

## Drei-dimensionale Rekonstruktion von instationären Überschallströmungen mit Hilfe der CBOS-Technik

### Three-dimensional reconstruction of unsteady supersonic flows using the CBOS technique

F. Leopold<sup>1</sup>, M. Ota<sup>2</sup>, D. Klatt<sup>1</sup>, K. Maeno<sup>2</sup>, J. Jagusinki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL), F-68301 Saint-Louis, Frankreich

<sup>2</sup> Graduate School of Engineering Chiba University, Chiba, Japan

Schlagworte: Strömungsvisualisierung, Schlieren, Rekonstruktion, Überschall  
Key words: flow visualization, Schlieren, reconstruction, supersonic

#### Zusammenfassung

Durch Brechungsindexänderungen werden Lichtstrahlen unterschiedlich abgelenkt. Dadurch kommt es zu einer scheinbaren Deformation des Hintergrunds. Um diese Deformationen 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 werden, kann aufgrund der Deformationen auf die Änderung des Brechungsindex und damit auf die Dichtegradienten 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*). Basierend auf diesen CBOS Bildern kann die drei-dimensionale Dichteverteilung mit Hilfe einer Rekonstruktion berechnet werden. Die Algebraische-Rekonstruktion-Technik (ART) ist eine iterative Methode, bei der die unbekanntenen Werte für die Dichte mit Gleichungssystemen für die unterschiedlichen Beobachtungswinkel berechnet werden müssen. Dabei konvergieren die Werte für die Dichte für eine Vielzahl von Vorwärts- und Rückwärtsprojektionen gegen die wahrscheinlichste (optimale) Dichteverteilung.

#### 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 werden 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 und deren durch Dichtegradienten verursachten Verschiebungen vermessen. Niessen et al. 1993 nutzten dieses Verfahren zur Vermessung von kohärenten Strukturen in kompressiblen Nachläufen. In der Patentschrift von Meier 1999 wird das Prinzip der BOS (*Background Oriented Schlieren*) Technik beschrieben. Als Hintergrund wird dabei ein Bild verwendet, auf dem ein zufällig verteiltes Punktemuster abgebildet ist (Abb. 1). Die durch die Strömung verursachten Verzerrungen

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

Die gemessenen Verschiebungen sind die Projektionen der Dichtegradienten entlang der optischen Achse. Bei der Verwendung von mehreren Projektionen kann mit Hilfe der Computer-Tomographie (CT) das drei-dimensionale Strömungsfeld rekonstruiert werden. Für achsensymmetrische Strömungen kann auf Techniken zurückgegriffen werden, die auf Abel- bzw. Fourier-Transformationen beruhen, wie Venkatakrishnan al. 2004, 2009 und Sourgen et al. 2012 zeigten. Ota et al. 2011 haben gezeigt, dass die Algebraische Rekonstruktion Technik (ART) ebenfalls zur Rekonstruktion von Dichtefelder verwendet werden kann. Sind Windkanalmodelle im Strömungsfeld vorhanden, bringt die ART Methode weniger numerischen Problemen mit sich.

Frühere Studien von Carlese et al. 1985 zeigten, dass bei Überschallgeschwindigkeiten an Windkanalmodellen mit Vorkörpern starke Wechselwirkungen zwischen der Anströmung und der Vorkörperumströmung auftreten können. Dabei breiten sich Druckstörungen entgegen der Anströmung in der Grenzschicht des Vorkörpers stromaufwärts aus. Dies führt zu starken Oszillationen des Stoßes an der Vorkörperspitze.

In diesem Artikel wird die instationäre Umströmung eines Modells mit Vorkörpers bei einer Anströmmachzahl von 3 untersucht. Dazu werden die CBOS Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera angefertigt. Mit Hilfe der Annahme, dass das Strömungsfeld nahezu achsensymmetrisch ist, kann das Dichtefeld mit Hilfe der Algebraischen Rekonstruktion Technik (ART) berechnet werden.

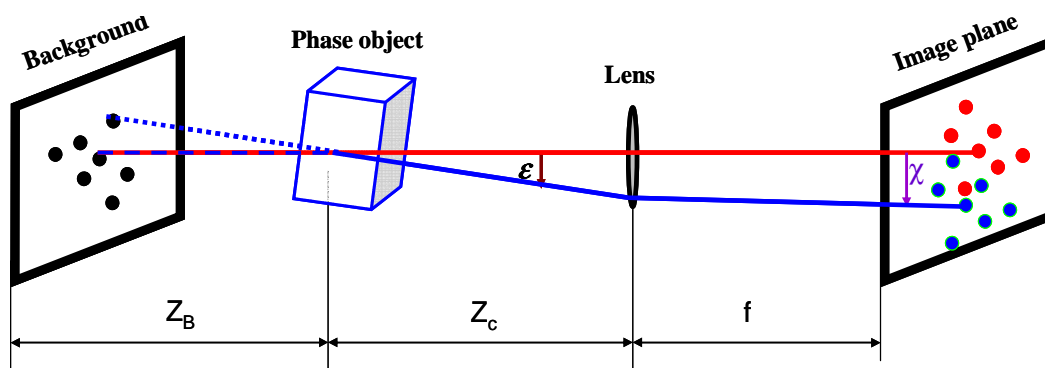


Abb. 1: Prinzipielle optische Anordnung eines BOS-Systems

## Prinzip der BOS-Technik

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

$$\frac{n-1}{\rho} = G(\lambda) \quad (1)$$

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

Die gemessene Verschiebung  $\chi$  ist entsprechend des folgenden Integrals:

$$\chi = \frac{f \cdot Z_B}{Z_C + Z_B - f} \int_{\Delta z} \frac{1}{n_0} \cdot \frac{\delta n}{\delta y} dz \quad (2)$$

gleich der Summe aller lokalen Dichtegradienten entlang eines Lichtstrahls.

### Farbiges Hintergrundbild

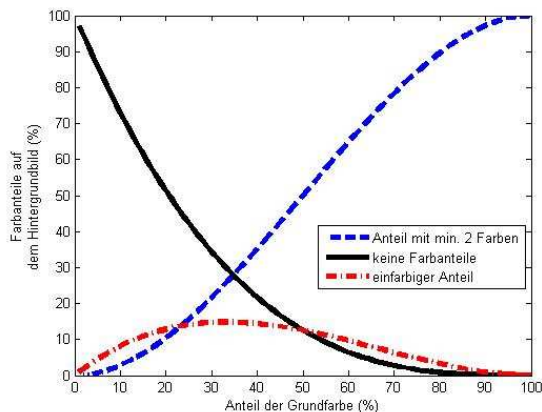


Abb. 2: Anteil der einzelnen Farbkomponenten im Hintergrundbild.

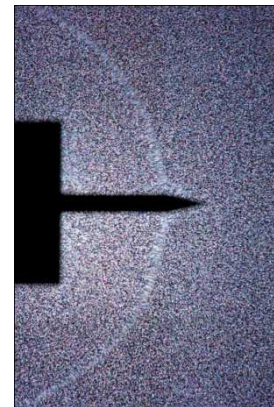


Abb. 3 Strömungsvisualisierung von zylindrischem Modell mit Vorkörper.

Untersuchungen zeigen (Leopold 2009), dass für eine optimale, einfarbige Auswertung die Hintergrundpunkte zwischen 30 und 70% 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 Abbildung 2 ist die Verteilung der einzelnen Farbbestandteile für ein typisches Hintergrundbild (Abb. 3) dargestellt. Dabei beträgt der jeweilige Anteil der Grundfarben Rot, Grün und Blau jeweils 35%. Mehr Informationen über die Auswertung von farbigen Hintergrundbildern ist unter Leopold 2009 zu finden.

### Windkanalversuche

Die Experimente wurden in dem  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$  intermittierend arbeitenden Überschallwindkanal des ISL bei einer Machzahl  $Ma$  von 3 durchgeführt. Die Reynoldszahl  $Re_D$  basierend auf dem Modelldurchmesser ( $D = 40 \text{ mm}$ ) beträgt  $2.7 \times 10^6$ ; bei der gewählten Anströmbedingung liegt der statische Druck  $p$  bei 190 hPa und die Dichte  $\rho$  bei  $0.651 \text{ kg m}^{-3}$ . Das Windkanalmodell besteht aus einem zylindrischen Rumpf und einem Vorkörper (Spike). Das Gesamtmodell ist in der Mitte des Windkanals montiert und wird ohne Anstellwinkel vermessen. Der Vorkörper besitzt eine Länge von  $L = 35 \text{ mm}$  mit einer konischen Spitze, deren Öffnungswinkel  $28^\circ$  beträgt (Abb. 3).

Der optische Aufbau ist senkrecht zur Symmetrieebene des Windkanals montiert. Die CBOS-Aufnahmen wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera vom Type Phantom v1610 mit

27000 Bildern pro Sekunde aufgenommen. Die Belichtungszeit beträgt 36  $\mu$ s. Aufgrund der hohen Bildrate liegt die Auflösung der Hochgeschwindigkeitskamera bei 640  $\times$  800 Pixel. Der Hintergrund wurde mit einer kontinuierlichen Weißlichtquelle beleuchtet. Um eine möglichst scharfe Abbildung sowohl des Modells als auch des Hintergrunds zu bekommen, wurde ein Aufbau, der einem Schlierenverfahren ähnelt, verwendet (Ota et al. 2012). Um mehr Details in der Strömung darstellen zu können, wurden noch zusätzliche Aufnahmen mit einem hochauflösenden Fotoapparat (Canon EOS 1 Ds Mark II), ausgestattet mit einem Normalobjektiv (f = 50), angefertigt. Der CMOS-Sensor des Fotoapparats besitzt eine Auflösung von 4992  $\times$  3328 Pixel. Dabei wurde der Hintergrundbild mit einem Blitz von 2.5  $\mu$ s Dauer von hinten beleuchtet. Bei sämtlichen Aufnahmen wurde auf das Hintergrundbild fokussiert und die kleinsten Blende verwendet, um eine möglichst große Schärfentiefe zu erzielen.

## Rekonstruktion des Strömungsfelds

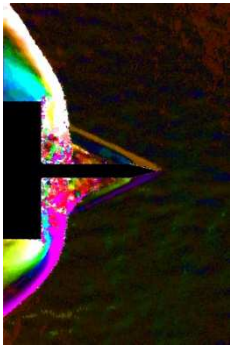
Die Algebraische Rekonstruktion Technik (ART) ist eine iteratives Berechnungsverfahren. Das unbekannte Dichtefeld wird diskretisiert und für jeden diskreten Knoten muss der Dichtegradient und letztendlich die Dichte bestimmt werden. Um die unbekannte Dichteverteilung in den Knoten bestimmen zu können, muss Gleichung (2) für die gemessenen Verschiebungen gelöst werden (Ota et al. 2012). ART ist wesentlich einfacher zu behandeln als die Filtered Back Projection Methode (FBP), die auf Fourier-Transformationen beruht (Sourgen et al. 2012). Für die FBP wird eine Vielzahl von Projektionen benötigt, um eine gute Rekonstruktion des Dichtefelds gewährleisten zu können. Zudem verursachen unvollständigen Projektionen, die durch die Abschattung des Modells entstehen, numerische Schwierigkeiten. Im Folgenden wird der iterative Prozess der ART-Methode genauer beschrieben:

$$f^{i+1}(x, y, z) = f^i(x, y, z) + \frac{P_k(X, Y) - R_k^i(X, Y)}{C_k(X, Y)} \quad (3)$$

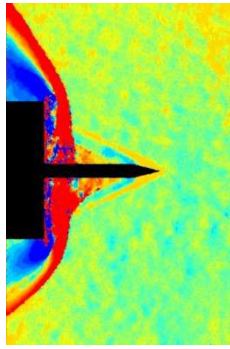
wobei  $f^i$  die Dichtegradientenverteilung zum Zeitpunkt  $i$  darstellt,  $P_k$  steht für die gemessenen Verschiebungsvektoren für die  $k$ -te Projektion,  $R_k^i$  bezeichnet die geschätzten Verschiebungswerte für die entsprechende Projektion, die aufgrund der Dichtegradienten zum Zeitschritt  $i$  abgeschätzt werden,  $C_k$  steht für die Anzahl der Knoten entlang der Projektionslinie;  $x, y, z$  stellen die physikalischen Koordinaten im Dichtefeld dar und  $X, Y$  sind die Koordinaten in den entsprechenden Projektionsebenen.

Um mit dem iterativen Prozess beginnen zu können, werden die Dichtegradienten für  $f^0(x, y, z)$  zu Null gesetzt. Dann werden die Verschiebungsvektoren für die erste Projektion  $R_1^1$  entsprechend Gleichung (2) bestimmt. Aufgrund der CBOS-Messung für die erste Projektion kann eine neue Abschätzung für die Dichteverteilung berechnet werden. Die dreidimensionale Dichterverteilung wird dann durch eine lineare Integration entlang der drei Raumrichtungen  $x, y$  und  $z$  erzielt. Dabei hat sich herausgestellt, dass mindestens 30 Iterationen über die Gesamtzahl der Projektionen nötig sind, um eine auskonvergierten Lösung für die Dichteverteilung zu erhalten. Um die Genauigkeit des Verfahrens zu bestimmen, wurden mehrere theoretische Testfälle berechnet. Zudem wurde das ART Verfahren mit anderen Methoden verglichen, die auf Abel- bzw. Fourier-Transformationen beruhen.

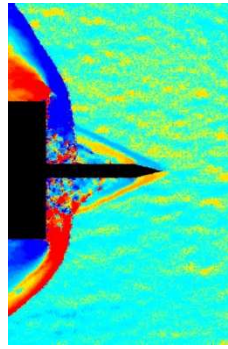
Für die Rekonstruktion von achsensymmetrischen Strömung wird nur eine gemessene Projektion benötigt, da alle Projektionen senkrecht zur Symmetrieachse gleiche Ergebnisse liefern. Ota et al. 2011 konnten zeigen, dass für eine gute Rekonstruktion mindestens 36 Projektionen in einem Winkelbereich zwischen 0° und 175° (Zwischenschritt 5°) ausreichend sind. Für die Rekonstruktion des Dichtefelds werden 152  $\times$  240  $\times$  240 Knoten verwendet. Die räumliche Distanz zwischen zwei Knoten entspricht 0,2 mm.



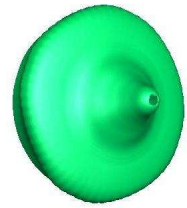
a) Pseudo-Farbschlieren



b) Horizontale Verschiebungen



c) Vertikale Verschiebungen

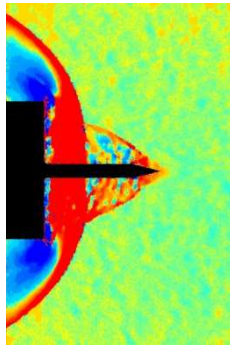


d) Isofläche für eine Dichte von  $\rho / \rho_\infty = 1,75$  vor dem Zylinder

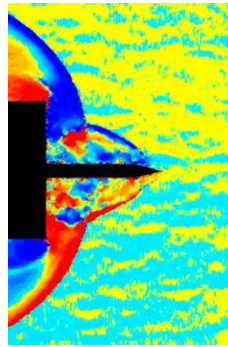
Abb. 4: Strömungssichtbarmachung bei  $t = 0 \mu\text{s}$ .



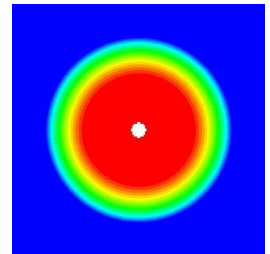
a) Pseudo-Farbschlieren



b) Horizontale Verschiebungen

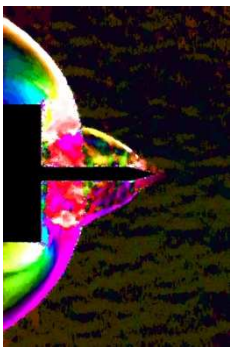


c) Vertikale Verschiebungen

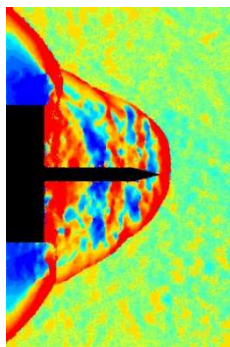


d) Radiale Verteilung der Dichte vor dem Zylinder (4 mm)

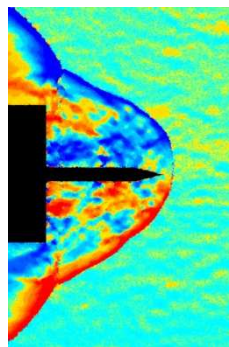
Abb. 5: Strömungssichtbarmachung bei  $t = 74 \mu\text{s}$ .



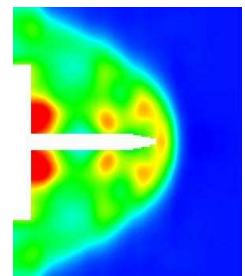
a) Pseudo-Farbschlieren



b) Horizontale Verschiebungen

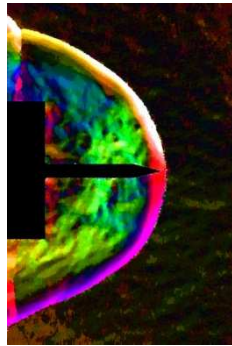


c) Vertikale Verschiebungen

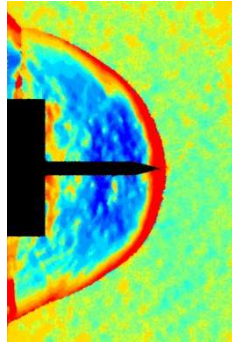


d) Rekonstruierte Dichte in der Mittelebene

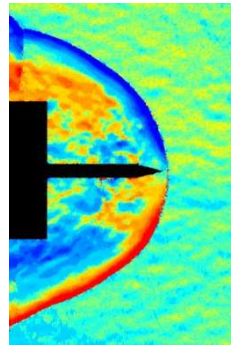
Abb. 6: Strömungssichtbarmachung bei  $t = 148 \mu\text{s}$ .



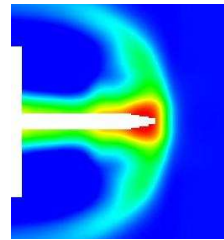
a) Pseudo-Farbschlieren



b) Horizontale Verschiebungen

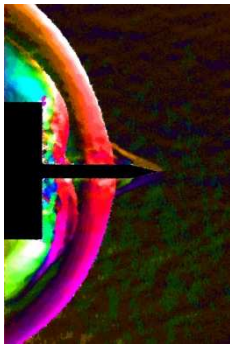


c) Vertikale Verschiebungen

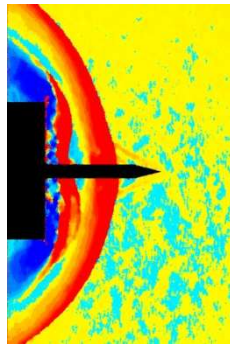


d) Rekonstruierte Dichte in der Mittelebene

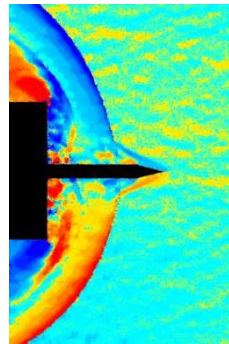
Abb 7: Strömungssichtbarmachung bei  $t = 222 \mu\text{s}$ .



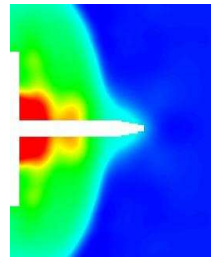
a) Pseudo-Farbschlieren



b) Horizontale Verschiebungen

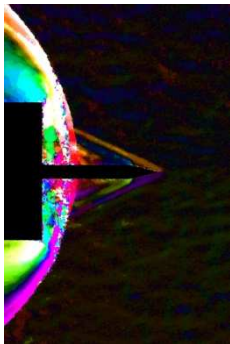


c) Vertikale Verschiebungen

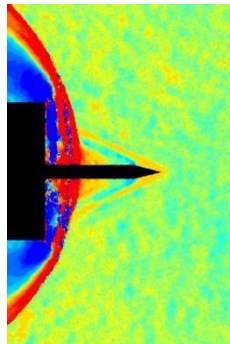


d) Rekonstruierte Dichte in der Mittelebene

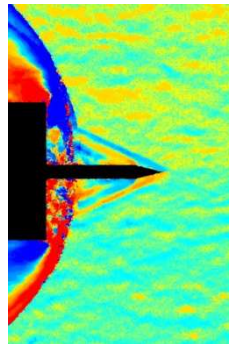
Abb. 8: Strömungssichtbarmachung bei  $t = 296 \mu\text{s}$ .



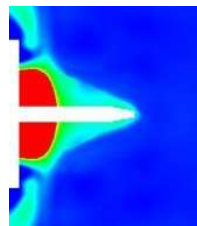
a) Pseudo-Farbschlieren



b) Horizontale Verschiebungen



c) Vertikale Verschiebungen



d) Rekonstruierte Dichte in der Mittelebene

Abb. 9: Strömungssichtbarmachung bei  $t = 370 \mu\text{s}$ .

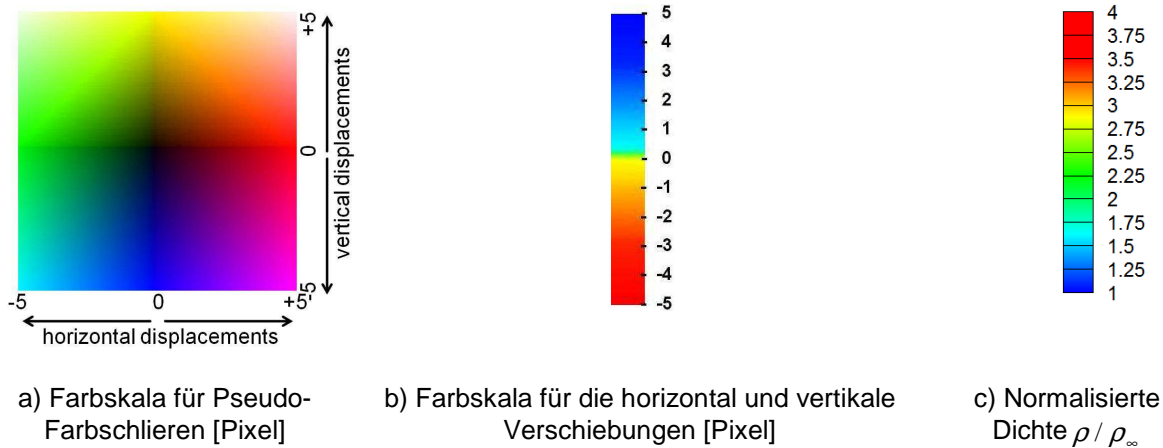


Abb. 10: Farbskalen für die Abbildungen 4 – 9.

## Experimentelle Ergebnisse

In den Abbildungen 4 bis 9 sind die Verschiebungen, verursacht durch die instationäre Vorkörperumströmung, bei verschiedenen Zeitschritten dargestellt. Die Größe der Abfragefelder der CBOS-Auswertung beträgt  $10 \times 10$  Pixel mit einer Überlappung von 80 %. In der ersten Spalte a) sind Pseudo-Farbschlieren für die Verschiebungen dargestellt. In den Spalten b) und c) sind die horizontalen bzw. die vertikalen Verschiebungen zu sehen. In der letzten Spalte sind die Ergebnisse aus der Rekonstruktion abgebildet. In Abb. 10 sind die entsprechenden Farbskalen für die Abbildungen 4 - 9 zu finden.

In Abb. 4 ist eine typische Strömungskonfiguration zu sehen, die vor allem bei längeren Vorkörpergeometrien ( $l/D > 1,2$ ) auftritt: ein Verdichtungsstoß an der Spitze des Vorkörpers, gefolgt von einem Expansionsfächer am Ende der konischen Spitze. Zudem bildet sich vor dem zylindrischen Teil ein senkrechter Verdichtungsstoß aus. In der Rekonstruktion (Abb. 4d) ist der konische Stoß von der Vorkörperspitze gut zu erkennen. Die Darstellung der radiale Dichteverteilung (Abb. 5d) zeigt deutlich den kissenförmige Bereich mit hoher Dichte vor dem Zylinder. Des Weiteren ist in Abb. 5 das stromaufwärts wandern von Störungen in der Grenzschicht des Vorkörpers zu erkennen. Dies führt zu einem Abheben der zu Beginn angelegten Kopfwelle (Abb. 6). In Abb. 7 ist eine Kopfwelle zu sehen, wie sie sonst nur bei der Umströmung von stumpfen Körpern vorzufinden ist. Aufgrund dieser stark ausgeweiteten Stoßwelle kann die aufgestaute Strömung vor dem Zylinder über die Modellschulter entweichen. Dadurch verschwindet der senkrechte Verdichtungsstoß vor dem Zylinder (Abb. 7d). Wie Hiraki et al. 2009 bereits zeigten, widersteht die abgehoben Stoßwelle der Anströmung nicht und kollabiert (Abb. 8). Nach ungefähr  $480 \mu\text{s}$  (Abb. 9) stellt sich wiederum der ursprüngliche Strömungszustand ein.

## Zusammenfassung

Die Color Background Oriented Schlieren Technik (CBOS) ist ein vielversprechendes Verfahren für die Analyse von drei-dimensionalen Strömungen mit Dichtegradienten. Im Vergleich zu den traditionellen Methoden wie z.B. der Schlieren-Methode, dem Differentialinterferometer, etc. ist der Aufbau der CBOS Technik mit einem geringeren Aufwand verbunden und die qualitative Auswertung der Visualisierung ist wesentlich besser.

Zudem liefert das farbige Hintergrundbild die Möglichkeit, acht unabhängige Korrelationen an jedem Punkt zu erstellen. Die Genauigkeit und die hohe räumliche Auflösung der CBOS Technik erlaubt eine Rekonstruktion von drei-dimensionalen und instationären Strömungen.

Besonders bei komplexen Strömungen ermöglicht die Dichteverteilung ein besseres Verständnis der auftretenden Strömungsphänomene.

## Literatur

- Calarese W., Hankey W. L., 1985: "Modes of Shock-Wave Oscillations on Spike-Tipped Bodies," *AIAA Journal*, Vol.23, No.2, pp.185-192.
- 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.
- Hiraki, K., Kleine H. Maruyama H., T. Hayashid T., Kitamura K., 2009: "Flow instability induced by spiked bodies", *Proc. SPIE 7126*, 28th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, 71260K, doi:10.1117/12.823751.
- 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
- Leopold F., 2009: "The Application of the Colored Background Oriented Schlieren Technique (CBOS) to Free-Flight and In-Flight Measurements", *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, Vol. 16, No. 4.
- Niessen R., Schäfer H.J., 1993: "Untersuchung eines Überschall-Nachlaufs mit Hilfe der Dichte-Speckle-Photographie", GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, Braunschweig
- Meier, G.E.A., 1999: " Hintergrundschielenverfahren", Deutsche Patentanmeldung, DE 19942856 A1
- Ota M., Hamada K., Kato H., Maeno, K., 2011: "Computed-tomographic density measurement of supersonic flow field by colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique", *Meas. Sci. Technol.*, 22, 104011.
- Ota M., Kato H., Maeno, K., 2012: "Three-dimensional density measurement of supersonic and axisymmetric flow field by colored grid background oriented schlieren (CGBOS) technique", *International Journal of Aerospace Innovations*, 4, 1-11.
- Ota M., Kato H., Maeno, K., 2012: "Improvements of Spatial Resolution of Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS) by Introducing Telecentric Optical System", *Proc. of the 15th International Symposium on Flow Visualization*, No. 77, pp. 1-10.
- Raffel, M., 2001: " Optische Untersuchungen in technischen Strömungen unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Detektion von Dichtegradienten", Habilitationsschrift, Technische Universität Clausthal
- Sourgen F., Leopold F., Klatt D., 2012: "Reconstruction of the density field using the Colored Background Oriented Schlieren Technique", *Optics in Lasers and Engineering*, Volume 50, No. 1, pp. 29-38, doi: 10.1016/j.optlaseng.2011.07.012.
- 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
- Venkatakrishnan L., Meier G. E. A, 2004: "Density measurements using the background oriented schlieren technique", *Exp. Fluids*, 37, pp. 237–247.
- Venkatakrishnan L, Suriyanarayanan P., 2009: "Density field of supersonic separated flow past an after body nozzle using tomographic reconstruction of BOS data", *Exp. Fluids*, 47, 463–473.