

## MESSUNG DES INSTANTANEN GESCHWINDIGKEITSGRADIENTEN AN EINEM TURBULENTEN 2D-FREISTAHL BEI MITTLEREN BIS HOHEN REYNOLDSZAHLEN

M. Neumann\*, F. Graube\*, K. Shirai\*\*, L. Büttner\*, J. Czarske\*

Technische Universität Dresden

\*Professur für Mess- und Prüftechnik

Helmholtzstraße 18, D-01069, Dresden, Germany

E-mail: Mathias.Neumann@tu-dresden.de

\*\*Kobe University

Laboratory of Energy-Conversion Technology (MH-3)

Department of Mechanical Engineering

Rokkodai 1-1, Nada, 657-8501, Kobe, Japan

Keywords: Instantaner Geschwindigkeitsgradient, Zweipunkt-Korrelation, 2D-Strömung, Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor

### Abstract

In diesem Beitrag wird ein Messsystem präsentiert, welches in der Lage ist sowohl den instantanen Geschwindigkeitsgradienten als auch örtliche Korrelationsfunktionen in einer zweidimensionalen Düsenströmung hochpräzise zu erfassen. Das System basiert auf dem Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor (LDV-PS), welcher um eine Arraydetektion erweitert wurde, um zur gleichen Zeit Strömungsgeschwindigkeitsmessungen an verschiedenen Stellen der Strömung zu ermöglichen. Als Referenzmessinstrument kommt ein Hitzdrahtanemometer zum Einsatz, um die gewonnen Messdaten des LDV-PS validieren zu können. Es werden vergleichende Messergebnisse aus einer zweidimensionalen Düsenströmung bei Reynoldszahlen über 10.000 präsentiert. Durch die simultane Messung von mehreren Geschwindigkeiten an unterschiedlichen Positionen mit einem minimalen Abstand von ca. 20  $\mu\text{m}$  ist eine präzise Bestimmung des instantanen Geschwindigkeitsgradienten bzw. von Korrelationsfunktionen möglich.

### Einleitung

Bei der Untersuchung von hochturbulenten Strömungen bei großen Reynoldszahlen sind Informationen über den instantanen Geschwindigkeitsgradienten und örtliche Korrelationen von Interesse. Die Auswertung verlangt nach Messtechniken mit sehr hoher Ortsauflösung und geringer Geschwindigkeitsunsicherheit. Bisherige Experimente mit konventionellen Messtechniken, wie beispielsweise Multi-Sensor-Hitzdraht-Sonden oder Stereo-Particle-Image-Velocimetry, weisen Beschränkungen bzgl. der Ortsauflösung auf, was eine Auswertung der kleinskaligen Strukturen verhindert. Micro-PIV bietet dagegen eine ausreichende Ortsauflösung, kann aber aufgrund des geringen Arbeitsabstands nicht außerhalb der Strömung positioniert werden und würde die Strömung somit beeinflussen. Aus diesem Grund finden viele Untersuchungen bei geringen Reynoldszahlen statt, wobei keine voll entwickelte Turbulenz auftritt. Ein anderer negativer Aspekt ist, dass die aufgeführten konventionellen Messsysteme oft die kleinsten Skalen, also die Kolmogorov-Skala  $\eta$ , nicht korrekt auflösen können, da ihre Ortsunsicherheit oft ein Vielfaches dieser beträgt (siehe Wallace und Vukoslavcevic 2010). Auch wurden in der Vergangenheit oft Laser-Doppler-Anemometer (LDA) eingesetzt, die aber ebenso über eine

beschränkte örtliche Auflösung, größer als  $50 \mu\text{m}$ , verfügen. Oft kamen dabei Messsysteme zum Einsatz, die über ein ausgedehntes Messvolumen verfügen, welches dann in mehrere Detektionsvolumina unterteilt und separat beobachtet wird. Eriksson und Karlsson 1995, Belmabrouk und Michard 1998, Benedict and Gould 1999 sowie Ducci und Yianneskis 2005 nutzten derartige Messsysteme. Es stellte sich jedoch heraus, dass der entstehende Überlappungsbereich der verschiedenen Detektionsvolumina ein Limit für die Auswertung beispielsweise von Korrelationen darstellt (Benedict und Gould 1999). Diese Feststellung ist konsistent mit den Ergebnissen von Eriksson und Karlsson 1995, die eine örtliche Auflösung im Bereich der Kolmogorov-Längenskala  $\eta$  für notwendig erachten, um eine korrekte Auflösung der kleinsten Skalen zu ermöglichen. Da die Ortsauflösung von LDA Systemen durch deren Mess-/Detektionsvolumengröße gegeben ist, kann dieser Anforderung nur bedingt, also nur bei geringen Reynoldszahlen, Rechnung getragen werden.

Um die dargelegten Herausforderungen zu überwinden wurde ein Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor genutzt, da er eine örtliche Auflösung innerhalb des Messvolumens von bis zu  $1 \mu\text{m}$  bietet. Durch den Einsatz einer Array-Detektion, wie von Neumann et al. 2012 vorgestellt, wird zusätzlich das Messvolumen in mehrer Detektionsvolumina unterteilt. Resultierend sind simultane Geschwindigkeitsmessungen an verschiedenen Positionen des Messvolumens möglich, ohne dabei die hohe Ortsauflösung des LDV-PS zu reduzieren. Somit können Messinformationen über den instantanen Geschwindigkeitsgradienten oder Korrelationsfunktion gewonnen werden, wobei die Ortsauflösung im Bereich der Kolmogorov-Skala  $\eta$  liegt.

Besonders erwähnenswert ist zudem die untersuchte zweidimensionale Düsenströmung. Während achssymmetrische Düsenströmungen intensiv untersucht worden und gut verstanden sind, sind Strömungen, bei denen das Fluid aus einer nicht-achsymmetrischen Düse austritt (zweidimensionale Düsenströmung), von besonderem Interesse, da mit ihnen einige fundamentale Fragen turbulenter Strömungen verknüpft sind. Beispielsweise kann eine zweidimensionale Düsenströmung als eine Überlagerung zweier ebener Mischungsschichten betrachtet werden. Die zweidimensionale Scherschicht ist eine der wenigen idealen Strömungskonfigurationen, an denen interessante strömungsmechanische Aspekte untersucht werden können. Die Strömung ist anfänglich laminar und geht über Transition in einen vollständig turbulenten Zustand mit Selbstähnlichkeiten im Fernfeld über, wobei dieser unabhängig von den Anfangsbedingungen (Einlauf, Form der Düse) ist.

## Messsystem und experimenteller Aufbau

Als Messsystem für die Erfassung des Strömungsfeldes kam ein erweiterter Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor zum Einsatz (Neumann et al. 2009), der auf einem divergenten und einem konvergenten Streifensystem beruht (siehe Abb.1-links).

Durch den Einsatz eines Glasfaserarrays in der Detektionsoptik des LDV-PS (Neumann et al. 2012) ist es möglich Streulichtsignale aus verschiedenen Bereichen des Messvolumens separat zu erfassen (siehe Abb. 1-rechts). Somit ist es mit dem Array-LDV-PS möglich parallele Messungen an verschiedenen Positionen innerhalb der Strömung durchzuführen ohne die Ortsauflösung zu verringern.

Zur Kalibrierung des LDV-PS wird eine  $2 \mu\text{m}$  Lochblende genutzt, welche auf einer rotierenden Scheibe montiert ist und sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{\text{ref}}$  bewegt. Die so erzeugte tangentielle Referenzgeschwindigkeit  $v_{x,\text{ref}}$  wird genutzt um die Kalibrierkurve  $q(y)$  anhand der beiden erzeugten Dopplerfrequenzen  $f_{d1}$  und  $f_{d2}$  wie folgt zu ermitteln

$$q(z) = \frac{f_{d2}(v_x, z)}{f_{d1}(v_x, z)} = \frac{v_{x,\text{ref}}/d_2(z)}{v_{x,\text{ref}}/d_1(z)} = \frac{d_1(z)}{d_2(z)}. \quad (1)$$

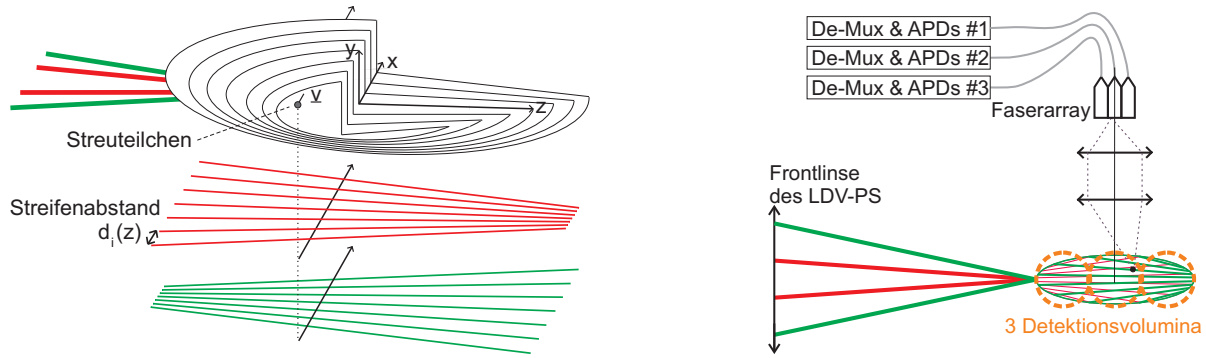


Abb. 1: Links: Zwei überlagerte Streifensysteme bilden den LDV-PS zur Ermittlung von  $v_x(z)$ . Rechts: Experimentelles Vorgehen bei den HWA und LDV-PS Messungen an der 2D-Düsenströmung.

Anhand der bekannten Referenzgeschwindigkeit während der Kalibrierung berechnet sich der Streifenabstand  $d_i$  mittels

$$d_i(z) = \frac{v_{x,\text{ref}}}{f_i(v_{x,\text{ref}}, z)} = \frac{\omega_{\text{ref}} \cdot r}{f_i(v_{x,\text{ref}}, z)} = \frac{2\pi \cdot f_{\text{ref}} \cdot r}{f_i(v_{x,\text{ref}}, z)}. \quad (2)$$

Über die Kalibrierfunktion kann dann bei den anschließenden Messungen mittels Frequenzenquotient auf die axiale Position  $z$  zurückgeschlossen werden, an der das Seedingpartikel das Messvolumen durchquerte. Schließlich lässt sich auch dessen tangentielle Geschwindigkeit mit folgender Gleichung berechnen

$$v_x(z) = f_{d1}(v_x, z) \cdot d_1(z) = f_{d2}(v_x, z) \cdot d_2(z). \quad (3)$$

Aus den Kalibrierdaten und bei Testmessungen wurde mit dem LDV-PS eine Ortsauflösung von  $\sigma_z = 5,3 \mu\text{m}$  erreicht. Die relative Geschwindigkeitsunsicherheit des Messsystems lag bei 0,1%. Der Profilsensor steht in einem  $90^\circ$ -Winkel zur Hauptströmungsrichtung. Die Detektion erfolgt von oben. Durch den Einsatz von drei Detektionsfasern werden jeweils einzelne Bereiche des Messvolumens, sogenannte Detektionsvolumina, separat beobachtet (siehe Abb. 1-rechts). Dies wird durch den Einsatz eines Kepler-Teleskops mit dem Abbildungsverhältnis 20/75. Somit werden die Streulichtsignale aus jeweils ca. 1/3 des Messvolumens von einer der  $400 \mu\text{m}$  Fasern erfasst (siehe Abb. 1-rechts). Durch minimale Dejustage des Kepler-Teleskops wird eine geringe Überschneidung der Detektionsvolumina erreicht, sodass eine Beobachtung des gesamten Messvolumens ermöglicht wird.

Neben dem LDV-PS kommt zur Validierung der Messergebnisse und zur vollständigen Beschreibung der Strömung ein Hitzdrahtanemometer (HWA, engl. hot wire anemometry) zum Einsatz, welches nach dem Prinzip der konstanten Temperatur arbeitet. Der verwendete Einzelhitzdraht weist einen Durchmesser von  $5 \mu\text{m}$  und eine Länge von  $1,25 \text{ mm}$  auf (Typ 55P11 der Firma Dantec Dynamics). Die Halterung wird kollinear mit der Strömung montiert, sodass die Strömungsgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung gemessen werden kann. Zur Kalibrierung des Systems wurde ein konventionelles LDA verwendet.

Die Messungen werden an einem zweidimensionalen Strahl durchgeführt. Dieser wurde erzeugt indem das Strömungsmedium, in diesem Fall Luft unter Umgebungsbedingungen, durch eine konturierte Düse mit einem großen Öffnungsverhältnis austritt. Durch die bei den Experimenten zum Einsatz kommende schlitzförmige Austrittsöffnung, mit den Abmessungen  $100 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  (Höhe  $h$  x Breite  $b$ ), ergibt sich für das Öffnungsverhältnis der Wert 50. Der Vorteil des zweidimensionalen Strahls liegt darin, dass eine der Messpositionen, im Falle des

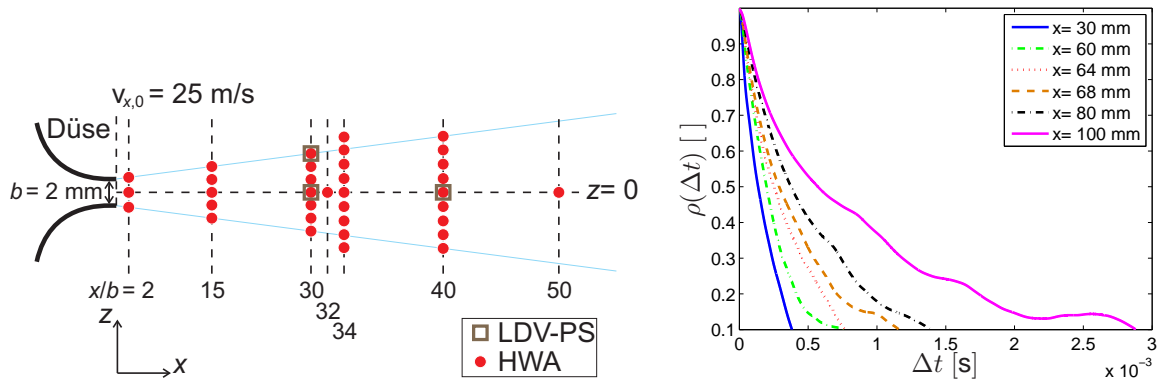


Abb. 2: Links: Zwei überlagerte Streifensysteme bilden den LDV-PS zur Ermittlung von  $v_x(z)$ . Rechts: Vergleich eines konventionellen Messsystems (LDA) mit dem Array-LDV-PS.

vertikalen Schlitzes die Höhe, frei gewählt werden kann, da in dieser Richtung keine Variation der Strömung zu erwarten ist. Die für die Experimente verwendete Düse ist an einem kleinen Windkanal befestigt, welcher aus einem Diffuser, Strömungsumrichtern und Strömungsgittern sowie der Düse besteht.

Schwerpunkt bilden Messungen im Bereich der Selbstähnlichkeit, welche nach Davidson 2004, ab einem Abstand von 30 mal der Düsenbreite  $b$  voll ausgebildet ist. Entsprechend werden die meisten Messungen im Bereich  $30 \leq x/b \leq 50$  durchgeführt. Die Messpositionen für den Hitzdraht und den Profilsensor sind in Abb. 2 dargestellt. Zunächst sollen im Zentrum der Strömung, bei  $z = 0$ , vergleichende Messdaten gesammelt werden, um dann, nach erfolgreicher Validierung, mit dem Array-LDV-PS in der Scherschicht Korrelationen und den instantanen Geschwindigkeitsgradienten zu bestimmen.

### Strömungstheorie

Aus den Ergebnissen der Messungen mit dem Hitzdraht werden die Skala von Kolmogorov  $\eta$  und die Taylor Mikroskala  $\lambda$  bestimmt, welche der Ausdehnung der kleinsten bzw. mittleren Wirbel in der Strömung entsprechen. Da das Hitzdrahtsystem die Änderung der Geschwindigkeit über die Zeit, nicht aber über dem Ort detektiert, sind verschiedene Annahmen notwendig, um die Skalen zu bestimmen. Zum Einen muss für die Bestimmung der örtlichen Ableitung die Hypothese der eingefrorenen Turbulenz von Taylor gültig sein, welche sich durch folgende Gleichung beschreiben lässt (Pope 2000)

$$\left( \frac{\partial v_x}{\partial t} \right) \cdot \frac{1}{\bar{v}_x} = \frac{\partial v_x}{\partial x}. \quad (4)$$

Diese Gleichung gilt nur im Fall isotroper Turbulenz. Isotrope Turbulenz liegt vor, wenn die Geschwindigkeitsfluktuationen in jeder Raumrichtung gleich sind. Somit lässt sich der zeitliche Strömungsverlauf in einen örtlichen wie folgt umrechnen

$$\Delta x = \bar{v}_x \cdot \Delta t. \quad (5)$$

Außerdem wird zur Bestimmung der Skala von Kolmogorov  $\eta$  die Dissipationsrate  $\epsilon$  entsprechend Gl. (6) in Abhängigkeit von der Viskosität  $\nu$  des Mediums wie folgt abgeschätzt

$$\epsilon = 15\nu \cdot \left\langle \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 \right\rangle. \quad (6)$$

Abschließend lassen sich die Längen-  $\eta_l$  und Geschwindigkeitsskalen  $v_\eta$  von Kolmogorov wie folgt berechnen (siehe Albrecht et al. 2003)

$$\eta_l = \left( \frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4}, \quad v_\eta = (\nu\epsilon)^{1/4}. \quad (7)$$

Aus den gewonnenen Strömungsgeschwindigkeitsfluktuationen  $v'_i$  an der Messposition  $\mathbf{r}$  wird allgemein die örtlich-zeitliche Korrelation  $\rho_{ij}(\Delta k, \Delta t)$  wie folgt berechnet

$$\rho_{ij}(\Delta k, \Delta t) = \frac{\overline{v'_i(\mathbf{r}, t) \cdot v'_j(\mathbf{r} + \Delta k \cdot \mathbf{e}_k, t + \Delta t)}}{\sqrt{\{v'_i(\mathbf{r}, t)\}^2} \cdot \sqrt{\{v'_j(\mathbf{r} + \Delta k \cdot \mathbf{e}_k, t + \Delta t)\}^2}}, \quad (8)$$

wobei  $i, j, k$  die untersuchten Koordinaten repräsentieren.

### Messergebnisse

Zunächst wurden Hitzdrahtmessungen an den in Abb. 2-links gekennzeichneten Positionen durchgeführt um die Strömung zu charakterisieren. Unter Annahme der Gültigkeit von Gl. (4) & (6) wurden aus den Messergebnissen die entsprechenden Kolmogorov Skalen laut Gl. (7) bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 dargestellt. Wie zu ersehen ist liegt die Kolmogorov-

Tabelle 1: Skalen von Kolmogorov an den verschiedenen Messpositionen

Messposition $x/b$	mittlere Geschwindigkeit $\overline{v_x}$ [m/s]	$\eta_l$ [ $\mu\text{m}$ ]	$v_\eta$ [m/s]
30	9,79	7,80	1,53
32	9,69	7,65	1,61
34	9,52	7,62	1,61
40	9,28	7,55	1,63
50	8,34	7,46	1,65

Längenskala  $\eta_l$  im Bereich von ca. 7,5  $\mu\text{m}$ . Somit steht mit dem Array-LDV-PS ein Messsystem zur Verfügung, dessen Ortsauflösung um den Faktor 1,5 kleiner als die Kolmogorov-Längenskala der zu vermessenden Strömung ist. Auch der Profilsensor liefert die Skala von Kolmogorov  $\eta_l$  wobei jedoch der Geschwindigkeitsgradient direkt über die örtliche Ableitung der gemessenen Geschwindigkeit ermittelt werden kann, ohne die Hypothese der eingefrorenen Turbulenz anwenden zu müssen. Bestimmt wurde die Kolmogorovskala auf der Mittelachse ( $z = 0$ ) bei einem Abstand von  $x/b = 30$  und  $x/b = 40$  zur Düse. Der Vergleich ist in Tab. 2 dargestellt und zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen HWA und Profilsensor. Zu beachten ist, dass die Messungen nacheinander durchgeführt wurden, wodurch sich auch eine Variation der mittleren Strömungsgeschwindigkeit ergab, was die leichten Abweichungen erklärt. Die von den verschiedenen Messsystemen ermittelten Skalen stimmen gut überein.

Tabelle 2: Skalen von Kolmogorov an den verschiedenen Messpositionen

Messsystem	Messposition $x/b$	$\overline{v_x}$ [m/s]	$\eta_l$ [ $\mu\text{m}$ ]	$v_\eta$ [m/s]
HWA	30	9,8	7,8	1,5
Array-LDV-PS	30	11,4	7,1	1,2
HWA	40	9,5	7,6	1,6
Array-LDV-PS	40	10,5	8,8	1,1

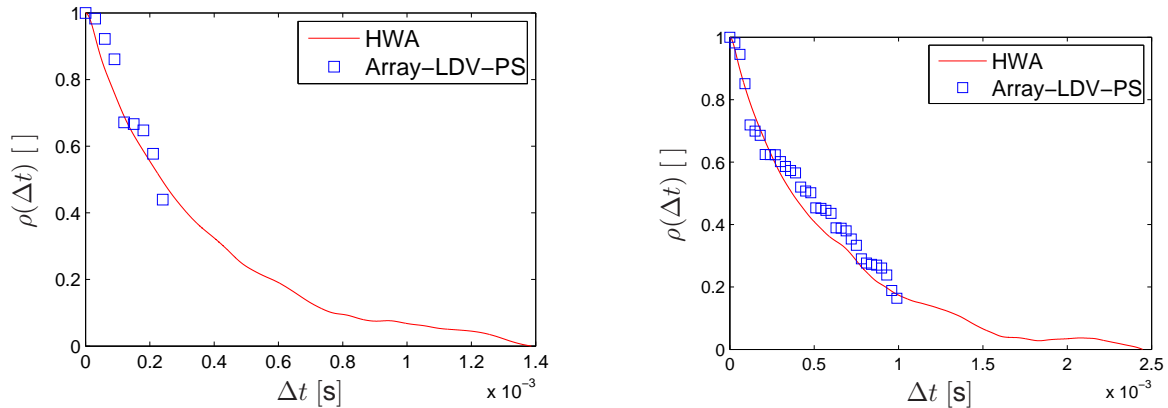


Abb. 3: Korrelationsfunktionen von HWA und Array-LDV-PS an den Position  $z = 0$  und  $x/b = 30$  (links) bzw.  $z = 0$  und  $x/b = 40$  (rechts).

Zur Validierung des Array-LDV-PS wurden weiterhin die im Zentrum, also bei  $z = 0$  und  $x/b = 30$  bzw.  $x/b = 40$ , gewonnen Korrelationsmessdaten mit denen des HWA verglichen. Dazu wurden die örtlichen Messdaten des Array-LDV-PS zunächst entsprechend Gl. (5) in zeitliche umgewandelt. Dabei wurde eine effektive Ortsauflösung, welche durch Slot-Techniken bestimmt ist, von  $20 \mu\text{m}$  erreicht. Aufgrund der isotropen Turbulenz der Strömung ist zu erwarten, dass die Korrelationsfunktion  $\rho$  der jeweiligen Messsysteme, welche entsprechend Gl. (8) bestimmt werden, identisch verlaufen. Das Ergebnisse für die beiden Messpositionen ( $x/b = 30$  bzw.  $x/b = 40$ ) sind in in Abb. 3 (links bzw. rechts) dargestellt. Aus den in den ersten Experimenten gewonnen Messdaten an der Position  $x/b = 30$  konnte, aufgrund der noch zu geringen Datenmenge, nicht der komplette Verlauf der Korrelationsfunktion mit dem Array-LDV-PS rekonstruiert werden. Durch längere Messungen and der zweiten Position konnte dieser Mangel weitestgehend behoben werden. Der Array-LDV-PS liefert im Zentrum der Strömung übereinstimmende Ergebnisse bzgl. der Korrelationsfunktion und Skalenbestimmung mit denen des HWA. Damit ist nach Abschluss der Validierung im Zentrum ein verlässlicher Einsatz in der Scherschicht möglich, in der das Hauptaugenmerk auf der Vermessung des instantanen Geschwindigkeitsgradienten sowie von Korrelationsfunktion liegt.

Die Erfassung örtlicher Strukturen soll anhand der instantanen Geschwindigkeitsprofile geschehen, wobei für jedes Detektionsvolumen möglichst gleichzeitig je ein Partikel ausgewertet wird. Der instantane Geschwindigkeitsgradient,  $du/dz$ , kann direkt mittels Profilsensor erfasst werden. Aufgrund der Array-Detektion sind zeitgleiche Messungen der Strömungsgeschwindigkeit an mehreren Positionen innerhalb der Strömung möglich. Ziel ist es simultane Messwerte mit einem minimalen örtlichen Abstand von unter  $25 \mu\text{m}$  erreichen.

### Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde mit dem Array-LDV-PS ein Messsystem präsentiert, welches in der Lage ist den instantanen Geschwindigkeitsgradienten und örtliche Korrelationsfunktionen hochpräzise zu erfassen. Es wurden weiterhin Vergleichsmessungen mit einem HWA im isotropen Bereich einer zweidimensionalen Strömung vorgestellt. Die Messergebnisse stimmen sehr gut überein, sodass damit eine Validierung des Array-LDV-PS durchgeführt werden konnte.

Zukünftig soll der Array-LDV-PS nun im turbulenten Scherschichtbereich eingesetzt werden um dort direkt Geschwindigkeitsgradienten erfassen und turbulente Skalen aufzulösen. In diesem Bereich der Strömung können jedoch keine Vorannahmen über deren Verhalten getroffen



werden (isotrope Turbulenz, Taylor Hypothese). Somit können die gewünschten Informationen dort nicht mittels einfachem HWA Messsystem erzielt werden, da simultane Mehrpunktmessungen nötig sind. Diese können, wie demonstriert, mittels Array-LDV-PS gewonnen werden. Das Messsystem bietet somit ein großes Potential für die Turbulenzforschung und wäre zukünftig durch Erweiterung zum mehrkomponentigen und mehrdimensionalen Sensors in der Lage die Dissipationsrate in komplexen, sehr turbulenten Strömungen hochgenau zu bestimmen.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Forschungsarbeiten durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (CZ55/20-2).

## Literaturverzeichnis

- Albrecht, H.-E., Borys, M., Damaschke, N., Tropea, C., 2003, "Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques", Springer - Berlin
- Belmabrouk, H., Michard, M., 1998: "Taylor length scale measurement by laser Doppler velocimetry", *Exp. Fluids*, Vol. 25, pp. 69–76
- Benedict, L.H., Gould, R.D., 1999: "Understanding biases in the near-field region of LDA two-point correlation measurements", *Exp. Fluids*, Vol. 26, pp. 381–388
- Ducci, A., Yianneskis, M., 2005: "Analysis of errors in the measurement of energy dissipation with two-point LDA", *Exp. Fluids*, Vol. 38, pp. 449–460
- Eriksson, J.G., Karlsson, R.I., 1995: "An investigation of the spatial resolution requirements for two-point correlation measurements using LDV", *Exp. Fluids*, Vol. 18, pp. 393–396
- Neumann, M., Shirai, K., Büttner, L., Czarske, J., 2009, "Two-point correlation estimation of turbulent shear flows using a novel laser Doppler velocity profile sensor", *Flow Meas. Instr.*, Vol. 20, pp. 252–263
- Neumann, M., Shirai, K., Büttner, L., Czarske, J., 2012, "A novel laser Doppler array sensor for measurements of micro-scale velocity correlations in turbulent flows", zur Veröffentlichung angenommen, *Flow Meas. Instr.*
- Pope, S.B., 2000: "Turbulent Flows", Cambridge: Cambridge University Press
- Wallace, J. M. und Vukoslavcevic, P. V., 2010: "Measurement of the Velocity Gradient Tensor in Turbulent Flows", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 42, pp. 157–181
- Davidson, P. A., 2004: "Turbulence: an introduction for scientists and engineers", Oxford University Press - USA