3) 0,064 % in Wasser
„Triton-X“:	Triton x-100® (Biochemica Applichem Panreac; CAS: 9002-93-1) 0,081 % in Wasser

## Ergebnisse

Zunächst wurden Testmessungen an Wasser (newtonsche Flüssigkeit) durchgeführt, um den Versuchsaufbau zu validieren. Insbesondere sollte dabei sichergestellt werden, dass am Messort eine laminare Strömung vorliegt, d.h. die Vorlaufströmungslänge ausreichend ist. Abb. 3 (a) zeigt das Ergebnis der Wassermessungen und einen klaren parabolischen Verlauf der Spaltströmung über die Spaltbreite für drei verschiedene Reynoldszahlen  $Re$ . Die Punkte sind jeweils – über mehrere Doppler-Einzelsignale des Originalprofils – gemittelte Werte. Exemplarisch ist in Abb. 3 (b) das Originalprofil für  $Re = 187$  dargestellt. Die Mittelung wurde auf zwei Arten durchgeführt: Einmal wurden für die linke und rechte Hälfte des Strömungsprofils über alle Doppler-Einzelsignale innerhalb von Geschwindigkeitsintervallen der Breite 0,012 m/s gemittelt („Phasemittelung“). Das zweite Mal wurde über alle Doppler-Einzelsignale innerhalb von Phasendifferenzintervallen der Breite 0,1 rad gemittelt („Geschwindigkeitsmittelung“). Daraus ergaben sich zwei Profile, wobei das „phasengemittelte“ Profil für hohe Geschwindigkeiten verfälscht war und das „geschwindigkeitsgemittelte“ Profil für niedrige Geschwindigkeiten falsche Werte gegenüber dem Originalprofil lieferte. Beide Profile wurden ohne die verfälschten Bereiche zu einem Profil übereinandergelegt und sind in Abb. 3 (a) jeweils als Punkte dargestellt. Als Linien sind die jeweiligen parabolischen Anpassungen an die gemittelten Datenpunkte eingezeichnet, wobei bei der Anpassung an den Kanalwänden *keine* Knotenpunkte gesetzt wurden. Wegen der guten Übereinstimmung der drei Anpasskurven an

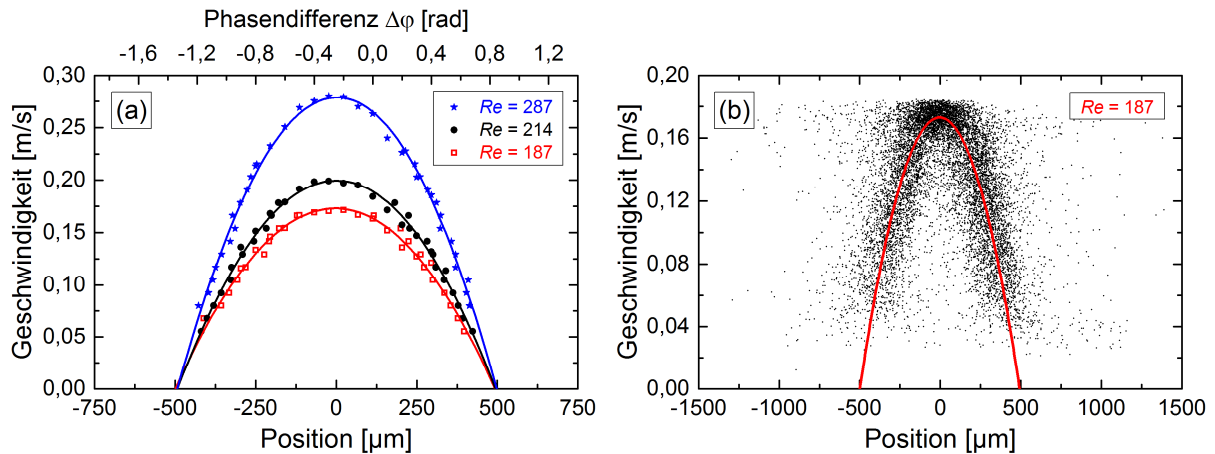


Abb. 3: (a) Parabolische Spaltströmungsprofile von Wasser für drei Reynoldszahlen  $Re$ . Die Punkte sind die gemittelten Messwerte (siehe Text), die Linien die entsprechenden parabolischen Anpassungen. (b) Originalströmungsprofil (ungemittelt) für  $Re = 187$ .

den Kanalwänden, d.h. bei der Geschwindigkeit  $v = 0$ , wurde dem Intervall zwischen den beiden Nulldurchgängen die Spaltbreite  $1000 \mu\text{m}$  zugeordnet und auf eine Positionsbestimmung über eine Ortskalibrierung verzichtet.

Abb. 4 zeigt die aufgenommenen Spaltströmungsprofile von Habon-G (a) und Triton-X (c). Verunreinigungen in der Habon-G Probe führten zu häufigen „Zwei-Partikel-Ereignissen“, d.h. zwei Partikel befanden sich gleichzeitig im Messvolumen, so dass eine verlässliche Phasenauswertung im Spektrum der beiden Dopplersignale nicht möglich war. Diese „Zwei-Partikel-Ereignisse“ konnten über einen Zeitversatz zwischen den beiden Dopplersignalen ausfindig gemacht und somit gelöscht werden. Abb. 4 (a) zeigt das bereinigte Strömungsprofil von Habon-G. Aus den Originalprofilen [(a) und (c)] wurden wie bei den Wassermessungen gemittelte Profile berechnet, die in Abb. 4 (b) und (d) als kleine Kreise dargestellt sind, wobei das Habon-G Profil zusätzlich geglättet wurde. Die Ermittlung der unbekannteren Strömungsprofile erfolgte mit Hilfe von B-Splines [Linien in Abb. 4 (b) und (d)], wobei die Knotenpunkte der B-Splines äquidistant über die Strömungsprofile verteilt waren. Im Fall von Habon-G bzw. Triton-X wurden fünf respektive neun Knotenpunkte verwendet. Der ungünstige, nicht physikalische Verlauf des B-Splines bei Triton-X an den Rändern des Profils ergibt sich aus der Minimierung der Fehlerquadrate in Ordinate-Richtung (ordinary least square). Eine Optimierung bezüglich dieser Abweichungen könnte über eine rechnerisch aufwendigere Minimierung der Fehlerquadrate orthogonal zum B-Spline erreicht werden (totalized least square). Über die analytische Ableitung der B-Splines wurden abschließend die Schergeschwindigkeiten  $\dot{\gamma}$  in Abhängigkeit von der Position in der Spaltströmung berechnet (s. Abb. 5).

## Fazit

Es wurden Profilmessungen nach dem Referenzstrahl-Streustrahl-Verfahren an einem Spaltströmungskanal durchgeführt unter Verwendung eines konventionellen LDA-Systems in Kombination mit einem Duo-Photodetektor. Dabei wurden sowohl newtonsche als auch nicht-newtonsche Spaltströmungsprofile aufgenommen, wobei letztere eine klare Abweichung von einem parabolischen Spaltströmungsprofil aufweisen. Aus dem Verlauf der Profile konnte die nichtlineare Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  in der Spaltströmung abgeleitet werden.

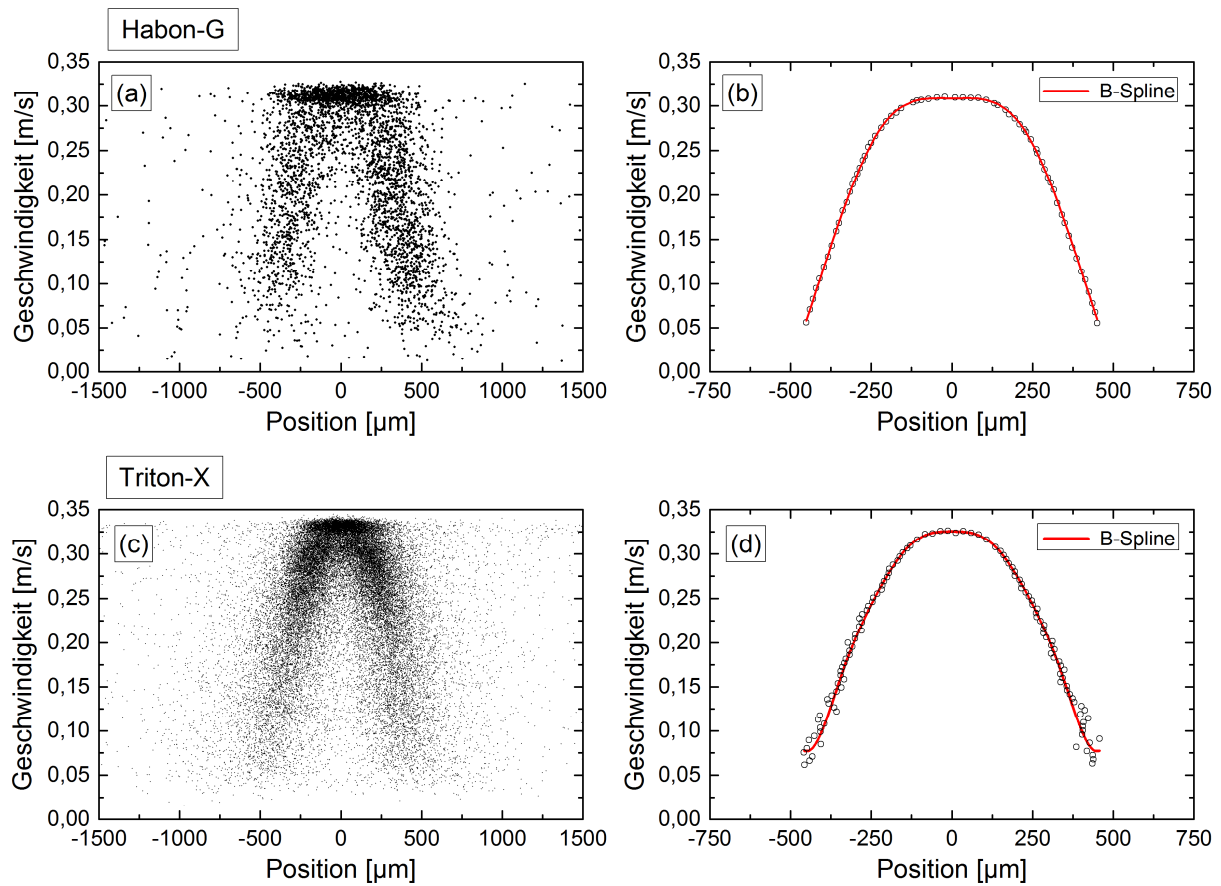


Abb. 4: Nicht-newtonsche Spaltströmungsprofile der Proben Habon-G (a) und Triton-X (c). In (b) und (d) sind die gemittelten Messwerte (Kreise) und daran angepasste B-Splines (Linie) dargestellt.

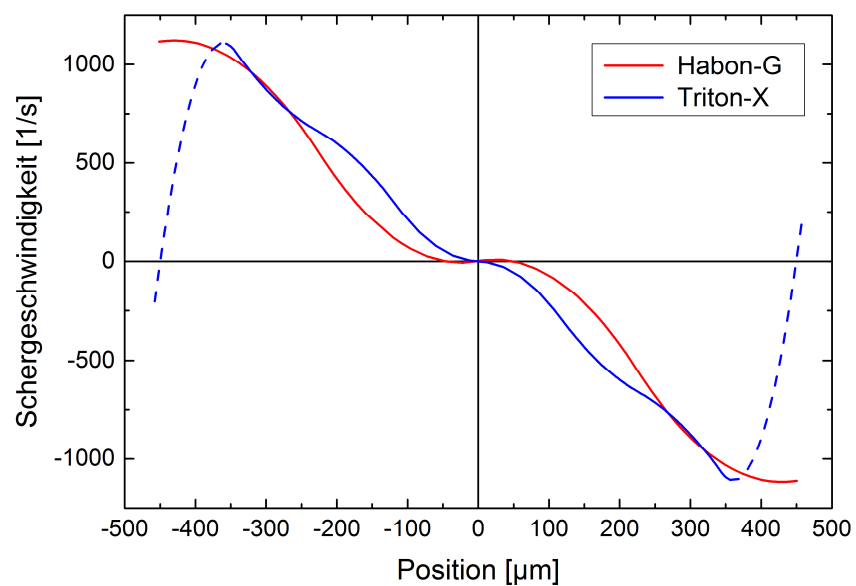


Abb. 5: Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  (erste Ableitung der in Abb. 4 (b) und (d) dargestellten B-Splines) in Abhängigkeit von der Spaltposition der Proben Habon-G und Triton-X.

## Literatur

**Chara, Z., Zakin, J. L., Severa, M., & Myska, J., 1993:** "Turbulence measurements of drag reducing surfactant systems", *Experiments in Fluids*, 16(1), 36-41

**Strunck, V., Dopheide, D., 1993:** "Ortauflösender LDA-Sensor für die Grenzschichtprofilmessung", 2. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA 1993), PTB-Braunschweig, 14.-16. September 1993, Shaker Verlag, Aachen, ISBN: 3-86111-595-6, Beitrag 4

**Borys, M., Strunck, V., Müller, H., Dopheide, D., 2000:** "Interferometrische Ortsauflösung der Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Meßvolumens eines Referenzstrahl-LDA", 8. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA 2000), TU München, 12.-14. September 2000, Verlag Shaker, Aachen, ISBN 3-8265-7809-0, Beitrag 2.1-2.8

**Czarske, J., Büttner, L., Razik, T., Müller, H., Dopheide, D., Becker, S., Zanoou, E. S., Durst, F., 2002:** "Messung der Wandschubspannungen mit einem ortsauflösenden LDA-Doppler-Profilensensor", 10. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA 2002), Universität Rostock, 10.-12. September 2002, ISBN 3-86009-233-2, Beitrag 9.1-9.6

**Strunck, V., Sodomann, T., Müller, H., Dopheide, D., 2002:** "Profilmessungen innerhalb des Messvolumens kommerzieller 3D-LDAs", 10. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA 2002), Universität Rostock, 10.-12. September 2002, Verlag Shaker, Aachen, ISBN 3-86009-233-2, Beitrag 10.1-10.6

**Buschmann, T., Strunck, V., Müller, H., Dopheide, D. 2003:** "Faseroptischer LDA-Liniensensor mit hoher Ortsauflösung", 11. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA 2003), PTB-Braunschweig, 9.-11. September 2003, Fischer Druck, Peine, ISBN 3-00-011903-5, Beitrag 7.1-7.6

**Drain, L. E., 1980:** *The laser Doppler technique*, John Wiley & Sons, New York

**Borys, M., Strunck, V., Müller, H., Dopheide, D., 1998:** „Meßvolumeneffekte des Referenzstrahl-LDAs. 6. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA 1998), Universität Essen, 28.-30. September 1998, Shaker Verlag, Aachen, ISBN 3-8265-4287-8, Beitrag 38.1–38.6

**Wibel, W., 2009:** „Untersuchungen zu laminarer, transitioneller und turbulenter Strömung in rechteckigen Mikrokanälen“, *Wissenschaftliche Berichte Band 7462*, Verlag FZKA, 2009