

ZEITAUFGELÖSTE VISUALISIERUNG VON DICHTEGRADIENTEN IM STRÖMUNGSFELD VON AIRBAG GASGENERATOREN

TIME RESOLVED VISUALIZATION OF DENSITY-GRADIENTS WITHIN THE FLOW FIELD OF AIRBAG GAS GENERATORS

J. Klinner¹, C. Willert¹, M. S. Glumm², E. Blümcke³

¹ DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Antriebstechnik, Linder Höhe, 51147 Köln, email: joachim.klinner@dlr.de

² DLR, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Abteilung Windkanäle

³ AUDI AG, Abteilung I/EK-55, 85045 Ingolstadt

BOS, Dichtegradient, Freistrahler, Verdichtungsstoß, Hochgeschwindigkeit, Airbag Simulation
BOS, density-gradient, free jet, shock, high-speed, airbag simulation

Zusammenfassung

Innerhalb der vorgestellten Untersuchungen wird auf die Sichtbarmachung von Dichtegradienten in der Überschall-Abströmung von Airbag Gasgeneratoren eingegangen. Als Verfahren hierfür wurde die Background Oriented Schlieren Technik (BOS) eingesetzt. Durch Wahl einer geeigneten Beobachtungsrichtung konnten Dichtegradienten zwei-komponentig mit 30000 Bildern pro Sekunde für einen Zeitraum von 50 ms nach erstem Gasaustritt aufgezeichnet werden. Es wird näher auf den experimentellen Aufbau, die Empfindlichkeit für Dichtegradienten und die laterale Auflösung der Anwendung eingegangen. Außerdem werden Unterschiede zur konventionellen Schlierentechnik vorgestellt und die Grenzen der Anwendbarkeit beider Verfahren bezüglich der untersuchten Strömung aufgezeigt. Abschließend werden exemplarisch Ergebnisse mit typischen Gradientenstrukturen vorgestellt.

Einleitung

Um den Entfaltungsvorgang von Insassen-Airbags weiter zu optimieren und somit die Verletzungsgefahr beim Aufprall zu minimieren, ist es notwendig ein tieferes physikalisches Verständnis für die ablaufenden Strömungsvorgänge zu entwickeln. Einfache numerische Modelle, die oft in der Entfaltungssimulation verwendet werden, gehen von einer gleichmäßigen Druckverteilung im Luftsack zu jedem Zeitpunkt aus (uniform pressure model) und erlauben nicht die Abbildung von Freistrahleffekten, welche gerade im ersten Moment der Entfaltung auftreten. In Experimenten der Automobilindustrie zeigte sich jedoch, dass gerade diese Effekte für die meisten Verletzungen bei Insassen, die z.B. zu dicht am Airbag sitzen, verantwortlich sind [Mestreau et al. 1996].

Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen sollen experimentelle Daten gewonnen werden, um die Gasausströmung innerhalb der ersten Millisekunden zu charakterisieren und um thermodynamische und strömungsmechanische Randbedingungen für genauere Modelle wie das *Jet* oder *Chamber Model* innerhalb der CFD/CSD¹ Entfaltungssimulation zu bilden.

Da Airbag-Treibsatzladungen bereits kurz nach der Zündung an den Ausströmöffnungen kurzzeitig einen Druck von bis zu 50 bar aufbauen und dabei hohe Gasmassenströme von mehreren Kilogramm pro Sekunde freisetzen, gestaltet sich die Messung von Druck-, Temperatur- oder Geschwindigkeitsverteilungen im hoch turbulenten Strömungsfeld als schwer umsetzbar.

In einem ersten Schritt der Untersuchungen konnten jedoch PIV Geschwindigkeitsmessungen bei stationärer Durchströmung unter hohem Druck von bis zu 20 bar realisiert werden. Sie geben einen Überblick über das zeitlich gemittelte Strömungsfeld entlang der Gasgeneratorachse, bestehend aus interagierenden Überschallfreistrahlen, mit typischen Stoßkonfigurationen [Voges et al. 2007]. In einem weiteren Schritt soll nun die Lage und der Verlauf von Dichtegradienten in der Abströmung von realen Gasgeneratoren zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Zündung bestimmt werden, um die radiale und axiale Ausprägung der Freistrahlen und die Verteilung der Gasausströmung über die Ausströmöffnungen im zeitlichen Verlauf abschätzen zu können.

Wie sich bereits an früheren Zündversuchen gezeigt hat, lassen sich die gesuchten Überschallstrukturen, bestehend aus Mach'schen Scheiben oder Barrel-Schock-Systemen mit konventioneller Schlierentechnik nur kurzzeitig bis zu einem Zeitpunkt von ca. 370 μ s nach erstem Gasaustritt aufzeichnen. Es stellte sich heraus, dass bei Beobachtung durch mehrere Freistrahlen hindurch die Strahlablencungen und Dichtefluktuationen im Gas zu hoch sind, um durch das intensitätsbasierende Verfahren abgebildet zu werden. Zusätzlich erschwerte es Rauchgas, kontrastreiche Schlierenaufnahmen zu erhalten. Für eine verbesserte Sichtbarmachung wurde daher mit der Background Oriented Schlieren Technik (BOS) gearbeitet. Das Verfahren basiert statt auf der Aufzeichnung von Intensitätsänderungen auf der direkten Bestimmung der Strahlablencung durch Messung des lokalen Versatzes eines im Hintergrund angeordneten Speckle-Musters. Es ermöglicht mit vergleichsweise geringem optischem Aufwand mit adaptiver Empfindlichkeit zu arbeiten und verschiedene Beobachtungsrichtungen zu realisieren. Ein weiterer Vorteil ist, dass BOS für alle lateralen Richtungen des Dichtegradientenverlaufs im Sehfeld empfindlich ist, während man bei der Schlierentechnik durch die Orientierung der Schlierenkante auf eine Richtung festgelegt ist. BOS wurde bereits erfolgreich zur Lokalisierung von Dichtegradienten in verschiedenen technischen Strömungen wie transsonisch umströmte Zylinder, Rotorblattspitzenwirbel [Richard et al. 2001] und in interagierenden Unterschall-Freistrahlen [Goldhahn et al. 2007] eingesetzt und validiert. Wie im Folgenden gezeigt wird, konnte durch Optimierung des experimentellen Aufbaus eine ausreichende Ortsauflösung erzielt werden, um charakteristische Stoßkonfigurationen darzustellen.

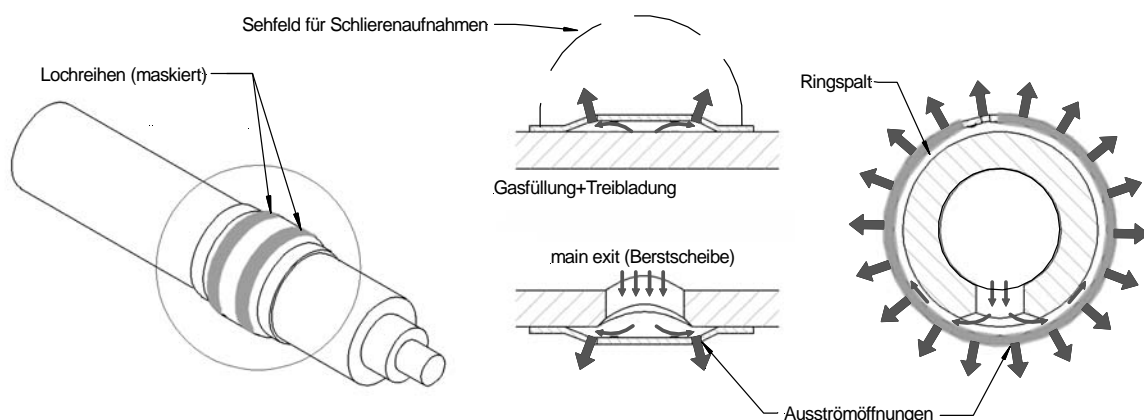


Abb. 1 Schematische Darstellung des Gasgenerators (nicht maßstäblich, Ausblasbohrungen maskiert), links: Gesamtansicht, mitte: Detailansicht im Längsschnitt, rechts: Detailansicht im Querschnitt

Aufbau des untersuchten Gasgenerators

Der Hybrid-Gasgenerator (vgl. Abb. 1) hat die Form eines Hohlzylinders, der die pyrotechnische Treibladung sowie komprimierte Oxidations- und Inertgas Füllungen enthält.

Durch Zündung des Treibmittels wird der Gasdruck im Inneren auf bis zu 1000 bar erhöht, so dass eine in der Hauptaustrittsöffnung angebrachte Berstscheibe die freigesetzten Gasgemische in den darüber angeordneten Ringspalt entlässt. Dieser verteilt das Gas über den Generatorumfang. Über zwei charakteristische Lochreihen tritt zuerst Inertgas und dann das durch exotherme Reaktion bis auf etwa 800 K erwärmte Gas durch Überschallfreistrahlen über den Umfang aus und bläst den Airbag auf.

Resultate aus der Visualisierung mit konventioneller Schlierentechnik

Mit der Schlierentechnik konnten während einer früheren Messkampagne an einem leicht abgeänderten Gasgenerator nur innerhalb der ersten 100 μs nach Gasaustritt die einhüllenden Stoßfronten abgebildet werden (vgl. Abb. 2, links). Im nachfolgenden überexpandierten hoch turbulenten Strömungsfeld sind die Ablenkungen und damit die Abschattung der Lichtquelle durch die Schlierenkante zu hoch. Das zeigt sich in den überwiegend dunklen Bereichen im Bild. Nach Herausnehmen der Schlierenkante (Schattenaufnahmen) wurden vereinzelt Stoß Strukturen wie Barrel-Schocks sichtbar (vgl. Abb. 2, rechts, Markierung mit schwarzem Pfeil), diese werden etwa 370 μs nach erstem Gasaustritt ebenfalls durch austretendes Rauchgas und hohe Dichtefluktuationen überlagert.

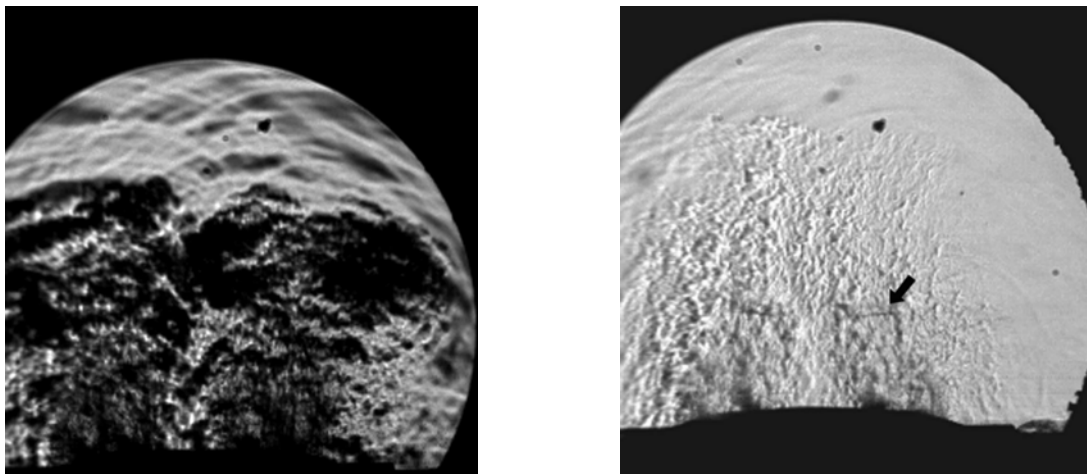


Abb. 2 High Speed Schlieren- und Schattenaufnahmen 148 μs nach erstem Gasaustritt

Experimenteller Aufbau für Background Oriented Schlieren

Im Vergleich zur Schlierentechnik, die eine kollimierte Beleuchtung erfordert und hohe Anforderungen an die optische Abbildung stellt, ist der BOS Aufbau experimentell relativ einfach umzusetzen. Hierbei wird ein im Hintergrund der Überschallströmung angeordnetes statistisches Speckle-Muster mit einer Kamera aufgenommen. Der Abbildungsstrahlengang erfährt durch Dichtegradienten in der Strömung eine Ablenkung und somit lokal einen Versatz in der Bildebene des Kameraobjektivs. Er ist proportional zur geometrischen Summe der Dichtegradienten $d\rho/dx$ und $d\rho/dy$ entlang der Beobachtungsrichtung [Richard et al. 2001, Raffel et al. 2007]. Der örtliche Versatz kann mit Hilfe von PIV Kreuzkorrelationsalgorithmen ausgewertet werden.

Der Gasgenerator wurde aus zwei orthogonal angeordneten Beobachtungsrichtungen simultan mit zwei High-Speed Kameras aufgenommen. Die Beobachtungsrichtungen wurden so gewählt, dass die Ausprägung der Freistrahlen entlang der Gasgeneratorachse und über

Teilstücke des Umfangs gleichzeitig aufgezeichnet werden konnten (vgl. Abb. 3). Um auch bei Belichtungszeiten $< 33 \mu\text{s}$ noch mit einer möglichst kleinen Blende und somit hoher Schärfentiefe arbeiten zu können, mussten 2 kW Halogen-Strahler mit Reflektor und teilweise mit Fresnel-Linsen zur Bündelung des Lichtstroms eingesetzt werden. Dies führte zu einer hohen Wärmebelastung der Schirme, was zusätzliche Schliereneffekte in den Kamerastrahlengang einbrachte. Um diese Effekte zu minimieren und um die Ausbreitung warmer Explosionsgase in die Kamerastrahlengänge einzuschränken, wurde ein Gebläse mit $10 \text{ m}^3/\text{min}$ eingesetzt und auf die Gasgeneratormimik ausgerichtet. Um den zusätzliche Ortsversatz durch die Wechselwirkung zwischen den bei der Explosion freiwerdenden Druckwellen und dem Aufbau zu reduzieren, wurden Kamera und Objektiv durch zusätzliche Gehäuse geschützt. Zusätzlich wurde die Gasgeneratorhalterung mechanisch vom restlichen Aufbau entkoppelt. Auf diese Weise konnten die Effekte soweit minimiert werden, dass sie sich erst mit einer Verzögerung von etwa 30ms nach der Zündung durch örtlich gleichförmige Shifts über das gesamte Sichtfeld bemerkbar machen, die gut von den gesuchten Effekten zu trennen waren.

Die Kamera-Auflösungen richten sich nach der verwendeten Bildwiederholrate und betragen 512×512 Pixel bei 10 kHz bzw. 256×256 Pixel bei 30 kHz. Die Speckle-Dichte im Hintergrund lag im Mittel bei $63 \text{ speckles}/\text{cm}^2$ mit einem mittleren Flecken-Durchmesser von 0.7 mm. Damit wurde sichergestellt, dass etwa 25-34 Flecken mit einer Bildgröße von etwa 3 Pixeln im 32 Pixel Abfragefenster liegen, was für die Software-seitige Schwerpunktbestimmung des Korrelationsmaximums eine Unsicherheit für die Bestimmung der Speckle-Verschiebung von $< 0,1$ Pixel gewährleistet [Raffel et al. 2007].

Tabelle 1 BOS Setup

	View 1 tangential (Kamera 1)	View 2 axial (Kamera 2)
Schirmabstand z_D	320 mm	500 mm
Abst. Kamera z_A	960 mm	
Maßstab M (Schirm)	0,0870 4,97 px/mm	0,0763 4,36 px/mm
Maßstab M' (Gasgenerator)	0,118 6,76 px/mm	
Optik	f=105 mm f# 11	

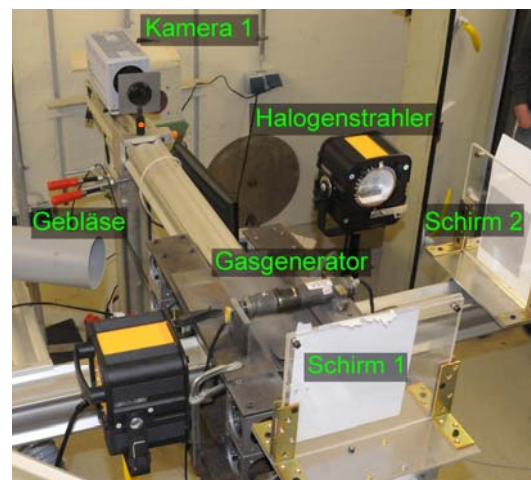


Abb. 3 BOS Setup, Kamera 2 ist normal zu Schirm 2 angeordnet und außerhalb des linken Bildrands

Empfindlichkeit und Auflösungsvermögen für Dichtegradienten

Hierzu vorab einige generelle Betrachtungen [vgl. auch Richard et al. 2001]. Dichtegradienten bewirken laut Gladstone-Dale Gesetz proportionale Brechzahländerungen im austretenden Gas. Die Gladstone-Dale Konstante ist der Proportionalitätsfaktor und hängt im Wesentlichen von der Gaszusammensetzung und der eingestrahelten Lichtwellenlänge ab.

$$\frac{dn}{d\rho} = G(\lambda)$$

Für kleine Ablenkungen ε bei einem Abbildungsmaßstab M und dem Abstand z_D zum Schirm (vgl. Abb. 4) gilt für den Versatz in der Bildebene

$$\Delta y' = z_D \varepsilon_y M$$

Der Ablenkwinkel ε hängt sowohl von der Größe als auch von der Lage und Orientierung der Dichtegradienten in der Strömung ab. Bei Durchgang des Strahlenbündels durch ein Messvolumen tragen alle Gradienten $d\rho/dx$ und $d\rho/dy$ integriert über z zum Ortsversatz des Speckle-Musters bei. Eine geometrische Abschätzung der lateralen Auflösung des Verfahrens, gegeben durch den Unschärfekreis mit dem Durchmesser d_i , den ein Punkt im Messvolumen in der Bildebene hinterlässt, hängt im Wesentlichen vom Abstand z_A , dem Abbildungsmaßstab M' , der auf z_A bezogen ist, der Objektivblendenzahl $f_\#$ sowie der Brennweite ab

$$d_i = \frac{f}{f_\#} \left(1 + \frac{1}{f} M' (f - z_A) \right)$$

Der Unschärfekreis d_i legt einen sinnvollen Richtwert für die Größe des Abfragefensters fest. Die verwendete Fenstergröße von 32×32 Pixel entspricht in der Bildebene $0,56 \text{ mm}$. Der Unschärfekreis liegt bei $0,37 \text{ mm}$. Die Ortsauflösung wird limitiert durch die Größe des Abfragefensters in der Messebene und beträgt $4,7 \text{ mm}$ (vgl. Parameter Tabelle 1).

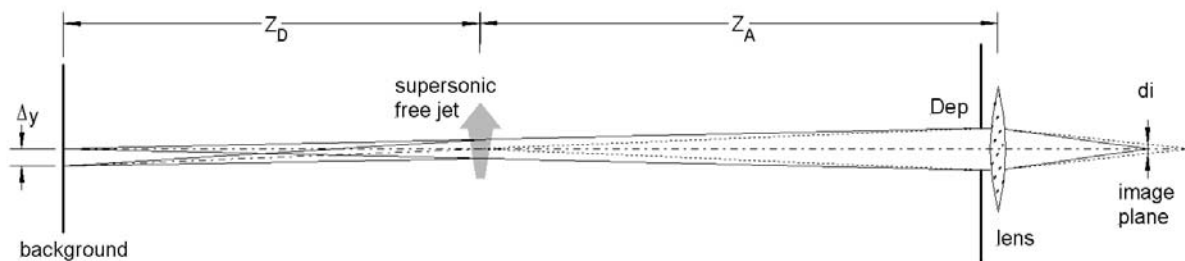


Abb. 4 Abbildungsstrahlengang, Erläuterung im Text

Für die axiale Blickrichtung (Kamera 2) können rechnerisch pro Abfragefenster bei minimalen Displacements von $0,1 \text{ Pixeln}$ Brechzahländerungen von etwa $4,6 \cdot 10^{-5}$ nachgewiesen werden. Bei einer Wellenlänge von $\lambda=500 \text{ nm}$ entspricht dies vergleichsweise in Luft lateralen Dichteänderungen von etwa $0,2 \text{ kg/m}^3$ pro Abfragefenster.

Datenevaluierung

Die Auswertung der Daten und die Bestimmung des lokalen Speckle-Versatzes bezogen auf ein Referenzbild ohne Schlieren erfolgte mit PIVview 3.0. Für das Referenzbild wurden alle Aufnahmen nach Zündtrigger bis zum ersten Gasaustritt gemittelt (je nach Bildrate ca. 100-350 Bilder). Zur Verbesserung der Genauigkeit der Bestimmung der Displacements wurde ein adaptiver Multigrid-Algorithmus und Sub-Pixel-Imageshifting eingesetzt. Die Signal-Peak Detektion erfolgte mit der Whittaker-Rekonstruktion (truncated sinc reconstruction). Entsprechend der Größe des Unschärfekreises wurde eine Größe der Abfragefenster von 32 Pixeln gewählt. Als Samplingintervall wurde $16 \times 16 \text{ Pixel}$ eingestellt.

Im Bereich der Ausströmöffnungen traten, bedingt durch starke Rauchentwicklung, sehr niedrige Kontraste auf. Dies führte zu einem niedrigen Signal-Rausch-Abstand und machte eine Validierung der Daten notwendig (vgl. Tabelle 2). Bei Nichteinhaltung der Kriterien wurden Signal-Peaks niedrigerer Ordnung geprüft und ggf. zugelassen.

Tabelle 2 Validierungsparameter

	Max Displacement	Max Displacement diff
View 1 tang.	8 px	4 px
View 2 axial.	4 px	2 px

Ergebnisse der BOS Messungen

Der aus gleicher Beobachtungsrichtung wie bei den Schlierenaufnahmen aufgenommene Speckle-Versatz (vgl. Abb. 5, links) zeigt ebenfalls innerhalb der ersten 100 μs Stoßsysteme. Nach 2-3 ms überwiegen jedoch sehr hohe horizontal gerichtete Ablenkungen in den Bereichen beider Lochreihen (vgl. Abb. 5, rechts). Die Ursache hierfür ist die Überlagerung von Dichteeffekten aus mehrere Freistrahlen innerhalb einer Lochreihe. Dabei bläst ein Teil der Freistrahlen warmes Gas in Richtung Kamera 1. Diese Gradienten haben größere Abstände zum Schirm und bewirken daher einen deutlich größeren Speckle-Versatz.

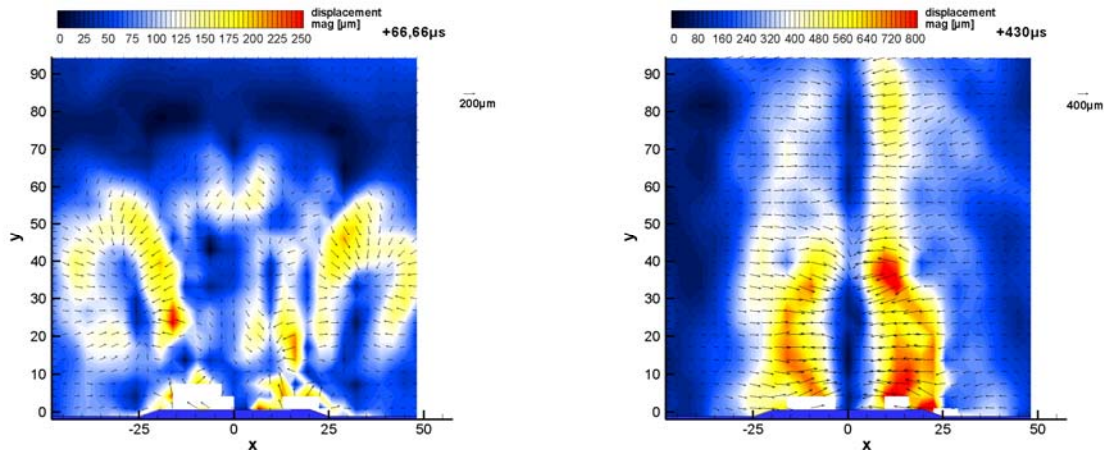


Abb. 5 Mit Kamera 1 gemessene Speckle-Verschiebungen zu verschiedenen Zeitpunkten nach Gasaustritt: links kurz nach Zündung, charakteristische Stoßkonfigurationen werden sichtbar; rechts nach 430 μs , überwiegend horizontale Shifts durch Überlagerung von Dichteeffekte mehrerer Freistrahlen

Die axiale Blickrichtung (Kamera 2) ermöglichte über einen deutlich längeren Zeitraum von bis zu 50ms nach erstem Gasaustritt die Beobachtung von Dichtegradienten an den Überschall-Freistrahlen. Danach sind auch hier alle Effekte durch hohe Dichtefluktuationen im gesamten Sehfeld überlagert. Für eine verbesserte Sichtbarmachung der kurzzeitig stabilen Strukturen wurden Mittelungen über 2 ms (60 Bilder bei 30 khz) durchgeführt. Es zeigt sich, dass Speckle-Verschiebungen in radialer Richtung, hervorgerufen durch Überschallstrukturen wie Mach'sche Scheiben, nach etwa 5 ms durch starke Dichteänderungen in tangentialer Richtung überlagert werden (vgl. Abb. 6). Für die radialen Strukturen kurz nach Zündung, wie auch für die tangential ausgeprägten Gradienten, die weitgehend auf sich ändernder Gaszusammensetzung und Temperatureffekten basieren, wird im Folgenden jeweils ein Beispiel aufgeführt. Zur Verdeutlichung wurden zusätzlich die Projektionen von dx und dy in Hauptströmungsrichtung (radial) und in tangentialer Richtung gegenübergestellt.

Ausblick

Die separate Auflösung reiner Überschallstrukturen an einzelnen Freistrahlen ist bei der Untersuchung von realen Gasgeneratoren schwer umsetzbar, da mehrere Dichteeffekte überlagert werden. Sie resultieren vorrangig aus der zeitlich variierenden Gaszusammensetzung und der Überlagerung mehrerer Freistrahlsysteme aus unterschiedlichen Lochreihen. Daher wären Untersuchungen an generischen Gasgeneratoren mit einzelnen Freistrahlsystemen ein denkbarer Schritt.

Des Weiteren besteht Optimierungsbedarf hinsichtlich der lateralen Ortsauflösung des Verfahrens, die mit kleinerer Blende der Optik bis zur Beugungsgrenze steigt. Um auch bei hohen Bildraten und kleinen Blenden die nötigen Intensitäten zu erzeugen, stehen neben stro-

boskopischer Blitzlampenbeleuchtung (zum Zeitpunkt der Messung nicht verfügbar) neuerdings auch gepulste LED Arrays zur Verfügung [vgl. Bröder & Sommerfeld 2007]. Die Vorteile dieser Lichtquelle sind ein zeitkonstanter Lichtfluss bei gleichzeitiger Abwesenheit von Schliereffekten aufgrund von Wärmestrahlung und Konvektion, wie es bei Halogen-Strahlern der Fall ist. Um zu quantitativen Aussagen über die Dichteverteilung zu kommen, wäre es nötig, eine geeignete numerische Integration der Gradientenfelder umzusetzen, wie sie z.B. ansatzweise von Richard et al. 2000 dokumentiert wurde.

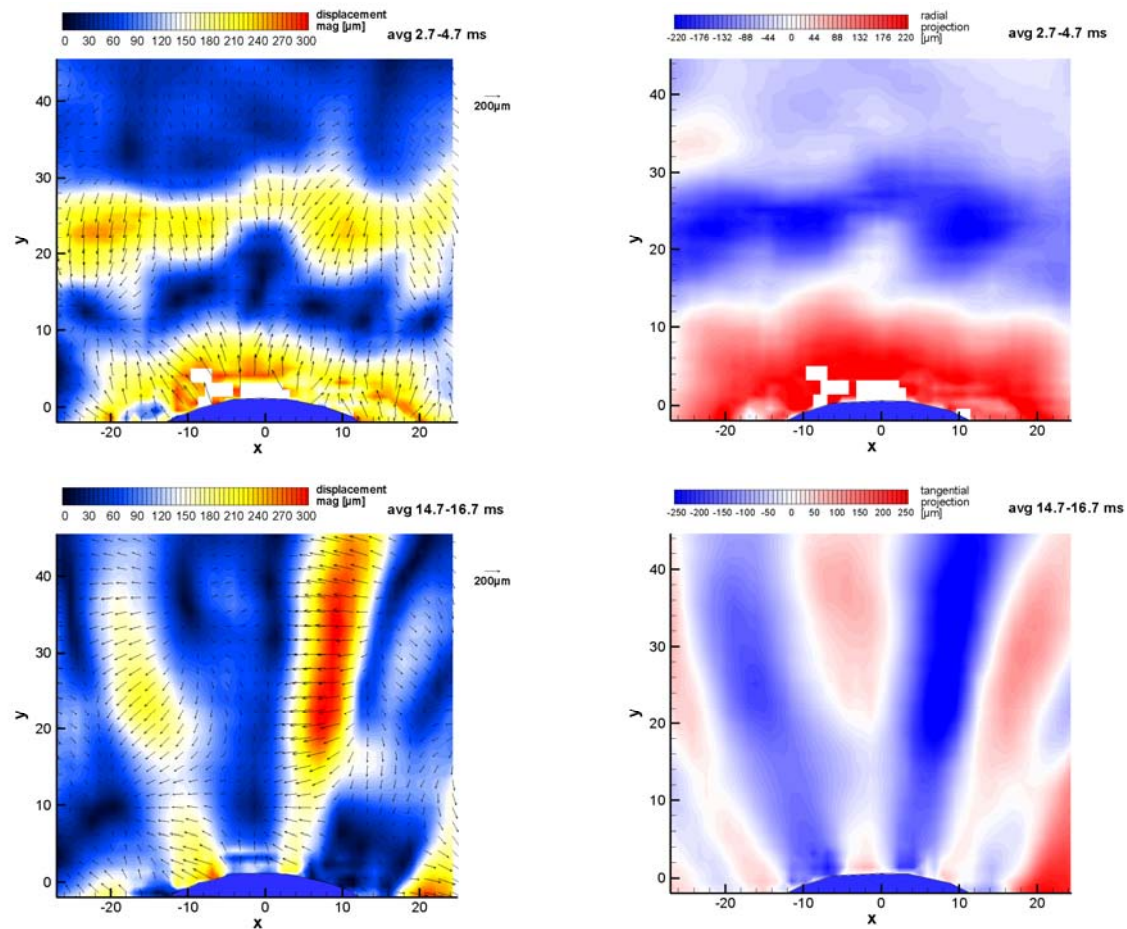


Abb. 6 Mit Kamera 2 gemessene Speckle-Verschiebungen zu verschiedenen Zeitpunkten, gemittelt über 2 ms, links Betrag und Vektorfeld, rechts radiale und tangentiale Projektion, Erläuterung im Text

Dankesworte

Dank gilt der AUDI AG, insbesondere Herrn Blümcke, für die Erlaubnis zur Veröffentlichung dieser Daten und der Prüfstands-Crew vom VMK am DLR für die gute Zusammenarbeit während der Versuche.

Literatur

Bröder D., Sommerfeld F. (2007): Planar shadow image velocimetry for the analysis of the hydrodynamics in bubbly flows. *Meas. Sci. Technol.* 18: 2513–2528

Goldhahn, E.; Seume, J. (2007): *The Background Oriented Schlieren Technique: Sensitivity, Accuracy, Resolution and Application to a Three-Dimensional Density Field*. *Experiments in Fluids* 43: 241–249

Mestreau, E.; Loehner, R. (1996): *Airbag Simulation using Fluid/Structure Coupling*. AIAA-1996-798 in: *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 34th*, Reno, NV, Jan. 15-18

Raffel M., Willert C., Wereley S., Kompenhans J. (2007) *Particle Image Velocimetry, a Practical Guide* (Berlin: Springer)

Richard H, Raffel M., Rein M., Kompenhans, J., Meier G. E. A. (2000): *Demonstration of the applicability of a background oriented schlieren (BOS) method*. In: 10th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics (Lisbon, 2000)

Richard, H.; Raffel, M. (2001): *Principle and Applications of the Background Oriented Schlieren (BOS) Method*. Measurement Science and Technology, 12 (9), S. 1576 – 1585

Voges, M.; Kliner, J.; Willert, C.; Blümcke, E. (2007): *PIV Messungen in interagierenden Überschall-Freistrahlen in druckbelasteter Umgebung*. In: GALA 2007, 15. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Rostock, 2007-09-04 - 2007-09-06