

ENTWICKLUNG EINER ECHT – DREIDIMENSIONALEN PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

St. Hickel, E. Augenstein, C. Egbers

Lehrstuhl Aerodynamik und Strömungslehre (LAS), Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus,
Universitätsplatz 3-4, 03044 Cottbus, Germany, E-Mail: stefan.hickel@gmx.net

Einleitung

Die vorgestellte neue Messtechnik [Hickel 2003] gehört zur Particle Image Velocimetry (PIV) und eignet sich zur Vermessung echt dreidimensionaler Strömungsfelder in transparenten Fluiden mit hohen bis sehr hohen Partikelkonzentrationen. Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Varianten ist, dass alle Komponenten der Geschwindigkeitsvektoren (3C) in einem in drei Raumrichtungen (3D) ausgedehnten Feld zum gleichen Zeitpunkt vermessen werden können.

Neben dem reinen messtechnischen Fortschritt besteht ihre besondere Bedeutung im möglich gewordenen Vergleich mit numerischen Simulationen von instationären dreidimensionalen Strömungen. Die Anforderungen zu deren Validation können ein- und zweidimensionale Strömungsmesstechniken, wie die klassische Particle Image Velocimetry [Raffel 1998] nicht erfüllen. Auch die den aktuellen Stand der Technik darstellende Stereo PIV [Prasad 2000] und die zur Messung der Gradienten hiervon abgeleitete Dual Plane Stereo PIV [Hu 2001] sind durch die Beschränkung auf eine Ebene nur bedingt geeignet.

Prinzipien der neuen Methode

Farbraumkodierung durch mehrfarbigen Lichtschnitt: Zur hochaufgelösten Messung der dritten Orts- und Verschiebungscoordinate wird ein mehrfarbiger Lichtschnitt gemäß Abbildung 1 verwendet, dessen lokale Wellenlänge eine (quasi-) stetige und invertierbare Funktion der Ortscoordinate in Normalenrichtung ist. Da die Streuung an den mit der Strömung bewegten Partikeln elastisch erfolgt, erlaubt die von der Kamera aufgezeichnete Streulichtfarbe die Zuordnung des Partikels zu einer bestimmten Lichtschnittebene. In [Cenedese 1989] wurde ein ähnliches Prinzip, allerdings für eine PTV, vorgeschlagen.

Dicker Lichtschnitt: Die bei nicht-scannenden PIV bisher übliche Beschränkung auf lediglich eine für die Messung erfassbare Ebene wird aufgehoben, indem der Lichtschnitt auch in der zur Mittelebene normalen Richtung expandiert wird, bis der gleichzeitig beleuchtete Raumbereich in allen Richtungen Ausdehnungen der gleichen Größenordnung besitzt.

Farbkamera: Das Streulicht der Tracer-Partikel wird zu zwei Zeitpunkten mit einer für PIV geeigneten Kamera mit Farb-CCD-Chip fotografiert.

Berechnung der 3D-Aufenthaltswahrscheinlichkeit: Auf der Basis eines den Lichtschnitt kennzeichnenden funktionalen Zusammenhangs kann für jedes Partikelbild eine wahrscheinlichste dritte Ortscoordinate aus der Frequenz des Streulichtes ermittelt werden. Zusammen mit der Gesamtintensität des Streulichtes und einer Ansatzfunktion wird die Aufenthaltswahrscheinlichkeit im umgebenden dreidimensionalen Raum berechnet. Die Überlagerung der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten aller abgebildeten Partikel ergibt ein dreidimensionales Skalarfeld, das anstelle des üblichen zweidimensionalen schwarzweißen Bildes die Grundlage der Korrelation bildet.

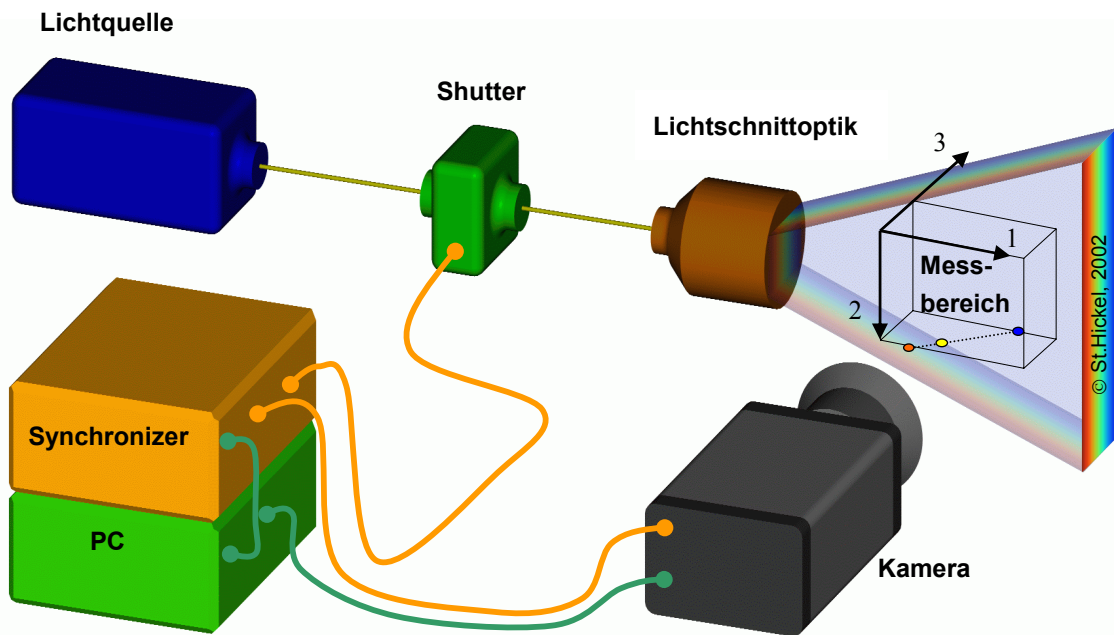


Abbildung 1 : Der vergleichsweise einfache und preiswerte Messaufbau entspricht in den Grundzügen der klassischen 2D-2C PIV, ist aber darüber hinaus gekennzeichnet durch eine einzige Farb-CCD-Kamera und einen sehr dicken, kontinuierlich-mehrfarbigem Lichtschnitt.

Dreidimensionale Korrelation - Interrogation Cubes: Die Berechnung der drei Komponenten eines Geschwindigkeitsvektors erfolgt durch die räumliche Kreuzkorrelation von Teilbereichen des berechneten dreidimensionalen Bildes (bzw. Wahrscheinlichkeitsfeldes) auf der Basis einer Transformation in den Frequenzbereich. Für einen solchen auswertbaren Raumbereich wird in dieser Arbeit der Name „Interrogation Cube“ gefunden. Da ein Interrogation Cube im Regelfall in keiner Raumrichtung das gesamte Bild enthält, können (wie in Abbildung 2 gezeigt wird) für mehrere neben-, über- und hintereinander liegende Orte mit einer individuellen Datengrundlage dreidimensionale Geschwindigkeitsvektoren berechnet werden.

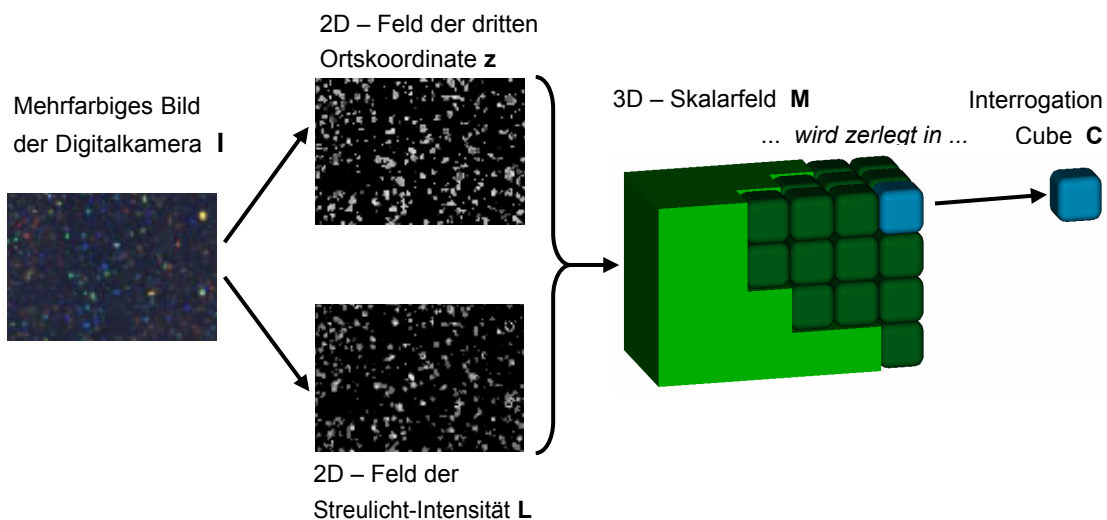


Abbildung 2 : Verfahren zur Datengewinnung für die erstmals in der PIV angewendete dreidimensionale Korrelation. Es wird schematisch die Berechnung des auszuwertenden dreidimensionalen Intensitätsfeldes M und dessen Zerlegung in Interrogation Cubes C gezeigt.

Kalibrierung

Durch Kalibrierung wird einer Menge von Raumpunkten des Objektraumes jeweils ein Geschwindigkeitsvektor zugeordnet. Da die Korrelation im Bildraum erfolgt und optische Verzerrungen und eine besonders starke perspektivische Wirkung auftreten, ist die Kenntnis der

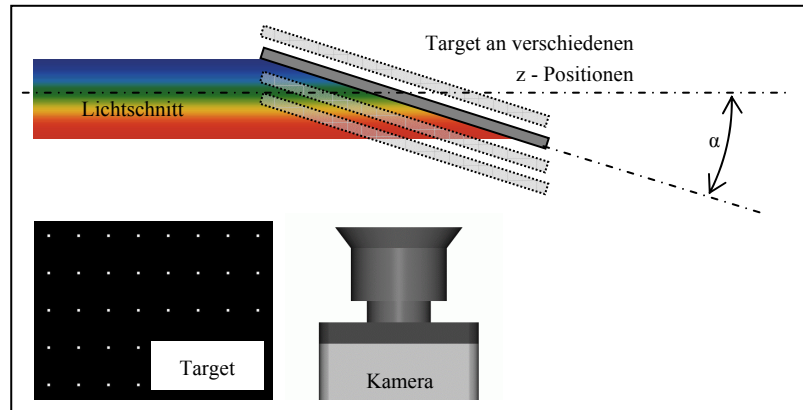


Abbildung 3: Aufbau zur Kalibrierung.

nichtlinearen Abbildungsfunktion f notwendig, welche eine eindeutige Abbildung der gemessenen Ortskoordinaten m auf die realen physikalischen Koordinaten x vornimmt

$$f: m \rightarrow x \quad \text{bzw.} \quad x = \tilde{F}(m) \bullet m \equiv F \bullet \hat{m} \quad .$$

Die Kalibrierkonstanten sind in der Matrix F zusammengefasst und werden aus den durch Messungen mit dem in Abbildung 3 gezeigten Aufbau ermittelten Matrizen X und \hat{M} durch eine Optimierung bestimmt.

$$F = X \bullet \hat{M}^T \bullet (\hat{M} \bullet \hat{M}^T)^{-1} \quad \text{mit} \quad X = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_p] \quad \text{und} \quad \hat{M} = [\hat{m}_1 \quad \hat{m}_2 \quad \dots \quad \hat{m}_p]$$

Für die Transformation der Verschiebungen wird der Gradient der Abbildungsfunktion benötigt, welcher in einen konstanten und einen ortsabhängigen Faktor zerlegt wird:

$$\Delta x_i = G(m) \bullet \Delta m_i \quad \text{mit} \quad G(m) = \nabla_m x(m) = F \bullet \hat{G}(m) \quad .$$

Validation und Derivation

Zur Validation, Interpolation, Mittelung und Filtration wurden Algorithmen verwendet, die aus der zweidimensionalen PIV abgeleitet werden konnten. Insbesondere zur Validation erwies es sich als vorteilhaft, dass bei der echt dreidimensionalen Technik 26 Nachbarvektoren (anstatt der üblichen 8 bei 2D-PIV) zum Vergleich herangezogen werden können.

Bei der Berechnung strömungsmechanischer Größen, wie zum Beispiel dem Geschwindigkeitsgradiententensor L , ergeben sich gegenüber der klassischen und der stereoskopischen PIV völlig neue Möglichkeiten:

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} & \frac{\partial v_1}{\partial x_2} & \frac{\partial v_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial v_2}{\partial x_1} & \frac{\partial v_2}{\partial x_2} & \frac{\partial v_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial v_3}{\partial x_1} & \frac{\partial v_3}{\partial x_2} & \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \quad \left[\begin{array}{cc|c} \text{klassisch} & \text{klassisch} & \text{neu} \\ \text{klassisch} & \text{klassisch} & \text{neu} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \text{stereo} & \text{stereo} & \text{neu} \end{array} \right] \quad .$$

Somit können beispielsweise auch alle Koordinaten der Vorticity im vermessenen Raumbereich berechnet werden.

Monte-Carlo-Simulation

Zur begleitenden Erprobung der Auswertesoftware und zur Rechenzeitminimierung wurden eine Reihe von Simulationen an synthetisch erzeugten Intensitätsfeldern mit bekannten Eigenschaften durchgeführt. Das neue PIV - Verfahren zeichnet sich demnach durch eine über den Erwartungen liegende und auch im Vergleich zu anderen Veröffentlichungen sehr gute Genauigkeit aus. Auf schlechte Bildqualität oder große Verschiebungen reagiert es weniger empfindlich, als zunächst angenommen. Dennoch sollten bei Messungen die größtmöglichen Auswertebereiche gewählt werden, welche noch die unbedingt notwendige räumliche Auflösung der Strömung zulassen. Da die Subpixelinterpolation für alle drei Komponenten gleichzeitig und unter Verwendung aller 27 Punkte des in Frage kommenden Gebiets erfolgt, werden die Verschiebungskomponenten zusätzlich gekoppelt, während der Fehler durch die breitere Datenbasis sehr gering ausfällt.

Prototyp und erste Messungen

Ein Prototyp des Messsystems wurde aufgebaut und betrieben, um erste Erfahrungen mit der Erzeugung des Lichtschnittes und der Bildaufnahme sowie erste auswertbare Messdaten zu gewinnen. Das damit verbundene Ziel, die Funktionsfähigkeit des Messprinzips und der Auswertelgorithmen zu bestätigen, konnte durch erste erfolgreiche Strömungsmessungen vollständig erreicht werden.

Lichtschnitt: Es wird weißes Licht einer Glühlichtquelle verwendet. Das Herz der Lichtschnittoptik bildet ein Prisma, an dem durch die gewünschte Dispersion die verschiedenen Wellenlängen räumlich getrennt werden. Das spektral zerlegte Licht wird im Messbereich so fokussiert, dass ein mehrfarbiger „Lichtschnitt“ entsteht, welcher die Anforderungen an Reproduzierbarkeit, Stetigkeit und Invertierbarkeit des funktionalen Zusammenhang zwischen der von der Kamera aufgezeichneten Streulichtfarbe und der Ortskoordinate in Normalenrichtung erfüllt.

Kamera, Shutter und Synchronizer: Es wurde eine SensiCam QE des Herstellers PCO und allein deren interner elektronischer Shutter verwendet. Ein externer Synchronizer war demzufolge ebenfalls nicht erforderlich, da die Messung (bzw. Bildaufnahme) durch ein einfaches manuell ausgelöstes Triggersignal am Kameraeingang gestartet werden konnte.

Modellströmung: Die verwendete Lichtquelle gestattete zunächst nur die Vermessung eines kleinen Volumens und kleiner Geschwindigkeiten. Eine geeignete Modellströmung wurde in einer Küvette mit einer punktförmigen Wärmequelle erzeugt. Als strömendes Fluid wurde Silikonöl gewählt, als Tracer kamen Aluminiumflitter zum Einsatz. Abbildung 4 zeigt das Modell und den optischen Zugang.

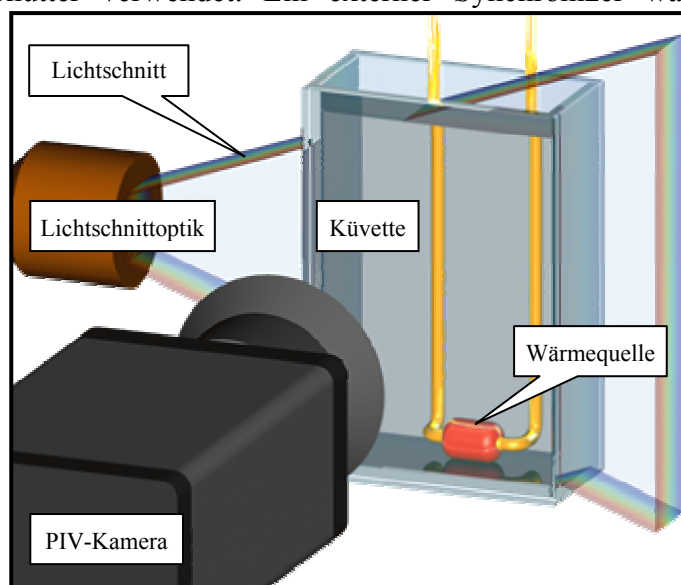


Abbildung 4: Aufbau des Experiments

Parameter: Die Belichtungszeit einer Aufnahme betrug $800 \mu\text{s}$, der zeitliche Abstand zwischen zwei Bildern 33 ms . Die für einen Interrogation Cubes gewählte Größe ist $32 \times 32 \times 32$ Pixel bzw. $2,25 \text{ mm} \times 2,25 \text{ mm} \times 2,0 \text{ mm}$. Die Auswertung erfolgte mit zweifachem Oversampling, für die Überlappung der Auswertebereiche wurden also 50% gewählt. Da für die Tiefe des berechneten Bildraumes (willkürlich) 128 Pixel gewählt wurden, können somit Geschwindigkeitsvektoren in sieben diskreten Ebenen gemessen werden.

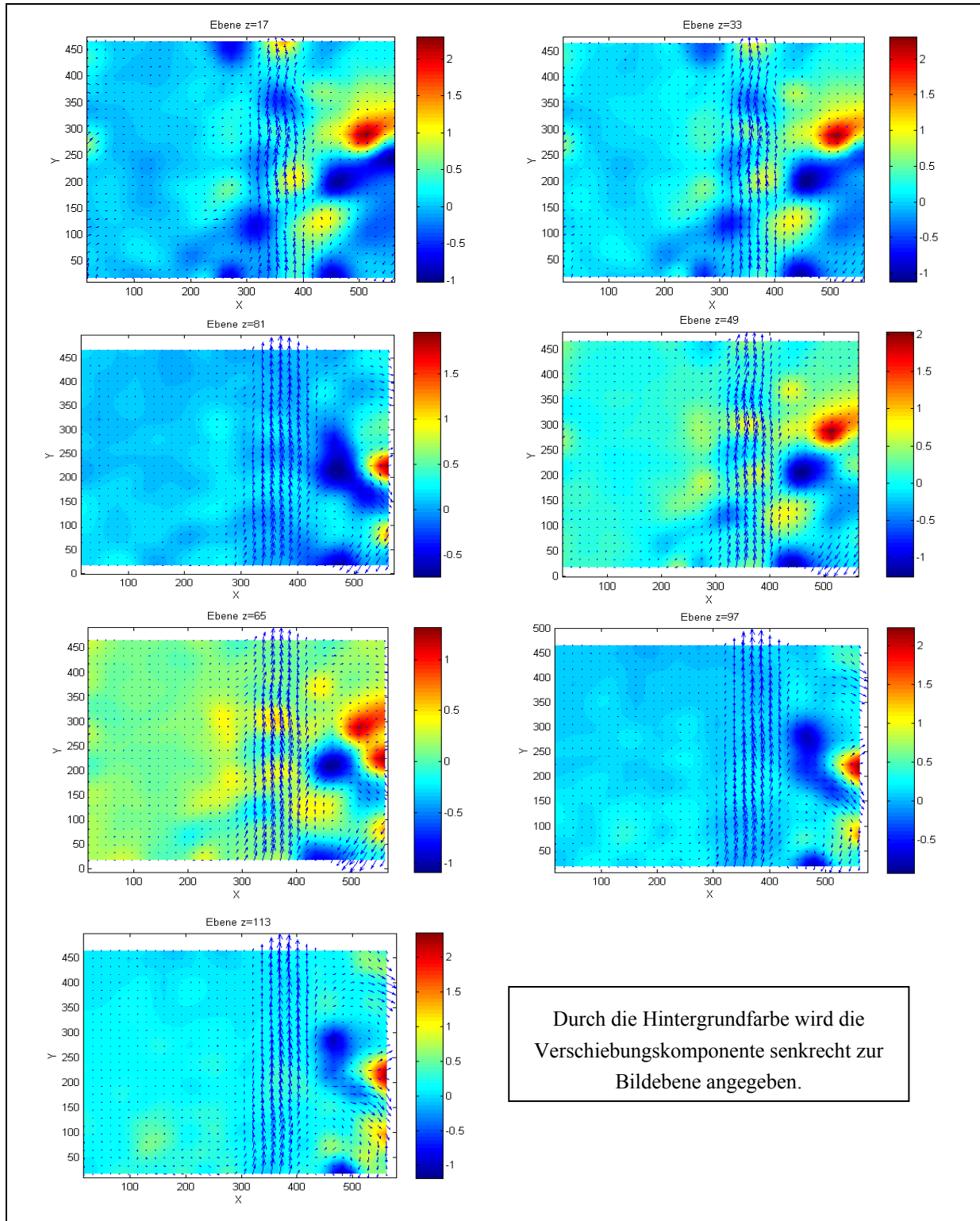


Abbildung 5 : Ergebnisse einer exemplarischen Messung.

Ergebnisse

Erste Messungen mit dem Prototyp-Aufbau an der lokal beheizten Küvette ergaben plausible Ergebnisse, welche die Funktionsfähigkeit des neu entwickelten Verfahrens bestätigen. Anhand von simulierten Bilddaten konnte zudem eine hohe Genauigkeit und Robustheit der Auswertalgorithmen festgestellt werden. Somit steht ein voll funktionsfähiges, sehr innovatives und echt dreidimensional messendes PIV – System zur Verfügung.

Ausblick

Eine demnächst verfügbare verbesserte Lichtquelle wird durch kürzere Belichtungszeiten die Ausdehnung des Bereiches der messbaren Geschwindigkeiten ermöglichen, während gleichzeitig ein größerer beleuchtbarer Raumbereich eine Anwendung an üblichen technischen Strömungen gestattet.

Es werden zahlreiche Messungen zur Gewinnung von weiteren Erfahrungen und ein Vergleich mit anderen Messtechniken vorgenommen werden. Insbesondere sind dabei Strömungsbeispiele von Interesse, bei denen solche Derivate, die nur bei Verwendung einer echt dreidimensionalen Messtechnik berechenbar sind, sinnvoll ausgewertet werden können.

Durch eine gemeinsame grafische Benutzeroberfläche für die Vielzahl der geschaffenen Programme und die Einbindung einer bereits konzipierten halbautomatischen Kalibrierung wird es auch einem weniger erfahrenen Anwender ermöglicht, diese Messtechnik komfortabel anzuwenden.

Eine Steigerung der Genauigkeit, der Auflösung und der Dynamik des Systems kann durch die Anpassung eines existierenden zweidimensionalen hierarchischen Verfahrens erreicht werden. Die Umsetzung wird aufbauend auf den bereits programmierten Korrelationsalgorithmen erfolgen.

Literatur

- [Cenedese 1989] Cenedese, A. ; Paglialunga, A. : A new technique for the determination of the third velocity component with PIV
Experiments in Fluids 8, 228-230, 1989
- [Hickel 2003] Hickel, St. : Entwicklung einer neuen echt dreidimensionalen Particle Image Velocimetry
Diplomarbeit, Lehrstuhl Aerodynamik und Strömungslehre,
BTU Cottbus, 2003
- [Hu 2001] Hu, H. ; Saga, T. ; Kobayashi, T. ; Taniguchi, N. ; Yashuki, M. : Dual-plane stereoscopic particle image velocimetry: system set-up and its application on a lobed jet mixing flow
Experiments in Fluids 31, 277-293, 2001
- [Prasad 2000] Prasad, A.K. : Stereoscopic particle image velocimetry
Review Paper, Experiments in Fluids 29, 103-116, 2000
- [Raffel 1998] Raffel, M. ; Willert, C. ; Kompenhans J. : Particle Image Velocimetry - A Practical Guide
Springer, Berlin, 1998