

# Einsatz neuartiger Doppler-Signalverarbeitungstechniken zur Untersuchung von turbulenten Scherschichtströmungen

*Mathias Neumann, Katsuaki Shirai, Jürgen Czarske, TU Dresden*

Manuskripteingang: 13. Januar 2009; zur Veröffentlichung angenommen: 19. Januar 2009

Turbulenz ist eines der letzten Rätsel der klassischen Physik, das noch nicht vollständig geklärt ist. In diesem Beitrag wird eine neue Messtechnik vorgestellt, die zeitlich und örtlich hochaufgelöste Untersuchungen von Geschwindigkeiten turbulenter Scherströmungen ermöglicht.

**Schlagwörter:** Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor, Doppler-Signalverarbeitungstechnik, örtliche und zeitliche Korrelation, Taylor-Mikroskala, Grenzschichtströmung, Lorentzkraft

## Application of Novel Doppler-Signal Evaluation Techniques for the Investigation of Turbulent Shear Flows

Turbulence is one of the last riddles of classical physics which has not been solved completely up to now. In this article we present a novel measurement technique which allows spatially and temporally high-resolved velocity investigations in turbulent shear flows.

**Keywords:** Laser Doppler velocity profile sensor, Doppler-signal processing, two-point spatial and temporal correlation, Taylor microscale, boundary layer flows, Lorentz force

### 1 Einleitung

Für die Vermessung und genaue Analyse von turbulenten Strömungen ist eine hohe zeitliche und örtliche Auflösung unabdingbar für die Gewinnung präziser Daten. Gründe dafür sind, dass sowohl von einer schnellen Fluktuation der Geschwindigkeit innerhalb kürzester Zeit (im Mikrosekundenbereich) als auch von einer starken Dependenz bezüglich der Position (im Mikrometerbereich) ausgegangen werden kann. Mit dem neuartigen Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor [1; 2] ist es möglich, Strömungsprofile mit einer örtlichen Auf-

lösung im Mikrometerbereich und einem Messfehler der Geschwindigkeit kleiner 0,1% zu vermessen. Um hohe Burst-Signalraten, wie sie bei einer Strömung mit starkem Seeding (d. h. einer hohen Konzentration von Streuteilchen im Fluid) auftreten, auswerten zu können, wurde eine neuartige Signalverarbeitung implementiert, welche eine Datenrate von mehr als 1 kHz erlaubt. Dies bietet den Vorteil, dass nun die benötigte Verlässlichkeit für den Mittelwert, die Standardabweichung und insbesondere auch für die höheren Momente (Schiefe und Kurtosis) gewährleistet werden kann, für deren Berechnung etwa 10 000 Messwerte pro Slot (Messgebiet)

wünschenswert sind. Somit ist die Charakterisierung der Strömung mit hoher Präzision und Verlässlichkeit möglich.

## 2 Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor

Bei dem neuartigen Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor handelt es sich um eine Erweiterung des bekannten Laser-Doppler-Anemometers (LDA) [3], welcher statt einem zwei sich überlagende Interferenzstreifensysteme im Messgebiet erzeugt. Im Gegensatz zu gewöhnlichen LDA-Messsystemen, bei denen im gesamten Messgebiet von einem konstanten Streifenabstand ausgegangen werden kann, kommt beim Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor jedoch die Überlagerung eines konvergierenden und eines divergierenden Streifensystems zum Einsatz [1; 2]. Ein Streuteilchen, das sich durch das Messgebiet bewegt, sendet Streulicht aus, welches eine geschwindigkeitsabhängige Dopplerverschiebung aufweist. Durch die Nutzung zweier Streifensysteme erzeugt ein vom Sensor detektiertes Partikel zwei Doppler-Frequenzen  $f_{1,2}$ , welche in Kombination einen Rückschluss auf die axiale Position  $z$  im Messgebiet zulassen. Während der Kalibrierung mittels definierter Geschwindigkeit wird zunächst der Quotient  $q(z)$  aus den beiden an der jeweiligen Position  $z$  im Messgebiet gemessenen Doppler-Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  bestimmt:

$$q(z) = \frac{f_2(v_x, z)}{f_1(v_x, z)} = \frac{v_x(z)/d_2(z)}{v_x(z)/d_1(z)} = \frac{d_1(z)}{d_2(z)}. \quad (1)$$

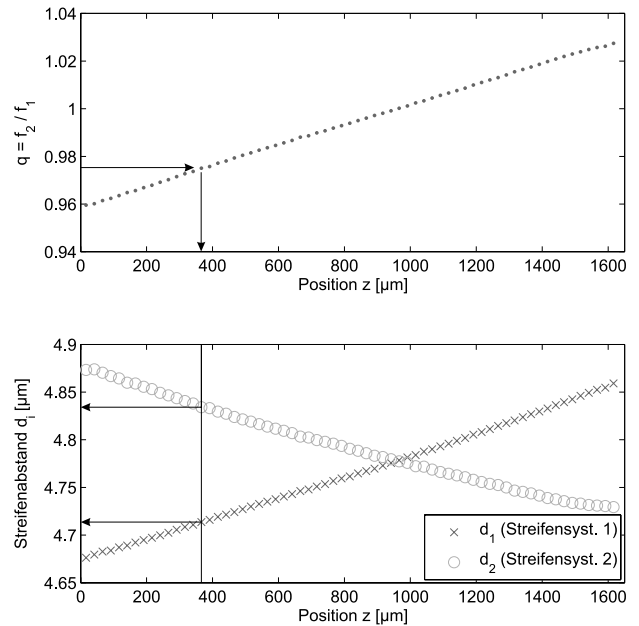
Bei bekannter Geschwindigkeit  $v_x$  wird der Streifenabstand ermittelt aus

$$d_i(z) = \frac{v_x}{f_i(v_x, z)}. \quad (2)$$

Allgemein lässt sich somit die Geschwindigkeit eines Partikels bei Kenntnis des Streifenabstands  $d_i$  ( $i = 1, 2$ ) durch folgenden Zusammenhang bestimmen:

$$v_x = f_1(v_x, z) \cdot d_1(z) = f_2(v_x, z) \cdot d_2(z). \quad (3)$$

Die somit erhaltene Kalibrierfunktion  $q(z)$  wird schließlich bei der Messung genutzt, um aus dem Quotienten der jeweils ermittelten Doppler-Frequenzen einen Rückschluss auf den Ort im Messgebiet zu erhalten, an dem das Partikel dieses durchquerte. Aus den bekannten Streifenabständen lässt sich dann die Geschwindigkeit des Streuteilchens errechnen. Dieser Zusammenhang ist grafisch in Bild 1 veranschaulicht.



**Bild 1:** Bestimmung der Position und Geschwindigkeit eines Partikels im Messgebiet.

**Figure 1:** Determination of position and velocity of a particle within the measurement area.

Um Schwierigkeiten bei den Messungen wie beispielsweise unterschiedliche Beugungswinkel von Laserstrahlen abweichender Wellenlängen beim Übergang zwischen optisch verschiedenen Medien (z. B. Luft/Wasser) zu unterbinden, wurde eine Frequenzmultiplextechnik verwendet [4]. Somit konnte erhöhter Justageaufwand bei Messungen in Fluiden reduziert werden. Aufgrund der möglichen hohen Ortsauflösung des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors, welche sich im Bereich kleiner 10 µm bewegt, sowie des geringen Geschwindigkeitsmessfehlers (kleiner als 0,1%) eignet sich der Sensor besonders für die Vermessung der Geschwindigkeit turbulenter Strömungen sehr gut. Es ist somit möglich, selbst kleinste Wirbel und Grenzschichten mit großen Geschwindigkeitsgradienten hochgenau aufzulösen.

## 3 Datenerfassung und -verarbeitung

Da das Messprinzip auf der Doppler-Frequenzverschiebung des von Partikeln im Messgebiet gestreuten Lichts basiert, ist die Genauigkeit und Geschwindigkeit der Signalverarbeitung ein wichtiger Aspekt des gesamten Messsystems. Die Auswertung der Doppler-Frequenz gibt Aufschluss über die Geschwindigkeit des Par-

tikels, welche, bei schlupffreier Bewegung der Partikel mit der Strömung, die Strömungsgeschwindigkeit repräsentiert. Dazu wird das separierte Streulicht auf einen Avalanche-Photodetektor (APD) geführt, welcher die Lichtintensität in ein dazu proportionales elektrisches Signal umwandelt, sodass es von einer A/D-Wandlertkarte für PCs aufgezeichnet werden kann. Als PC-Datenerfassungskarte kommt dabei eine 8-bit-Compuscope 22G8 (2 Kanäle, 1 GS/s, 500 MHz Bandbreite, 256 MByte) zum Einsatz, für die ein Signalwertalgorithmus in Matlab und C implementiert wurde. Die Kombination von PC-Messkarte und Auswertungsalgorithmus erlaubt eine wesentlich größere Flexibilität (bezüglich Abtastrate, Anzahl der Abtastpunkte, etc.) und höhere Präzision bei der Frequenzbestimmung als dies bei kommerziellen Burstprozessoren für die Laser-Doppler-Anemometrie möglich ist. Weiterhin ist es gelungen, eine Online-Datenrate von über 1 kHz zu erreichen. Darüber hinaus kann der Zeitpunkt eines Messereignisses mittels Zeitstempel festgehalten werden, wodurch erweiterte Auswertungen wie Korrelationsbestimmungen möglich sind (siehe Abschnitt 5).

Für eine möglichst genaue Frequenzbestimmung kann das Quadratur-Demodulationsverfahren zum Einsatz kommen. Im Allgemeinen kann das Zeitsignal eines Bursts in diskreter Form wie folgt beschrieben werden:

$$m(t_k) = A \cdot e^{-n(t_k-T)^2} \cdot \cos(2\pi f_d \cdot t_k + \varphi) \quad (4)$$

mit:  $A \dots$  Amplitude;  $f_s \dots$  Abtastfrequenz  
 $n \dots$  Breite des Bursts;  $f_d \dots$  Dopplerfrequenz  
 $T \dots$  Zeitpunkt des Bursts;  $\varphi \dots$  Phase  
 $t_k \dots$  diskrete Abtastzeitpunkte ( $t_k = k/f_s$ ).

Für die Fourier-Transformation eines Burstsignals  $M(f_g) = \mathcal{F}\{m(t_k)\}(f_g)$  folgt somit:

$$M(f_g) = \frac{A \cdot f_s}{2} \sqrt{\frac{\pi}{n}} \cdot e^{-\frac{\pi^2}{n}(f_d-f_g)^2 + j \cdot (2\pi(f_d-f_g)T + \varphi)} \quad (5)$$

Nach Entfernung des Gleichanteils lässt sich aus der zu einem Maximum im Spektrum gehörenden Frequenz die Dopplerfrequenz  $f_d$  des Burstsignals grob abschätzen. Nach einer inversen Fourier-Transformation des halbseitigen Spektrums ergibt sich das analytische Zeitsignal des Bursts zu

$$m_a(t_k) = m(t_k) + j \cdot m_H(t_k) \quad (6)$$

mit:  $m_H(t_k) \dots$  Hilbert-Transformierte ( $\mathcal{H}\{m(t_k)\}(t_k)$ ).

Bei dem erhaltenen analytischen Signal  $m_a(t_k)$  stimmen Real- und Imaginärteil bis auf eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  überein. Die Momentanphase  $\Phi(t_k)$  ergibt sich aus

$$\Phi(t_k) = \arctan \frac{m_H(t_k)}{m(t_k)} \quad (7)$$

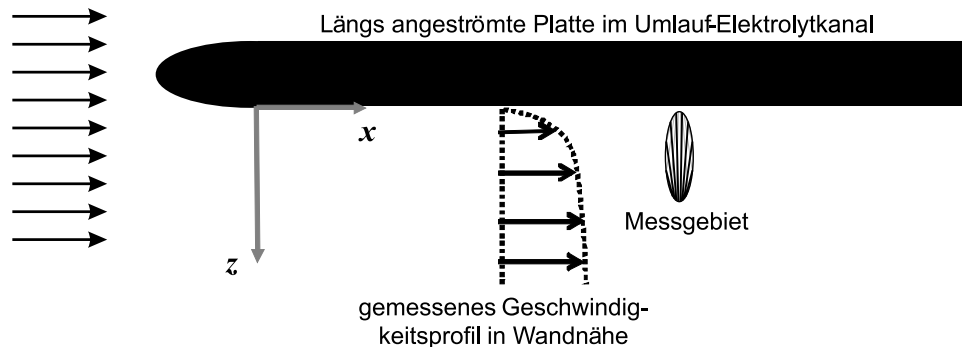
Die genaue Dopplerfrequenz  $f_d$  des Burstsignals kann schließlich aus einer Mittelung über die resultierenden Momentanfrequenzen wie folgt bestimmt werden [4]:

$$f_d = \frac{\bar{\omega}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \overline{\frac{d\Phi}{dt}} \right) \quad (8)$$

## 4 Vermessung von Strömungen mit Lorentzkrafteinfluss

Die Manipulation von schwach elektrisch leitfähigen Fluiden (z. B. Salzwasser) durch elektrische und magnetische Felder (Lorentzkraft) bietet interessante Möglichkeiten zur Beeinflussung insbesondere von Grenzschichtströmungen, um beispielsweise den Strömungswiderstand (cw-Wert) zu verringern oder die Strömungsablösungen zu steuern (siehe [5]). Für diese Anwendung, also die Untersuchung der Grenzschicht, bietet sich der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor an, da dieser eine Auflösung im Mikrometerbereich ermöglicht. Bei den nachfolgend dargestellten Messungen wurde das Strömungsprofil einer mittels Lorentzkraft beeinflussten Plattengrenzschicht untersucht, um eine Gegenüberstellung mit einem konventionellen Messsystem (PIV [6]) anhand von Vergleichsmessungen durchführen zu können. Darüber hinaus sollte das Verhalten der Plattengrenzschicht, insbesondere in Wandnähe, mit und ohne Lorentzkrafteinfluss genauer untersucht werden.

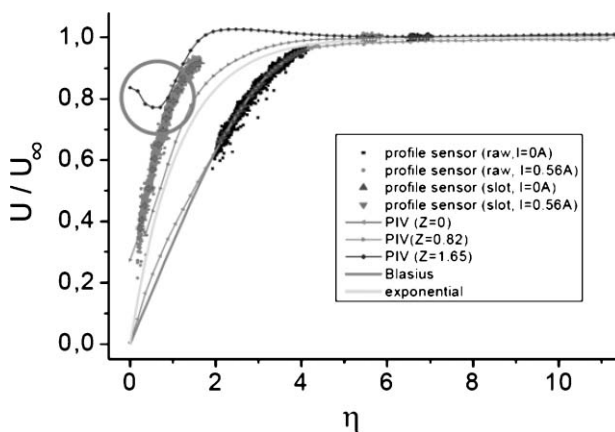
Der Versuchsaufbau, der aus einem Umlauf-Elektrolyt-Kanal des Forschungszentrums Dresden-Rossendorf besteht, ist in Bild 2 dargestellt. Als Liquid wurde Natronlauge mit einer spezifischen Leitfähigkeit von etwa 5 S/m verwendet. Zur Erzeugung der elektrischen und magnetischen Felder sind in Strömungsrichtung alternierend angeordnete Elektroden und Permanentmagnete in die Platte eingelassen. Zur Messung kam ein Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor mit Frequenzmultiplex und Streulichtdetektion in Rückwärtsrichtung zum Einsatz. Die Laserleistung im Messgebiet betrug ca. 120 mW und die Ortsauflösung betrug ca. 20 µm. Als Streuteilchen kamen 10 µm große silberbeschichtete Glashohlkugeln zum Einsatz. Die Messung fand dabei in einem Abstand von  $x = 785$  mm zur Plattenvorderkante statt, wobei die Anströmgeschwindigkeit 9,7 cm/s betrug. Daraus resultiert eine Reynoldszahl von  $Re_x = 7,6 \cdot 10^4$ . Die erhaltenen Geschwindigkeitsprofile mit und ohne Einprägung von Lorentzkraft sowie Vergleichsresultate aus Messungen mit Particle-Image-Velocimetry (PIV) sind in Bild 3 zu sehen. Aus den Messergebnissen ist zu erkennen, dass die Strömung



**Bild 2:** Versuchsaufbau und Messgebiet zur Vermessung der Plattengrenzschicht.  
**Figure 2:** Experimental setup and measurement area for the investigation of a boundary layer.

unter Lorentzkrafteinfluss einen steileren Geschwindigkeitsgradienten in Wandnähe im Gegensatz zur unbeeinflussten Strömung aufweist. Dies verdeutlicht die Möglichkeit der Absenkung des  $c_w$ -Wertes mittels Lorentzkraft.

Zu erkennen ist der deutlich unterschiedliche Geschwindigkeitsgradient bei vorhandenem und abgeschaltetem elektromagnetischen Feld. Die wandnächste Messung war etwa 1 mm von der Oberfläche entfernt, da die Streulichintensität der Wandreflexe mit geringem Abstand zur Wand zunehmen und schließlich die Burst-Signale komplett überlagern. Das Geschwindigkeitsprofil der Messungen ohne Lorentzkraft mittels



**Bild 3:** Normiertes Geschwindigkeitsprofil mit und ohne Lorentzkraft. Die Stromstärken  $I = 0,56 \text{ A}$  /  $I = 0 \text{ A}$  (Profilsensor) entsprechen dabei dem Parameter  $Z = 1/Z = 0$  (PIV); mit  $\eta = (z - z_0) \cdot \sqrt{\frac{u}{2\nu x}}$ .  
**Figure 3:** Normalized velocity profile with and without Lorentz force. The current  $I = 0.56 \text{ A}$  /  $I = 0 \text{ A}$  (profile sensor) are equivalent to the parameter  $Z = 1/Z = 0$  (PIV); with  $\eta = (z - z_0) \cdot \sqrt{\frac{u}{2\nu x}}$ .

Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor stimmt sehr gut mit den Ergebnissen der PIV-Messung sowie dem zu erwartenden theoretischen Blasius-Profil überein. Bei der Messung mit Lorentzkraft erkennt man eine deutliche Abweichung zwischen den erhaltenen Resultaten mittels Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor und PIV, wobei Letztere stark von dem zu erwartenden exponentiellen Verlauf abweichen (siehe roter Kreis), was unter anderem auf Wandreflexe zurückgeführt werden kann, welche die Intensitätsauswertung des PIV-Messsystems beeinträchtigen. Im Gegensatz dazu wird beim Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor der zeitliche Verlauf des Streulichsignals ausgewertet, wodurch eine korrekte Auswertung bis zu dem Wandabstand, bei dem die Wandstreulichreflexe die Streulichsignale der Partikel übersteigen, möglich ist (siehe auch [7]). Abschließend ist festzuhalten, dass die ersten Messungen erfolgreich die Vorteile des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors aufzeigen.

## 5 Korrelationsauswertungen

Die in turbulenten Strömungen auftretenden Wirbel, wie sie beispielsweise hinter einem umströmten Objekt (z. B. Wirtelschlepe eines Flugzeugs) beobachtet werden können, geben Auskunft über Eigenschaften der Strömung. Dabei steht vor allem die Untersuchung kleiner Wirbel, sogenannter „Small Eddies“, im Fokus, da diese für die Dissipation von kinetischer Energie in innere Energie (thermische Energie) durch Reibung verantwortlich sind. In der Strömungsmechanik werden diese kleinsten Wirbel mittels der Kolmogorov-Skala  $\eta$  charakterisiert. Eine Maßeinheit für die nächst größeren Wirbel, welche ihre Energie an die „Small Eddies“ abgeben, stellt die Taylor-Mikroskala  $\lambda$  dar. Um diese aus

Messungen zu bestimmen, nutzt man die Tatsache, dass die durch Wirbel verursachten Geschwindigkeitsfluktuationen  $u'$ , welche in der Strömung auftreten, gewisse Abhängigkeiten untereinander aufweisen. Ein Maß für diese Abhängigkeit stellt die normierte Korrelationsfunktion  $\rho(\Delta x, \tau)$  dar (siehe Gleichung (9)). Die mittlere Wirbelgröße (Taylor-Mikroskala) der Strömung ergibt sich dann zu

$$\rho(\Delta x, \tau) = \frac{\overline{u'(x, t) \cdot u'(x + \Delta x, t + \tau)}}{\sqrt{\overline{u'(x, t)^2}} \cdot \sqrt{\overline{u'(x + \Delta x, t + \tau)^2}}}, \quad (9)$$

wobei  $\Delta x$  die Verschiebung der beiden Detektionsgebiete zueinander und  $\tau$  die zulässige Zeitdifferenz (Lag-Zeit) zwischen den gemessenen Burst-Signalen, die in den zwei Messgebieten auftreten, repräsentieren. Der Zusammenhang zwischen Taylor-Mikroskala  $\lambda$  und Kolmogorov-Skala  $\eta$  kann mittels der Definition für die Integrale-Längenskala („Large Eddies“,  $L$ ) wie folgt hergestellt werden [8]:

$$L \equiv \frac{\sqrt{k^3}}{\varepsilon} \Leftrightarrow \lambda = \sqrt{10} \sqrt[3]{\eta^2 \cdot L}, \quad (10)$$

wobei  $k$  die turbulente kinetische Energie und  $\varepsilon$  die Dissipationsrate repräsentieren. Gilt für die Strömung, dass  $u' \ll \bar{u}$  (mit:  $u = \bar{u} + u'$ ; Geschwindigkeit wird separiert zu mittlerer Geschwindigkeit und fluktuierender Geschwindigkeitskomponente [Reynolds Dekomposition]), so kann die Taylor-Hypothese angewendet werden. Diese besagt, dass bei derartigen Strömungen die Geschwindigkeitsfluktuationen fast ungestört in zeitliche Fluktuationen übergehen, wenn sie aufgrund der Hauptströmung schnell durch das Messgebiet transportiert werden. Somit folgt:

$$t = \frac{x}{\bar{u}} \Rightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 = \frac{1}{\bar{u}^2} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)^2$$

$$\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right)^2 = \frac{2 \cdot \bar{u}^2}{\lambda_f^2}. \quad (11)$$

### 5.1 Zeitliche Korrelationsauswertung

An einer Zylindernachlaufströmung (Zylinderdurchmesser  $d = 2$  mm) wurden Messungen mit dem Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor durchgeführt. Die Anströmgeschwindigkeit betrug dabei 9,1 m/s, woraus sich eine Reynoldszahl von  $Re \approx 1200$ , eine abgeschätzte Strouhal-Zahl von 0,21 und somit eine charakteristische Wirbelfrequenz von 956 Hz ergibt. Ziel war es, zeitliche sowie örtlich-zeitliche Korrelationen in der Strömung zu untersuchen und daraus die o. g. Taylor-Mikroskala  $\lambda$  zu extrapolieren.

Die zeitliche Änderung der Geschwindigkeitsfluktuation ist im Allgemeinen leichter zu bestimmen, da nur Messungen an einer Position durchgeführt werden müssen und der zeitliche Verlauf der Geschwindigkeit direkt ausgewertet werden kann. Aus der ermittelten zeitlichen Korrelation lässt sich die longitudinale Taylor-Mikroskala  $\lambda_f$  mittels Parabelanpassung an die Korrelationskoeffizienten (um  $\tau = 0$ ) bestimmen. Die zeitliche Korrelation errechnet sich dabei wie folgt [9; 10]:

$$\rho(k \cdot \tau) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N u'_i \cdot u'_j \cdot b_k(t_i, t_j)}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N u'^2_i b_k(t_i, t_j)\right) \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N u'^2_j b_k(t_i, t_j)\right)}} \quad (12)$$

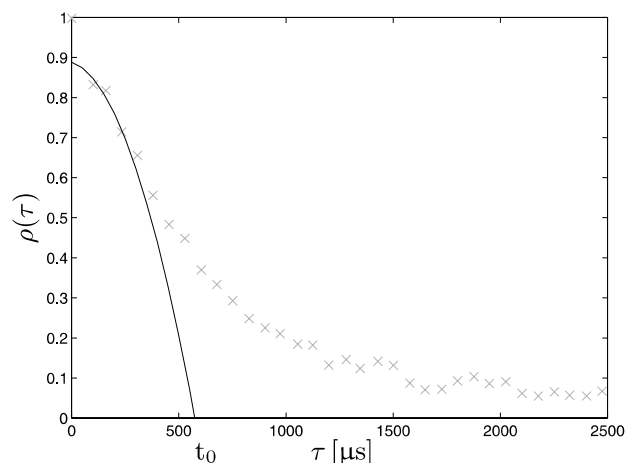
$$\text{mit } b_k(t_i, t_j) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{t_j - t_i}{\tau} - k \right| & \text{für } \left| \frac{t_j - t_i}{\tau} - k \right| \leq 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Aus den erhaltenen Messdaten mit Zeitstempel konnte die zeitliche Korrelation bestimmt werden (siehe Bild 4). Anhand einer Parabelanpassung um  $\tau = 0$  lässt sich daraus die longitudinale Taylor-Mikroskala  $\lambda_f$  wie folgt bestimmen:

$$\frac{\sqrt{2} \lambda_f}{\bar{u}} = t_0 \Leftrightarrow \lambda_f = \frac{550 \mu\text{s} \cdot 9,1 \text{ m/s}}{\sqrt{2}} = 3,53 \text{ mm}. \quad (13)$$

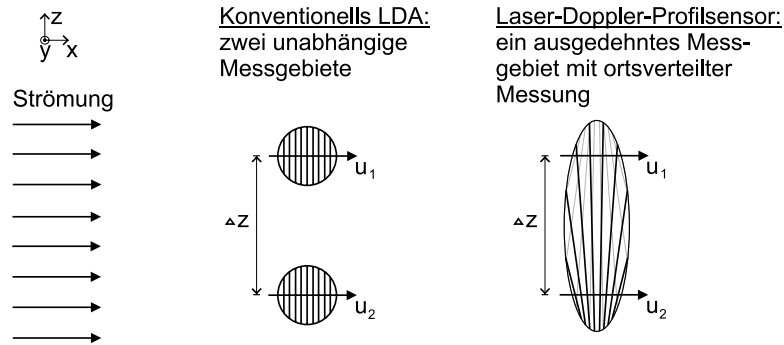
Im Falle einer lokal-isotropen Strömung lässt sich die transversale Taylor-Mikroskala  $\lambda_g$  aus der longitudinalen Taylor-Mikroskala  $\lambda_f$  wie folgt ermitteln:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_f}{\sqrt{2}} = \frac{3,53 \text{ mm}}{\sqrt{2}} = 2,5 \text{ mm}. \quad (14)$$



**Bild 4:** Zeitliche Korrelationsauswertung mit Parabelanpassung.

**Figure 4:** Temporal correlation estimation with fitted parabola.



**Bild 5:** Messung der örtlich-zeitlichen Korrelation mittels Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor.  
**Figure 5:** Measurement of spatial-time correlation with a laser Doppler velocity profile sensor.

### 5.2 Örtlich-zeitliche Korrelationsauswertung

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Taylor-Mikroskala ist die örtlich-zeitliche Korrelation. Dies erfordert jedoch bei herkömmlichen LDA-Systemen gleichzeitige Messungen mittels zweier Messgebiete, welche präzise zueinander positioniert und traversiert werden müssen. Da beim Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor eine präzise Ortsauflösung innerhalb des Messgebiets möglich ist, genügt ein Messgebiet. Ungenauigkeiten, welche durch Positioniermessfehler entstehen könnten, werden grundsätzlich vermieden (siehe Bild 5). Um eine örtlich-zeitliche Korrelation zu ermitteln, wird das Messgebiet in einzelne virtuelle Detektionsbereiche, sogenannte Slots, aufgeteilt. Die erhaltenen Messdaten, bestehend jeweils aus Geschwindigkeit  $u$ , Position  $z$  und Zeitstempel  $t$ , werden daraufhin den einzelnen Slots zugewiesen. Diese sollten für eine hohe Auflösung der Korrelationsfunktion möglichst klein gewählt werden. Dem gegenüber steht jedoch, dass die Datenmenge in den einzelnen Detektionsgebieten mit einer sinkenden Slotgröße verringert wird. Für die im Folgenden präsentierten Ergebnisse wurde eine Slotgröße von 200  $\mu\text{m}$  gewählt.

Die örtlich-zeitlichen Korrelationskoeffizienten werden dabei nach Gleichung (15) berechnet. Es wurde dabei eine maximale Lag-Zeit von  $\tau = 50 \mu\text{s}$  festgelegt, da diese als kleinste in der Strömung auftretende Zeitskala angenommen werden kann.

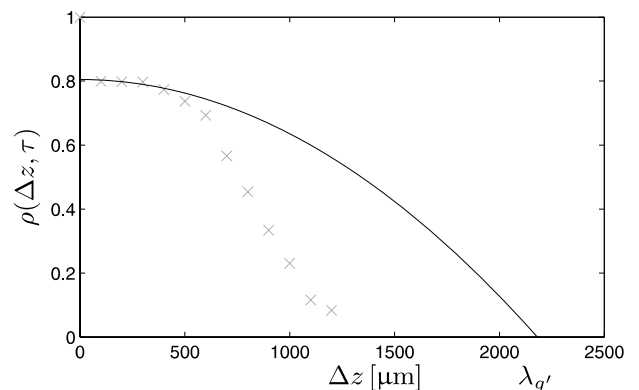
$$\rho(k \cdot \Delta z) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N u'_i(0) \cdot u'_j(\Delta z) \cdot b_k(t_i, t_j)}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N u_i'^2(0) b_k(t_i, t_j) \right) \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N u_j'^2(\Delta z) b_k(t_i, t_j) \right)}} \quad (15)$$

$$\text{mit } b_k(t_i, t_j) = \begin{cases} 1 & \text{für } \left| \frac{t_j - t_i}{\tau} \right| \leq 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Hierbei wurde die Korrelationsfunktion senkrecht zur Hauptströmungsrichtung ermittelt (siehe Bild 6). Die transversale Taylor-Mikroskala  $\lambda_{g'}$  (senkrecht zur Hauptströmungsrichtung) ergibt sich direkt aus dem Schnittpunkt der an die Korrelationsfunktion (um  $\Delta z = 0$ ) angepassten Parabel mit der Abszisse wie folgt:

$$\lambda_{g'} = 2,2 \text{ mm} \xleftrightarrow[\text{Gl. (14)}]{\text{analog}} \lambda_{f'} = \sqrt{2} \lambda_{g'} = 3,11 \text{ mm} . \quad (16)$$

Somit erhält man aus der Auswertung einer Messung gleichzeitig vier Taylor-Mikroskalen, ohne jegliche Traversierung durchführen zu müssen, was einen immensen Vorteil gegenüber der konventionellen LDA-Messtechnik darstellt. Von den vier ermittelten Taylor-Mikroskalen erhält man zwei (longitudinale und transversale) aus den zeitlichen Korrelationsauswertungen



**Bild 6:** Örtlich-zeitliche Korrelation mit Parabelanpassung.  
**Figure 6:** Spatial-time correlation with fitted parabola.

entlang der Hauptströmungsrichtung sowie weitere zwei aus den örtlich-zeitlichen Korrelationsauswertungen senkrecht zur Hauptströmungsrichtung. Dies wurde erst möglich durch die erreichten hohen Datenraten, welche bei den Messungen bei etwa 1 kHz lagen, sowie durch die Auswertung der Zeitstempel (Ankunftszeit der einzelnen Bursts).

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die optische Messtechnik erlaubt berührungslose Strömungsanalysen, die für die Validierung von numerischen Simulationen wie auch für die experimentelle Forschung von großer Bedeutung sind. Es wurden in diesem Beitrag neue Entwicklungen von einem Laser-Doppler-Profilsensor zur zeitlich und örtlich hochauflösenden Strömungsgeschwindigkeitsmessung vorgestellt.

Mit einer Ortsauflösung von ca. 20  $\mu\text{m}$  wurden Grenzschichtströmungen in einem Elektrolytkanal untersucht. Dabei konnte die Änderung des Geschwindigkeitsprofils durch Lorentzkräfte auch in Wandnähe erfasst werden. Diese Messungen werden für die Bestimmung des reibungsbedingten Widerstandskoeffizienten benötigt.

Um den deterministischen und stochastischen Charakter von turbulenten Strömungen zu untersuchen, wurden erstmals Korrelationsuntersuchungen mit einem Profilsensor vorgenommen. Dabei konnte die hohe Datenrate der neuen Signalverarbeitungstechnik von über 1 kHz vorteilhaft genutzt werden. Es konnten die Taylor-Mikroskalen mit örtlich-zeitlichen und zeitlichen Korrelationsuntersuchungen bestimmt werden. Dabei lassen sich durch eine Parabelanpassung an die Korrelationskoeffizienten die mittleren Wirbelgrößen der Strömung ermitteln.

Das Potenzial des neuartigen Geschwindigkeitsprofilsensors soll in Zukunft mit bildgebenden Erfassungen und höheren Datenraten in einen Fortschritt für die Strömungstechnik umgesetzt werden. Dabei wird ein 25-kanaliges Signalverarbeitungssystem zum Einsatz kommen, das durch die Parallelisierung der Messung zu einer weiteren Verbesserung der Orts- und Zeitauflösung führen soll.

### Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projekts (CZ 55/20-1). Außerdem gilt der Dank dem Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, insbesondere Dr. G. Gerbeth, Dr. T. Weier und Ch. Cierpka. Darüber hinaus danken die Autoren Dr. habil. H. Nobach für fruchtbare Anregungen bezüglich Korrelationsmessungen und -auswertungen. Abschließend sei Dr. L. Büttner und A. Voigt von der Pro-

fessur für Mess- und Prüftechnik der TU Dresden für die Unterstützung während der Messkampagnen gedankt.

### Literatur

- [1] Czarske, J.; Büttner, L.; Razik, T.; Müller, H.: *Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution*. Meas. Sci. Technol., Vol. 13, S. 1979–1989, 2002.
- [2] Czarske, J.; Büttner, L.; Razik, T.; Müller, H.: *Ortsaufgelöste Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilmessung*. tm – Technisches Messen, Vol. 70, S. 59–65, 2003.
- [3] Albrecht, H.-E.; Borys, M.; Damaschke, N.; Tropea, C.: *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Springer Verlag, Berlin, 2003.
- [4] Bayer, C.; Voigt, A.; Shirai, K.; Büttner, L.; Czarske, J.: *Interferometrischer Laser-Doppler-Feldsensor zur Messung der Geschwindigkeitsverteilung von komplexen Strömungen*. tm – Technisches Messen, Vol. 4, S. 224–234, 2007.
- [5] Weier, T.; Fey, U.; Gerbeth, G.; Mutschke, G.; Lielausis, O.; Platacis, E.: *Boundary layer control by means of wall parallel lorentz forces*. Magnetohydrodynamics, Vol. 37, S. 177–186, 2001.
- [6] Raffel, M.; Willert, C. E.; Wereley, S. T. and Kompenhans, J.: *Particle Image Velocimetry*. Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [7] Büttner, L.; Shirai, K.; Voigt, A.; Neumann, M.; Czarske, J.; Weier, T.; Cierpka, C.: *Anwendung des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors zur Vermessung elektro-magnetisch beeinflusster Elektrolytströmungen*. 16. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, S. 4.1–4.8, 2008.
- [8] Pope, S. B.: *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [9] van Maanen, H. R. E.; Tummers, M. J.: *Estimation of the auto correlation function of turbulent velocity fluctuations using the slotting technique with local normalization*. Proc 8th Int Symp on Appl of Laser Techn to Fluid Mech, 1995.
- [10] Nobach, H.; Müller, E.; Tropea, C.: *Efficient estimation of power spectral density from laser Doppler anemometer data*. Exp. in Fluids, Vol. 24, S. 499–509, 1998.



Die Autoren von links: J. Czarske, M. Neumann, K. Shirai.

**Dipl.-Ing. Mathias Neumann** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Mess- und Prüftechnik der Technischen Universität Dresden. Sein Hauptarbeitsgebiet ist die Weiterentwicklung der Strömungsmesstechnik mittels Laser-Doppler-Sensor und der zugehörigen Signalverarbeitung.

**Adresse:** TU Dresden – Professur für Mess- und Prüftechnik, Helmholtzstr. 18, 01062 Dresden,  
E-Mail: mathias.neumann@tu-dresden.de

**M. Sc. Katsuaki Shirai** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Mess- und Prüftechnik der Technischen Universität Dresden. Sein Hauptarbeitsgebiet ist die Weiterentwicklung der Strömungsmesstechnik mittels Laser-Doppler-Sensoren und deren Einsatz in der Praxis.

**Adresse:** TU Dresden – Professur für Mess- und Prüftechnik, Helmholtzstr. 18, 01062 Dresden,  
E-Mail: katsuaki.shirai@tu-dresden.de

**Prof. Dr. Jürgen Czarske** studierte Elektrotechnik und Physik, promovierte 1995 und habilitierte 2003 an der Universität Hannover. Er hat seit 2004 die Professur für Mess- und Prüftechnik an der Technischen Universität Dresden inne. Er erhielt den Messtechnik-Preis 2006 des Arbeitskreises der Hochschullehrer für Messtechnik e. V. (AHMT) und ist Korezipient des internationalen Berthold Leibinger Innovationspreises 2008 (3. Preis).

**Adresse:** TU Dresden – Professur für Mess- und Prüftechnik, Helmholtzstr. 18, 01062 Dresden,  
E-Mail: juergen.czarske@tu-dresden.de