

VERMESSUNG DER LICHTABLENKUNG AN DICTEGRADIENTEN VON BLATTSPITZENWIRBELN EINES SCHWEBENDEN HUBSCHRAUBERS MIT HILFE DER CBOS-TECHNIK

THE MEASURING OF THE LIGHT DEFLECTION AT DENSITY GRADIENTS FROM BLADE TIP VORTICES OF A HOVERING HELICOPTER WITH THE CBOS- TECHNIQUE

F. Leopold

Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
5, rue du Général Cassagnou, F-68301 Saint-Louis, Frankreich

Sichtbarmachung von Dichtegradienten, kompressible Strömung, Blattspitzenwirbel,
Visualization of density gradients, compressible flow, blade tip vortices

Zusammenfassung

Durch Änderungen des Brechungsindex werden Lichtstrahlen unterschiedlich abgelenkt. Dadurch kommt es zu einer scheinbaren Deformation des Hintergrundes. Um diese Deformation vermessen zu können, wird ein künstliches Hintergrundbild mit einem zufällig verteilten Punktmuster erzeugt. Beim Vergleich von Aufnahmen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten von dem Hintergrundbild angefertigt wurden, kann aufgrund der Deformationen auf die Änderung des Brechungsindex geschlossen werden. Um die Genauigkeit der Vermessung zu erhöhen wird ein farbiges Hintergrundbild verwendet, bei dem die einzelnen Farbkomponenten getrennt ausgewertet werden (CBOS - *Coloured Background Oriented Schlieren*). Die Vorteile der CBOS-Technik werden am Beispiel einer Halbkugelumströmung erläutert. Anschließend werden mit dieser Methode die Blattspitzenwirbel eines Hubschrauberrotorblatts während des Schwebeflugs vermessen.

Einleitung

Die Schlierentechnik wurde 1860 zum ersten Mal von Foucault zur Vermessung von Linsen und Spiegeln eingesetzt. Toepler verwendete diese Technik 1864 um kompressible Luftströmungen sichtbar zu machen (Settles 2001). Dabei wurden Phasenänderungen der Lichtstrahlen, hervorgerufen durch Dichteänderungen in der Strömung, in sichtbare Amplitudenänderungen bzw. Intensitätsänderungen umgewandelt. Zur Vermessung der Dichteänderungen können allerdings auch Hintergrundbilder verwendet werden, die durch die Variationen der Dichte Verzerrungen aufweisen, wie z.B. die Speckelphotographie. Dabei werden mit Hilfe eines Lasers die Speckel auf einer Mattscheibe erzeugt (Niessen et al 1992) und deren durch Dichtegradienten verursachte Verschiebungen vermessen. Niessen et al. 1993 nutzten dieses Verfahren zur Vermessung von kohärenten Strukturen in kompressiblen Nachläufen. In der Patenschrift von Meier 1999 wird das Prinzip der BOS (*Background Oriented Schlieren*) Technik beschrieben. Als Hintergrund wird dabei ein Bild verwendet, auf denen ein zufällig verteiltes Punktemuster abgebildet ist (Abb. 1). Die durch die Strömung verursachten Verzerrungen werden mit Hilfe der Korrelationsalgorithmen der PIV (*Partikel Image Veloci-*

metry) Technik ausgewertet (Raffel 2001). Der geringe Aufwand, der einfache Aufbau und die frei wählbare Grosse des Messvolumens sind die Vorteile der BOS-Technik (Augenstein et al. 2001, Richard et al. 2001). Bei der CBOS (Coloured Background Oriented Schlieren) Technik ist der Hintergrund ein aus unterschiedlichen, farbigen Mustern zusammengesetzt Bild. Bei der Auswertung kann somit die Präzision als auch die räumliche Auflösung der Messung erhöht werden.

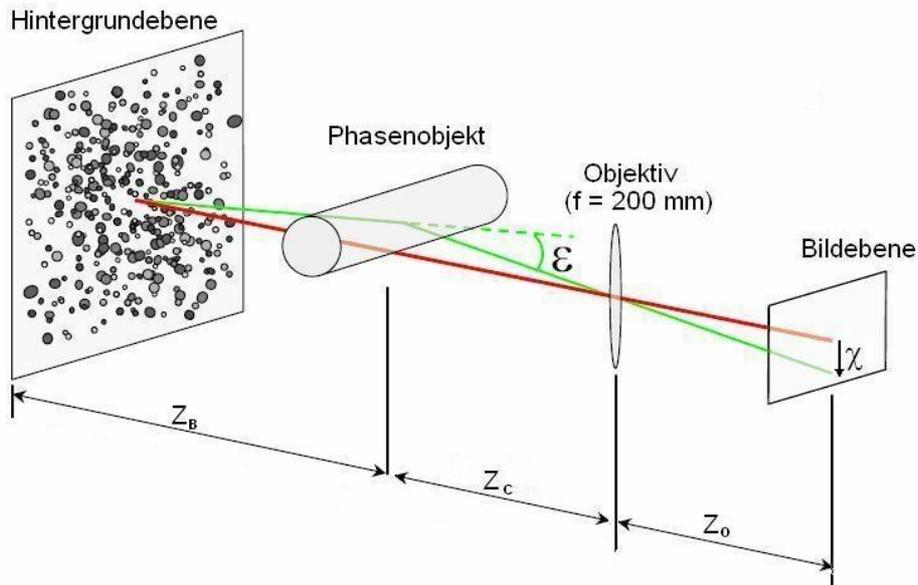


Abb. 1: Prinzipielle optische Anordnung eines BOS-Systems

Prinzip der BOS-Technik

Das Prinzip dieser Messtechnik beruht auf der Variation des Brechungsindex, verursacht durch unterschiedliche Dichtegradienten der Luft. Der Zusammenhang zwischen Dichtegradienten und dem Brechungsindex wird durch die Gladstone-Dale Beziehung beschrieben:

$$\frac{n-1}{\rho} = G(\lambda) \quad \text{mit} \quad G(\lambda) = 2,2244 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(1 + \left(\frac{6,7132 \times 10^{-8} \text{ m}}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{1,0686 \times 10^{-7} \text{ m}}{\lambda} \right)^4 \right),$$

wobei n für den Brechungsindex, ρ für die Dichte der Luft und $G(\lambda)$ für die Gladstone-Dale-Konstante steht. Diese Konstante ändert sich mit der Wellenlänge des Lichtes. Die Änderungen infolge der unterschiedlichen Wellenlängen der drei Grundfarben liegen unter 0,5% und werden deshalb durch mittlerer Wert für $G(\lambda) = 2,2244 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ angenähert. Die gemessene Verschiebung χ ist entsprechend des folgenden Integrals:

$$\chi = \frac{f \cdot Z_B}{Z_C + Z_B - f} \int_{\Delta_z} \frac{1}{n_0} \cdot \frac{\delta n}{\delta y} dz$$

gleich der Summe aller lokalen Dichtegradienten entlang eines Lichtstrahls.

Farbiges Hintergrundbild

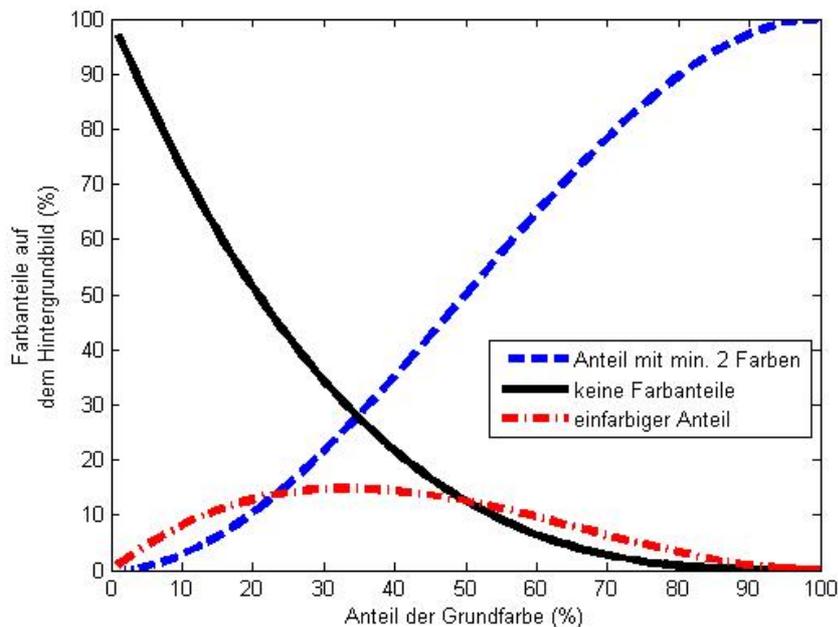


Abb. 2: Anteil der einzelnen Farbkomponenten im Hintergrundbild.

Untersuchungen zeigen, dass für eine optimale, einfarbige Auswertung die Hintergrundpunkte zwischen 30 und 40% der Grundfläche überdecken sollten. Das mehrfarbige Hintergrundbild wird mit Hilfe der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau aufgebaut. Die zufällige Verteilung der Grundfarben führt zu Mischfarben auf dem Hintergrundbild. In der Abbildung 2 ist die Verteilung der einzelnen Farbbestandteile für ein typisches Hintergrundbild (Abb. 4) dargestellt. Dabei beträgt der jeweilige Anteil der Grundfarben Rot, Grün und Blau jeweils 35%.

Versuchsaufbau und Versuchsbedingungen

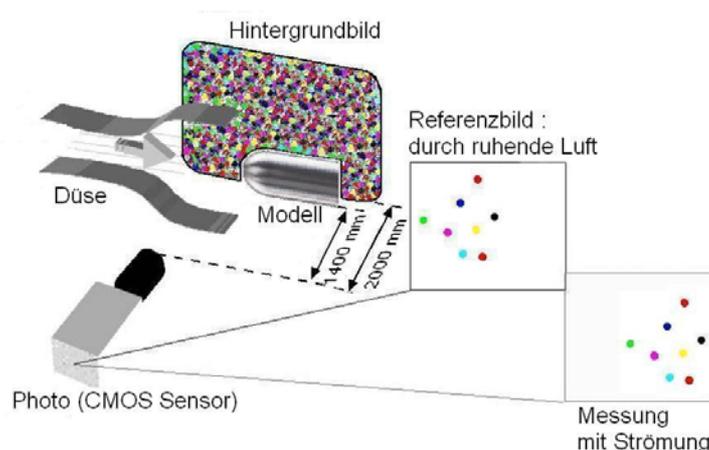


Abb. 3: Schema des Versuchsaufbaus

Die experimentellen Untersuchungen wurden im intermittierenden Überschallwindkanal des ISL (Messkammerquerschnitt 0,2 m x 0,2 m) bei einer Anströmmachzahl von 2,0 durchgeführt; die Reynoldszahl bezogen auf den Modelldurchmesser von $D = 40$ mm betrug $Re_D = 1,9 \times 10^6$. Abbildung 3 zeigt das Schema des Versuchsaufbaus. Es wurde dabei

ein Modellvarianten untersucht, das aus einem zylindrischen Rumpf mit halbkugelförmiger Nase zusammengesetzt ist.

Für die Bildaufzeichnung wurde eine Digitalkamera (*Canon EOS 300D*) mit dem dazugehörigen Teleobjektiv (Brennweite $f = 200$ mm) verwendet. Um eine möglichst große Schärfentiefe zu erhalten, wurden sämtliche Bilder mit der kleinsten Blende ($f / 32$) aufgenommen. Die Kamera besitzt einen CMOS-Sensor mit einer Auflösung von 2056×3088 Pixel. Der Abstand Z_B zwischen Hintergrundbild und Modell beträgt 600 mm, der Abstand Z_C zwischen Modell und Kameraobjektiv 1400 mm. Das Hintergrundbild wurde mit drei Blitzlampen Typ *Broncolor Impact 41* mit jeweils 75 J Blitzleistung und einer Dauer von 100 μ s ausgeleuchtet.

Die Aufnahme 5 zeigt das gleiche Hintergrundbild mit der Umströmung der Halbkugel. Dabei ist der abgehobene Verdichtungsstoß vor dem Modell mit dem bloßen Auge zu erkennen.

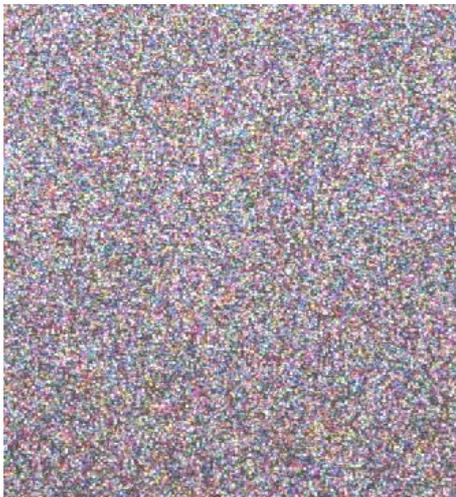


Abb. 4: Referenzbild basierend auf den drei Grundfarben Rot, Blau und Grün

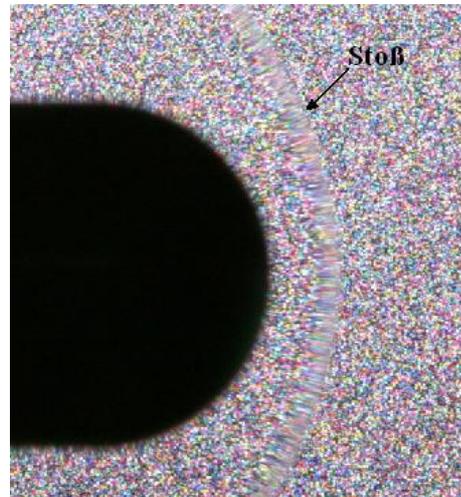


Abb. 5: Aufnahme während der Umströmung des Modells

Auswertung

Bei der Auswertung eines farbigen Hintergrundbildes wird das Bild (RGB-Format) in seine Farbbestandteile zerlegt. Entsprechend lassen sich daraus

- für jede einzelne Grundfarbe (Rot, Grün, Blau),
- für die Mischfarben,
- für die reinen Grundfarben (entsprechend der Abbildung 3 liegt der Anteil der reinen Grundfarben bei 14%; deshalb werden jeweils 2 Farbkombinationen gemeinsam ausgewertet: rot-grün, grün-blau und blau-rot) und
- für die Punkte ohne Farbanteile („schwarze“ Punkte)

acht unterschiedliche Hintergrundmuster generieren. Jedes dieser acht Muster wird für sich ausgewertet.

Zur Genauigkeitssteigerung werden gleitende Abfragefenster benutzt. Die unterschiedlichen Muster werden an leicht verschobenen Positionen ausgewertet. Der horizontale und vertikale Versatz entspricht dem achten Teil der Größe eines Abfragefensters. Die Vermessung der Verschiebungen in den unterschiedlichen Hintergrundmustern erfolgt mit Hilfe von Kreuzkorrelationen, die auch bei der Auswertung von PIV-Bildern Verwendung finden (Westerweel 1993, Hickel 2003, Guernier 2004).

Für die spätere Mittelwertbildung werden dann je nach gewähltem Interpolationsverfahren die benachbarten Punkte verwendet. Für die Darstellung der Ergebnisse wird ein iterativer Prozess benutzt, der eine gewichtete Mittelwertbildung erlaubt:

- Zuerst wird der Mittelwert gebildet und die entsprechenden Abweichungen berechnet.
 - Genügen die Messungen nicht einem vorgegebenen Grenzwertkriterium für die Standardabweichung ($\sigma^2 = 0,00225$), wird nur die Messung mit der größten Abweichung eliminiert.
 - Die Prozedur wird solange wiederholt, bis entweder nur noch ein Wert vorliegt (Median) oder die Messungen der vorgegebenen Standardabweichung genügen. Aus den verbleibenden wird dann der Mittelwert gebildet.

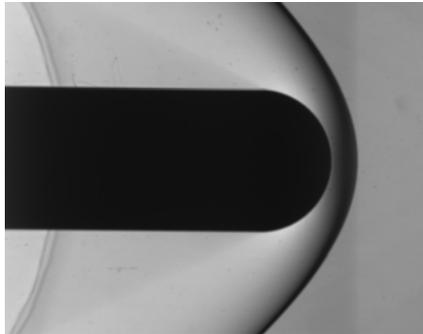


Abb. 6: Schlierenaufnahme der Halbkugelumströmung

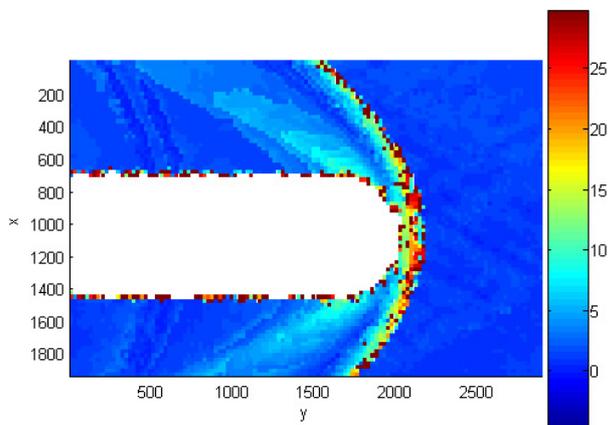


Abb. 7: Auswertung basierend auf einer Farbe

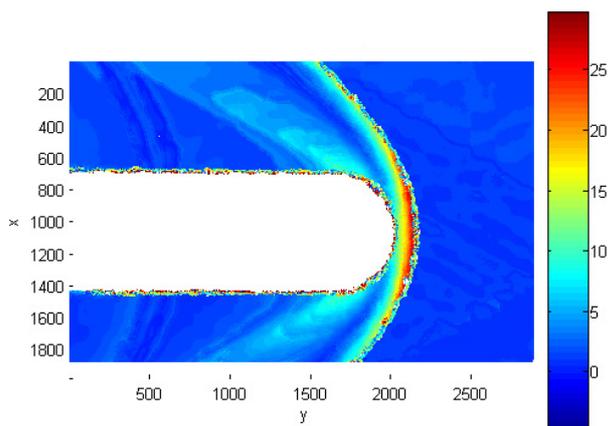


Abb. 8: Auswertung mit gleitenden Abfragefenstern

Ergebnisse

Die unterschiedlichen Verfahren werden am Beispiel der Halbkugelumströmung getestet. Die Schlierenaufnahme (Abb. 6) lässt bereits die starken Dichtegradienten im Bereich der abgehobenen Kopfwelle erkennen. Für den Vergleich wird für alle Auswertungen die Größe der Abfragefenster auf 64×64 Pixel festgelegt. Das Ergebnis in der Abbildung 7 basiert nur auf der Auswertung einer Farbe (BOS). Deutlich sind die Schwankungen vor allem in den Bereichen mit großen Dichtegradienten zu erkennen. In der Abbildung 8 ist das Ergebnis für die CBOS-Technik dargestellt. Die großen Schwankungen in der Stossfront sind bereits unterdrückt worden. Durch die gleitenden Abfragefenster kann zudem noch die räumliche Auflösung erhöht werden.

Untersuchung der Blattspitzenwirbel eines Hubschraubers



Abb. 9: BELL UH 1D Hubschrauber im Schwebeflug vor einer Waldkante, die als natürliches Hintergrundmuster verwendet wird



Abb. 10: Gleichzeitige Aufnahme der Rotorblattspitzen mit den beiden Kameras

Die Vermessung der Lichtablenkung an den Dichtegradienten der Blattspitzenwirbel während des Fluges ist mit Hilfe eines BELL UH 1D Hubschraubers durchgeführt worden (Abb. 9). Die Flugbewegungen eines Hubschraubers lassen nicht zu, dass am selben Ort ein Referenzbild ohne Dichtegradienten aufgenommen werden kann. Deshalb werden für diese Messungen zwei Digitalkameras (CANON OES 1Ds Mark II) mit den entsprechenden Teleobjektiven ($f = 400 \text{ mm}$) verwendet, die zwar zur gleichen Zeit die Aufnahmen anfertigen, jedoch den Hintergrund aus unterschiedlichen Perspektiven beobachten (Kindler et al 2007). Dabei befindet sich die Spitze des Rotorblatts, wie in den beiden Aufnahmen der Abbildung 10 zu sehen ist, an unterschiedlichen Stellen auf den Aufnahmen. Durch die großen Drehgeschwindigkeiten des Rotorblatts musste eine relative kurze Belichtungszeit von $1/2000 \text{ s}$ gewählt werden. Das integrierbare Messsystem, bestehend aus einer Halterung, einer Triggereinheit und den beiden Kameras, lässt sich problemlos in den Passagierbereich des Hubschraubers einbauen. Die Kameras sind auf einer vertikalen Schiene in einem Abstand von 0.55 m montiert. Der Radius des Hauptrotors beträgt $R = 7.3 \text{ m}$ und dessen Blatttiefe $c = 0.34 \text{ m}$.

Um ein geeignetes natürliches Hintergrundmuster zu bekommen, flog der Hubschrauber vor einer Waldkante mit einem Abstand von ca. $18 R$ (Abb. 9). Um für die CBOS Auswertung die notwendigen unterschiedlichen Hintergrundmuster zu bekommen, werden in den einzelnen Aufnahmen der Waldkante nur die höchsten 35% Farbwerte für die Grundfarben rot, grün und blau gewertet (Abb. 11). Wie in der Abbildung 12 deutlich zu erkennen ist, sind die beiden Kameras leicht verkantet und nicht genau auf die gleiche Stelle gerichtet. Deshalb muss die Grundverschiebung zwischen den beiden Aufnahmen mit einem relativ großen Abfragefenster ($256 \times 256 \text{ Pixel}$) bestimmt werden. Zur Auflösung der Blattspitzenwirbel bedarf es einer weiteren Korrelation mit wesentlich kleineren Abfragefenstern ($32 \times 32 \text{ Pixel}$). Von diesem Ergebnis wird die vorher berechnete Grundverschiebung zwischen den Aufnahmen der beiden Kameras abgezogen. Dies erlaubt eine bessere Interpretation der Ergebnisse. Besonders deutlich sind die Blattspitzenwirbel bei den vertikalen Lichtablenkungen (Abb. 13) zu erkennen. Durch die Korrelation zwischen den beiden Bildern, die von den zwei Kameras kommen, ist der Blattspitzenwirbel zweimal zu erkennen, jedoch mit entgegengesetzten Vorzeichen. Aber die Verwendung von zwei Kameras, die gleichzeitig getriggert werden, reduziert den Rauschanteil erheblich. Die meisten Probleme bereitet die dreidimensionale Struktur des Hintergrunds, die an einzelnen Stellen keine geeigneten Korrelationen zulässt.

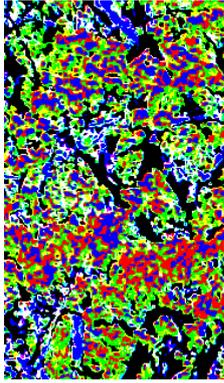


Abb. 11: Ausschnitt aus dem Bilder 10a nach der Bildaufbereitung

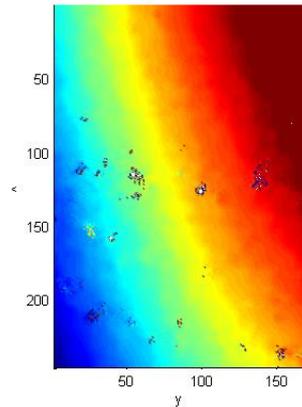


Abb. 12: Grundverschiebung zwischen den beiden Kameras (in Pixel) berechnet mit großen Abfragefenstern (256 X 256 Pixel)

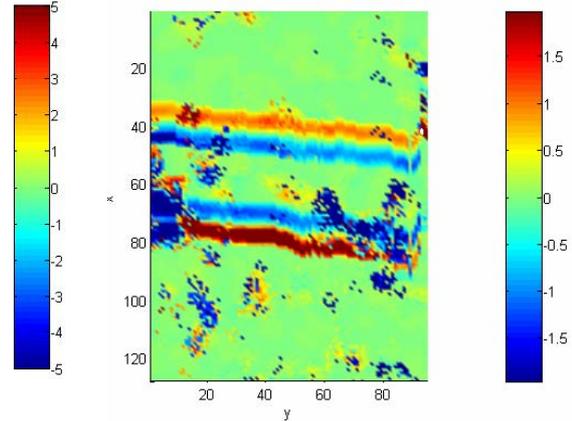


Abb. 13: Vertikale Lichtablenkung (in Pixel) berechnet mit kleinen Abfragefenstern (32 X 32 Pixel).

Zusammenfassung

Bei der CBOS-Technik werden zum gleichen Zeitpunkt mehrere, von einander unabhängige Hintergrundbilder mit einer Kamera aufgenommen. Daraus lassen sich beim Auswerten folgende Vorteile erzielen:

- Die Hintergrundmuster liefern acht unabhängige Korrelationen an jedem Punkt. Selbst wenn einige Hintergrundmuster schlechte oder gar falsche Ergebnisse liefern, wird auf die Ergebnisse der anderen Korrelationen zurückgegriffen. Auf Interpolationen kann vollständig verzichtet werden.
- Durch die Bestimmung des Mittelwerts in jedem Punkt wird die Präzision der Messung erhöht.
- Durch die Verwendung von gleitenden Abfragefenstern kann die räumliche Auflösung wesentlich verbessert werden.
- Das Modell wird durch den Algorithmus automatisch erkannt.

Besonders bei der Verwendung von natürlichen Hintergrundmustern führt die Aufteilung in die unterschiedlichen Farbkomponenten und den daraus folgenden acht unabhängigen Mustern dazu, dass die Strukturen im Hintergrundbild feingliedriger werden. Somit wird eine größere räumliche Auflösung der zu untersuchenden Dichtegradienten erreicht. Die Verwendung von natürlichen Hintergrundmustern erlaubt die Vermessung von großen Objekten, sowie der Einsatz der CBOS-Technik bei Freifluganlagen und Messungen während des Fluges mit einem mitgeführten System.

Dankesworte

Der Autor bedankt sich bei Hans-Jürgen Schäfer, Stephan Guernier, Delphine Gruppi und Frédérique Jagusinski für die vielen Diskussionen und ihre tatkräftige Unterstützung bei der Entwicklung der CBOS-Technik

Literatur

- Augenstein, E., Leopold, F., Richard, H., Raffel, M., 2001: " Schlieren techniques in Comparison : Background Oriented Scattering versus Visualization with Holographic Filters", PIV'01 Paper, pp. 1-2, 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry
- Gruppi, D., Guernier, S., Leopold, F., Schaefer, H.J., 2005: " Farb-BOS-Technik (CBOS) zur Vermessung der Lichtablenkung an Dichtegradienten", GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Cottbus.
- Guernier, S., 2004: " Entwicklung von Messmethoden für Überschallwindkanäle", ISL, pp. 8-30
- Haertig, J., Sourgen, F., Rey, C., 2003: " Mesure de champ de masse volumique par " Background Schlieren Displacement (BSD) ", ISL, pp. 7-49
- Hickel, S., 2003: " Entwicklung einer neuen echt dreidimensionalen Particle Image Velocimetry", Diplomarbeit Universität Cottbus, pp. 75-176
- Kindler K., Goldhahn E., Leopold F., Raffel M.: "Recent developments in background oriented schlieren methods for rotor blade tip vortex measurements", Experiments in Fluids, 2007
- Klinge, F., Riethmüller, M.L., 2002: "Local density information obtained by means of the Background Oriented Schlieren (BOS) method", 11th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal
- Niessen R., Schäfer H.J., Merzkirch W., 1992: „Measurement of length scales in the turbulent wake behind a cylindrical body at supersonic flow velocities“, IUTAM Symposium "Eddy Structure Identification in Free Turbulent Shear Flows", Poitiers, France
- Niessen R., Schäfer H.J., 1993: "Untersuchung eines Überschall-Nachlaufs mit Hilfe der Dichtespeckle-Photographie", GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, Braunschweig
- Meier, G.E.A., 1999: " Hintergrundschlierenverfahren", Deutsche Patentanmeldung, DE 19942856 A1
- Raffel, M., 2001: " Optische Untersuchungen in technischen Strömungen unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Detektion von Dichtegradienten", Habilitationsschrift, Technische Universität Clausthal
- Westerweel, J., 1993: "Digital Particle Image Velocimetry, Theory and Application", Doktorarbeit, Delft University Press
- Richard, H., Raffel, M., 2001: "Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method", Measurement Science and Technology
- Settles, G.S., 2001: " Schlieren and Shadowgraph Techniques, visualizing Phenomena in Transparent Media", Springer, pp. 16-18