

MEHRFARBEN-HINTERGRUNDSCHLIEREN-TECHNIK (CBOS) ZUR VERMESSUNG DER LICHTABLENKUNG AN DICHTEGRADIENTEN

D. Gruppi, S. Guernier, F. Leopold, H.J. Schäfer

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

Zusammenfassung

Es wird eine verbesserte, hintergrundorientierte Schlierentechnik (*Coloured Background Oriented Schlieren - CBOS*) vorgestellt, die es ermöglicht, die Lichtablenkung an Dichtegradienten in einem kompressiblen Fluid quantitativ zu ermitteln. Durch Verwendung eines mehrfarbigen Hintergrundmusters, bei dem die einzelnen Farbkomponenten getrennt ausgewertet werden, lässt sich gegenüber der bisherigen monochromen Hintergrundschlierenmethode (BOS) sowohl die Messgenauigkeit als auch die räumliche Auflösung deutlich erhöhen. Nach einer Beschreibung des zugrunde liegenden Prinzips und des verwendeten Auswerteverfahrens werden die Vorteile der neuen Methode am Beispiel der Überschallumströmung von stumpfen Körpern unterschiedlicher Geometrie erläutert.

Einleitung

Bei der Untersuchung kompressibler Fluide ist neben der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit u. a. auch die Ermittlung der Dichteverteilung von großem Interesse. Hierfür kommt in der Strömungsmesstechnik gewöhnlich das Schlierenverfahren zum Einsatz, das bereits 1864 von A. Toepler verwendet wurde, um kompressible Luftströmungen sichtbar zu machen (vgl. Settles 2001). In der klassischen Form der Schlierentechnik werden Phasenänderungen der Lichtstrahlen, hervorgerufen durch Dichteänderungen im Fluid, in sichtbare Amplituden- bzw. Intensitätsänderungen umgewandelt. In jüngerer Zeit wurden dagegen Verfahren vorgeschlagen, die die Strahlablenkung an einer inhomogenen Dichteverteilung unmittelbar zu messen gestatten. Ein Beispiel hierfür ist die Dichte-Speckle-Photographie (Wernekinck u. Merzkirch 1987, Niessen et al. 1992). Hierbei wird durch Laserstreuung ein Specklemuster erzeugt und die von Dichtegradienten entlang der Sichtlinie verursachte Verschiebung der Speckles gemessen. Niessen et al. 1993 nutzten dieses Verfahren zur Vermessung von kohärenten Strukturen in kompressiblen Nachläufen.

Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Technik beruht auf der von Meier 1999 beschriebenen Hintergrundschlieren-Methode BOS (*Background Oriented Schlieren*), bei der das Vorhandensein von Dichte-Inhomogenitäten aus der scheinbaren Deformation eines Hintergrundbildes ermittelt wird. Als Hintergrund dient dabei ein zufällig verteiltes Punktmuster, dessen Verzerrung nach Durchgang durch ein Phasenobjekt mit Korrelationsalgorithmen aus der PIV-Technik ausgewertet wird (Raffel 2001). Der geringe Aufwand, der einfache Aufbau und die frei wählbare Größe des Messfeldes sind die wesentlichen Vorteile der BOS-Technik (Augenstein et al. 2001, Richard et al. 2001). Bei der Mehrfarben-BOS-Technik (*Coloured Background Oriented Schlieren - CBOS*) ist der Hintergrund ein aus unterschiedlichen farbigen Mustern zusammengesetztes Bild, wodurch sich Messgenauigkeit und räumliche Auflösung erhöhen lassen.

Prinzip der Hintergrundschlieren-Technik (BOS)

Das Prinzip der BOS-Technik beruht auf der Messung der Lichtablenkung beim Durchgang durch ein Phasenobjekt, um daraus auf lokale Dichteänderungen in dem durchstrahlten Medium rückschließen zu können (Meier 1999, Raffel 2001). Hierzu macht man sich den Zusammenhang zwischen Brechungsindex und Dichte zunutze, der durch die Gladstone-Dale-Beziehung vermittelt wird:

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

dabei steht n für den Brechungsindex, ρ für die Dichte der Luft und $G(\lambda)$ für die Gladstone-Dale-Konstante. Letztere ändert sich zwar mit der verwendeten Lichtwellenlänge λ , die Änderung über den sichtbaren Spektralbereich ist jedoch sehr gering, weshalb G hier durch einen mittleren Wert $G(\bar{\lambda}) = 2,26 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{kg}$ für $\bar{\lambda} \approx 550 \text{ nm}$ angenähert werden kann.

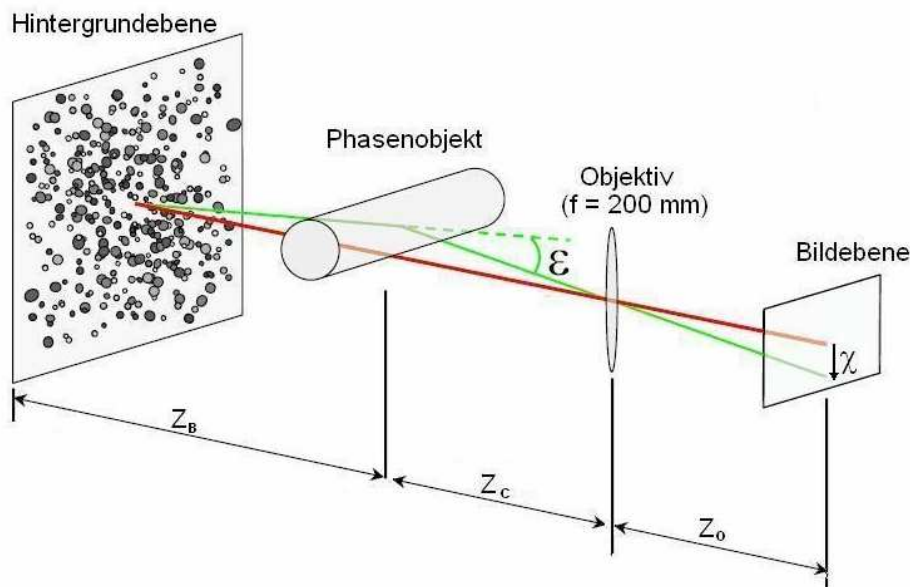


Abb. 1: Prinzipielle optische Anordnung eines BOS-Systems

Abbildung 1 zeigt die Prinzipskizze eines BOS-Systems. Bei der BOS-Messung wird in einem ersten Schritt ein geeignetes Hintergrundmuster bei ruhender Luft mit einer Digitalkamera aufgenommen (Referenzbild). Derselbe Hintergrund wird dann bei einer zweiten Aufnahme durch das zu untersuchende Phasenobjekt (z. B. kompressible Strömung) hindurch abgebildet. Der Versatz χ zwischen dem Punktmuster der zweiten Aufnahme und demjenigen des Referenzbildes ergibt sich entsprechend Gl. (2) aus der Integration über die lokalen Brechungsindexgradienten entlang dem optischen Pfad.

$$(2) \quad \chi = \frac{f \cdot z_B}{z_C + z_B - f} \int_{\Delta_z} \frac{1}{n_0} \cdot \frac{\delta n}{\delta r(x, y)} dz$$

Gemäß der Gladstone-Dale-Beziehung (1) ermöglicht die Messung des zweidimensionalen Bildversatzes $\chi(x, y)$ somit Rückschlüsse auf die horizontalen und vertikalen Dichtegradienten $\delta\rho/\delta x$ und $\delta\rho/\delta y$ in dem durchstrahlten Fluid.

Mehrfarben-BOS-Technik (CBOS)

Während bei der bisherigen BOS-Technik einfarbige Hintergrundmuster eingesetzt werden, verwendet die CBOS-Technik ein mehrfarbiges Punktmuster als Hintergrund (Abbildung 2). Dieses Hintergrundbild setzt sich aus den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau zusammen. Die zufällige Verteilung der Grundfarben führt zusätzlich zu Mischfarben.



Abb. 2: Hintergrundbild aus den Grundfarben Rot, Grün und Blau

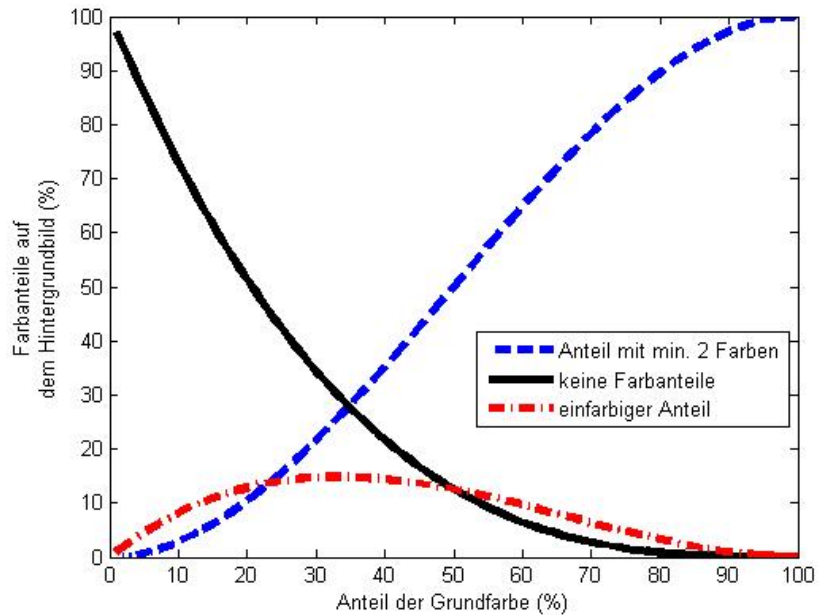


Abb. 3: Anteil der einzelnen Farbkomponenten im registrierten Punktmuster.

In Abbildung 3 ist für ein typisches Hintergrundbild die Verteilung der einzelnen Farbanteile auf dem Detektor dargestellt. Dabei beträgt der Flächenanteil der Grundfarben Rot, Grün und Blau jeweils 35%. Bei einfarbiger Auswertung der Hintergrundbilder wurde ein optimaler Flächenanteil von 30 - 40 % ermittelt.

Versuchsaufbau und Versuchsbedingungen

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 4 zeigt das Schema des Versuchsaufbaus. Es wurden drei Modellvarianten untersucht: die Grundform (erste Variante) bestand dabei aus einem zylindrischen Rumpf mit halbkugelförmiger Nase. Auf diese Grundform wurden in den beiden anderen Modellvarianten zwei unterschiedliche Vorkörper („Spikes“) mit der Länge $L = 50$ mm montiert (Abbildung 5): Der erste Vorkörper besitzt entsprechend der Newtonschen Theorie die Form des geringsten Widerstands (Zierep 1991) mit der konvexen Kontur der Spitze:

$$y = \frac{D}{2} \left(\frac{x}{L + D/2} \right)^{3/4} .$$

Der zweite Vorkörper soll durch seine konkave Form eine Abschwächung der Kopfwelle bewirken. Die theoretische Form wurde mit Hilfe der Charakteristikenmethode bestimmt und die Kontur der Spitze durch ein Polynom 3. Grades angenähert.

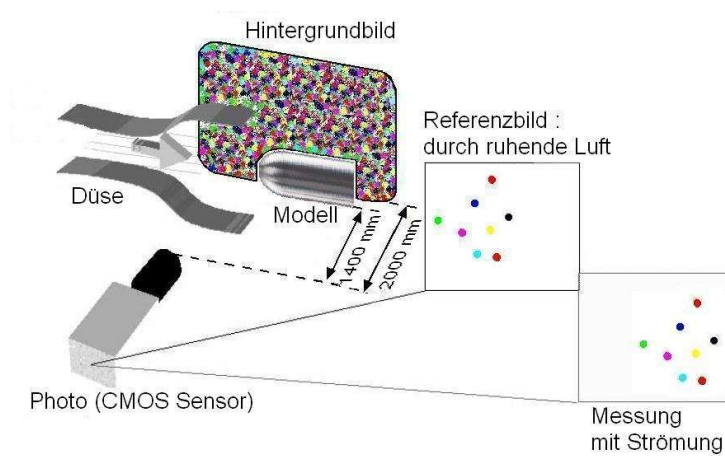


Abb. 4: Schema des Versuchsaufbaus



Abb. 5: Vorkörper mit konvexer und konkaver Kontur

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 $100 \mu\text{s}$ ausgeleuchtet.

Digitale Bildauswertung

Bei der Auswertung der CBOS-Aufnahmen wird das Bild (RGB-Format) in seine Farbbestandteile zerlegt. Es lassen sich dabei acht elementare Punktmuster extrahieren:

- je ein Muster aus den drei reinen Grundfarben Rot, Grün und Blau,
- ein gemeinsames Muster aus allen Mischfarben,
- je ein Muster aus den Mischfarben mit Rot-, Grün- bzw. Blauanteil und
- ein Muster bestehend aus den „schwarzen“ Punkten (ohne Farbanteile).

Jedes dieser acht Muster wird getrennt ausgewertet. Zur Genauigkeitssteigerung werden unterschiedliche Auswerteprozeduren verwendet:

- Ortsfeste Abfragefenster
Die acht extrahierten Punktmuster werden an derselben Position ausgewertet. Anschließend wird aus den Resultaten der einzelnen Muster der Mittelwert bestimmt.
- Gleitende Abfragefenster
Die extrahierten Muster werden an leicht verschobenen Positionen ausgewertet (Abbildung 6). Der horizontale und vertikale Versatz (ϵ) entspricht dem achten Teil der Größe eines Abfragefensters.

Für die spätere Mittelwertbildung werden dann je nach der gewählten Prozedur entsprechend der Abbildung 7 die benachbarten Punkte verwendet.

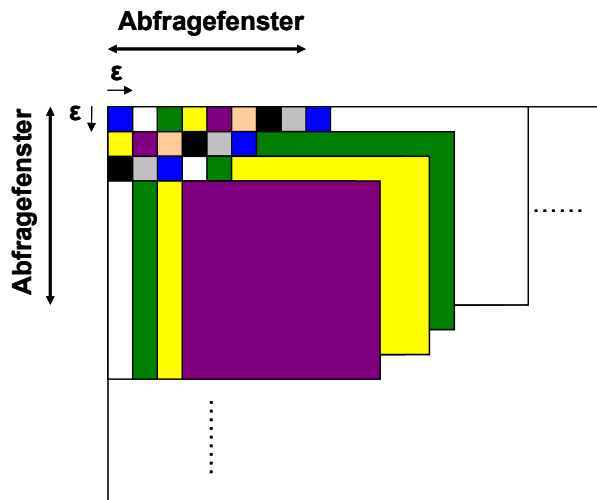


Abb. 6: Verschiebung der Korrelationsfenster für die extrahierten Punktmuster

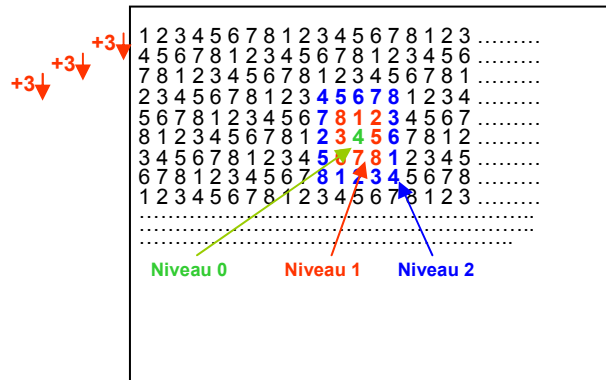


Abb. 7: Mittelwertbildung aus den acht elementaren Punktmustern

Die Vermessung der Verschiebungen in den unterschiedlichen Punktmustern erfolgt mit einem Kreuzkorrelationsalgorithmus, der auch in der PIV-Technik Verwendung findet (Westerweel 1993, Hickel 2003, Guernier 2004). Für die Darstellung der Ergebnisse wird ein iterativer Prozess benutzt, der eine gewichtete Mittelwertbildung erlaubt.

Ergebnisse

Die unterschiedlichen Auswerteprozeduren wurden am Beispiel einer Überschallumströmung (Modellvariante 1) getestet. Die zum Vergleich herangezogene Schlierenaufnahme (Abb. 8) lässt bereits die starken Dichtegradienten im Bereich der abgelösten Kopfwelle erkennen. Für die Auswertung der CBOS-Bilder wurde die Größe der Abfragefenster auf 64 x 64 Pixel festgelegt. Das in Abbildung 9 dargestellte Ergebnis basiert auf der Auswertung nur einer Farbe (entsprechend der BOS-Technik). Vor allem in den Bereichen mit großen Dichtegradienten ist eine starke Streuung der Messergebnisse zu erkennen.

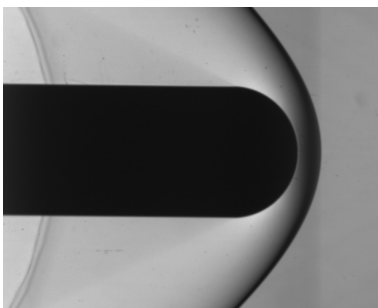


Abb. 8: Schlierenaufnahme der Modellumströmung (Modellvariante 1)

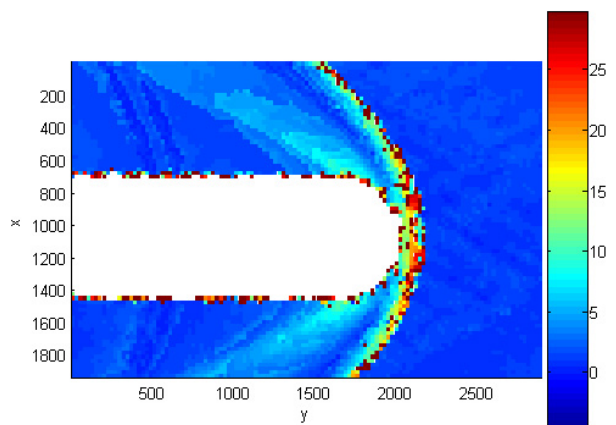


Abb. 9: Einfarbige CBOS-Auswertung (Verschiebung in Pixel)

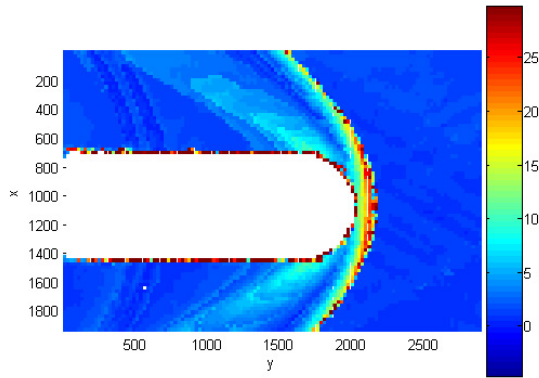


Abb. 10: CBOS-Auswertung mit ortsfesten Abfragefenstern

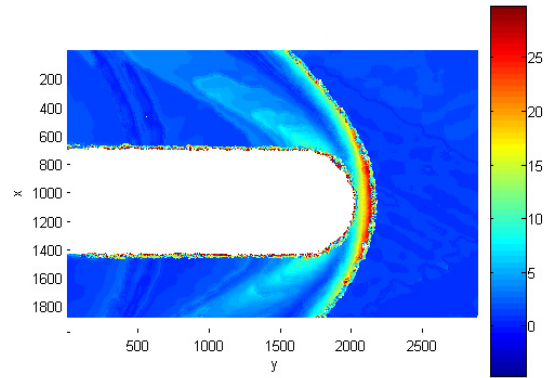


Abb. 11: CBOS-Auswertung mit gleitenden Abfragefenstern

Abbildung 10 zeigt das Ergebnis für die Auswertung mit ortsfesten Abfragefenstern: die Streuung der Messergebnisse in der Stoßfront ist hier bereits deutlich reduziert. Durch Verwendung gleitender Abfragefenster kann schließlich, wie aus Abbildung 11 zu entnehmen, die räumliche Auflösung noch erhöht werden.

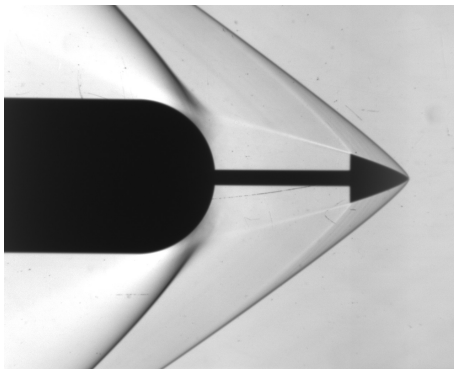


Abb. 12: Schlierenaufnahme der Umströmung des Spikes mit konvexer Form

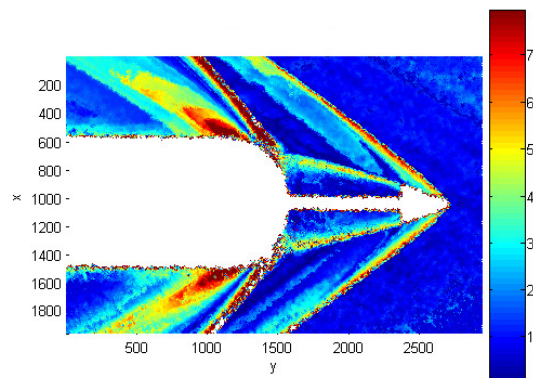


Abb. 13: Absolutbetrag der Verschiebung (in Pixel)

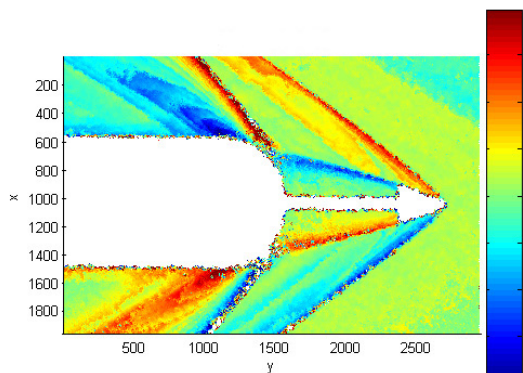


Abb. 14: Verteilung der vertikalen Verschiebungen (in Pixel)

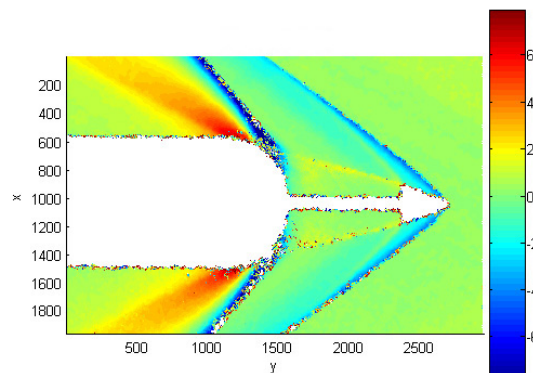


Abb. 15: Verteilung der horizontalen Verschiebungen (in Pixel)

Die Schlierenaufnahmen für die Modellvarianten mit Spike (Abb. 12, 16) vermitteln bereits einen qualitativen Eindruck des Strömungsvorgangs. Um genauere Aussagen über den Ein-

fluss der beiden unterschiedlichen Vorkörperkonturen machen zu können, bedarf es einer quantitativen Auswertung der CBOS-Aufnahmen hinsichtlich der zweidimensionalen Verschiebungen der Punktmuster. In den Abbildungen 13 und 17 sind die Beträge der Verschiebungen dargestellt, die mit den gleitenden Abfragefenstern berechnet wurden. Für eine weitere Interpretation der Ergebnisse werden die vorzeichenbehafteten Verschiebungen in horizontaler Richtung (Strömungsrichtung) und vertikaler Richtung getrennt analysiert. Aus den horizontalen Verschiebungen (Abb. 15, 19) lässt sich aufgrund der unterschiedlichen Vorzeichen sofort erkennen, ob es sich um Verdichtungsstöße, Verdichtungsfächer oder um Expansionsgebiete (bzw. Verdünnungsfächer) handelt. Bei der Darstellung der vertikalen Komponenten (Abb. 14, 18) fällt auf, dass die Strömung nicht vollständig symmetrisch ist, was vermutlich auf Unvollkommenheiten des Modells zurückzuführen ist.

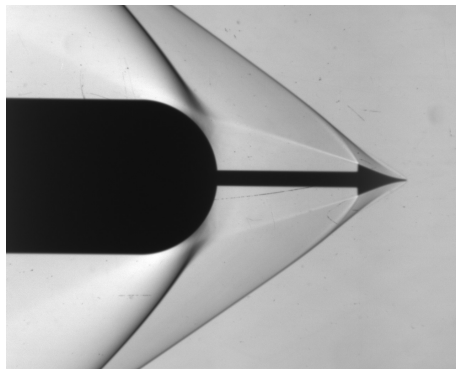


Abb. 16: Schlierenaufnahme der Umströmung des Spikes mit konkaver Form

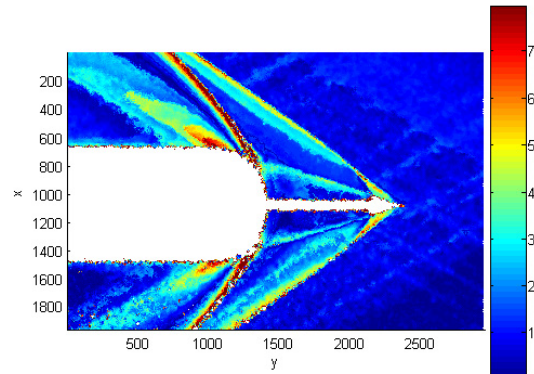


Abb. 17: Absolutbetrag der Verschiebung (in Pixel)

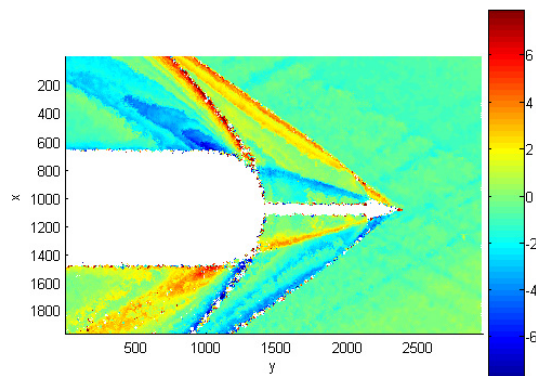


Abb. 18: Verteilung der vertikalen Verschiebungen (in Pixel)

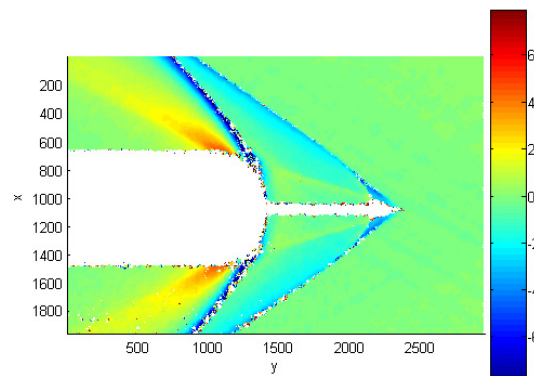


Abb. 19: Verteilung der horizontalen Verschiebungen (in Pixel)

Vergleicht man die die Abbildungen 13 und 17, so lässt sich feststellen, dass sowohl der vom Spike als auch der von der Modellnase ausgehende Verdichtungsstoß bei der konkaven Kontur schwächer ausfällt als bei der konvexen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die hintergrundorientierte Schlierentechnik (BOS) hat sich als aussichtsreiches Verfahren zur zweidimensionalen Analyse eines Dichtegradientenfeldes erwiesen. Gegenüber den traditionellen Dichtemessverfahren (Schlierenverfahren, Differentialinterferometrie) zeichnet sie sich durch einen einfachen optischen Aufbau und geringen experimentellen Aufwand aus. In der Variante der Mehrfarben-BOS-Technik können gleichzeitig acht elementare Punktmuster

mit einer einzigen Kamera aufgenommen. Für jeden Auswertepunkt lassen sich somit acht unabhängige Korrelationen durchführen, was bei gewichteter Mittelwertbildung die Messgenauigkeit wesentlich erhöht. Durch Verwendung von gleitenden Abfragefenstern kann zudem noch die räumliche Auflösung verbessert werden. Mit dem Verfahren können auch große Verschiebungen mit kleinen Abfragefenstern aufgelöst werden, indem die zuvor mit großen Abfragefenstern berechneten Verschiebungen den kleinen Fenstern aufgeprägt werden.

Das BOS- bzw. CBOS-Verfahren ermöglicht nicht nur die Sichtbarmachung von Dichte-Inhomogenitäten in einem Fluid, aus den gewonnenen Ergebnissen für die Strahlablenkung lässt sich vielmehr unter bestimmten Voraussetzungen auch die lokale Dichteverteilung berechnen. Beim Vorliegen rotationssymmetrischer Verhältnisse kann hierfür eine inverse Abeltransformation verwendet werden. Im Falle einer komplexeren Strömungsgeometrie ist allerdings eine aufwendigere numerische Rekonstruktion erforderlich (Sourgen et al. 2004).

Dankesworte

Die Autoren danken Dominique Willmé, Christophe Demeautis und Laurent Gross für ihre tatkräftige Unterstützung bei den Windkanalversuchen.

Literatur

Augenstein, E., Leopold, F., Richard, H., Raffel, M., 2001: "Schlieren techniques in Comparison: Background Oriented Scattering versus Visualization with Holographic Filters", 4th Int. Symposium on Particle Image Velocimetry, Göttingen, Germany, Paper 1191

Guernier, S., 2004: "Entwicklung von Messmethoden für Überschallwindkanäle", Studienarbeit, Univ. Stuttgart.

Hickel, S., 2003: "Entwicklung einer neuen echt dreidimensionalen Particle Image Velocimetry", Diplomarbeit BTU Cottbus.

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

Meier, G.E.A., 1999: "Hintergrund-Schlierenverfahren", Deutsche Patentanmeldung, DE 19942856 A1

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, Bericht ISL-CO 235/92

Niessen R., Schäfer H.J., 1993: "Untersuchung eines Überschall-Nachlaufs mit Hilfe der Dichtespeckle-Photographie", 2. GALA-Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, PTB Braunschweig, Shaker-Verlag, Aachen, pp. 26.1-26.3

Raffel, M., 2001: "Optische Untersuchungen in technischen Strömungen unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Detektion von Dichtegradienten", Habilitationsschrift, Techn. Univ. Clausthal

Richard, H., Raffel, M., 2001: "Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method", Meas. Sci. Technol., Vol. 12, No. 9, pp. 1576-1585

Settles, G.S., 2001: "Schlieren and Shadowgraph Techniques", Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 1-24

Sourgen, F., Haertig, J., Rey, C., 2004: Comparison between Background Oriented Schlieren measurements (BOS) and numerical simulations, 24th AIAA Aerodynamic Measurements Technology and Ground Testing Conference, Portland, USA

Wernekinck, U., Merzkirch, W., 1987: "Speckle photography of spatially extended refractive index fields", Applied Optics, Vol. 26, pp. 31-32

Westerweel, J., 1993: "Digital Particle Image Velocimetry, Theory and Application", Doktorarbeit, Techn. Univ. Delft, Delft University Press

Zierep, J., 1991: "Theoretische Gasdynamik", G. Braun, Karlsruhe, pp. 459-461