

PIV MESSUNGEN IN INTERAGIERENDEN ÜBERSCHALL-FREISTRAHLEN IN DRUCKBELASTETER UMGEBUNG

PIV MEASUREMENTS IN INTERACTING SUPERSONIC FREE JETS UNDER PRESSURIZED CONDITIONS

M. Voges¹, J. Klinner¹, C. Willert¹, E. Blümcke²

¹ DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Antriebstechnik, Linder Höhe, 51147 Köln

email: melanie.voges@dlr.de

² AUDI AG, Abteilung I/EK-55, 85045 Ingolstadt

PIV, Überschall, Freistrahler, Verdichtungsstoß, Feststoff-Seeding, Mach, Druck
PIV, supersonic, free jet, shock, solid seeding, Mach, pressure

Zusammenfassung

Basierend auf einer Fragestellung der Automobilindustrie wurde das Ausströmverhalten von Airbag-Gasgeneratoren mithilfe der Particle Image Velocimetry (PIV) untersucht. Dabei stellten die Umgebungsbedingungen mit Drücken bis 20 bar hohe Anforderungen an die Messtechnik. In diesem Beitrag wird insbesondere auf die Schwierigkeit eingegangen, druckbelastete, supersonische Strömungen bei erhöhten Umgebungstemperaturen adäquat mit den notwendigen Partikeln anzureichern.

Die aus den PIV Messungen resultierenden 2-komponentigen (2C), flächigen Geschwindigkeitsfelder dienten einerseits dem prinzipiellen Verständnis der Strömungsphänomene in den interagierenden Überschall-Freistrahlen, und wurden andererseits zur Validierung der numerischen Berechnungen des Strömungsbildes herangezogen.

1 Einleitung

Mit dem stetigen Entwicklungsfortschritt in diversen Bereichen der industriellen Strömungstechnik (z.B. Antriebstechnik, Motorenentwicklung, Automobilbau) wird die optische Messtechnik zur Untersuchung von komplexen Strömungsphänomenen vor immer neue Herausforderungen gestellt. Obwohl heutzutage adäquate Hardware und Software für Laserbasierte Strömungsanalyse zur Verfügung steht, besteht die besondere Schwierigkeit für PIV Anwendungen unter hohen Temperaturen und Drücken neben der optischen Zugänglichkeit der Messstrecke nach wie vor in der Bereitstellung einer ausreichenden Menge Partikel sowie deren homogene Verteilung im beobachteten Strömungsbereich. Da unter solchen Randbedingungen die Verwendung von Flüssigkeits-basiertem sog. Tröpfchen-Seeding nicht mehr möglich ist, wird hier auf Feststoffpartikel zurückgegriffen. Für den Einsatz mit optischer Strömungsmesstechnik sind eine Reihe von geeigneten Materialien bekannt und erprobt (siehe z.B. Melling 1997 oder Voges et al. 2007).

Im vorliegenden Fall, der auf einer Fragestellung der Automobilindustrie basiert, wurde das Ausströmverhalten von Airbag-Gasgeneratoren betrachtet. Das ausströmende Gas bläst einen Luftsack auf, in dem der Insasse im Falle eines Unfalls sicher aufgefangen wird. Ein Ziel der vorliegenden Untersuchung war die Ergänzung traditioneller Auslegungsverfahren

von Airbag-Modulen durch ein besseres physikalisches Verständnis der zugrunde liegenden instationären Strömungsvorgänge.

An einer zylindrischen Gasgenerator-Mimik sollten daher die Geschwindigkeitsfelder der interagierenden Freistrahlen mit Überschallströmung untersucht werden. Das Druckgehäuse der Gasgenerator-Mimik war bereits für optische Messtechnik mit ausreichenden optischen Zugängen ausgestattet. Somit eignete sich der Aufbau gut für die flächige Untersuchung mit dem PIV Verfahren. Ein auf Öltröpfchen basierendes Seeding konnte wegen des hohen Druckes (>20 bar) hier nicht eingesetzt werden. Stattdessen konnte ein neues Verfahren der Feststoffpartikel-Förderung basierend auf dem bekannten Fließbett-Verfahren erfolgreich umgesetzt werden. Die prinzipielle Anwendbarkeit von PIV auf trans- und supersonische Strömungen wurde bereits in verschiedenen Bereichen demonstriert (siehe z.B. Scarano und van Oudheusen 2003, Voges et al. 2007).

2 Adaption der Gasgenerator-Mimik an die Prüfstandsumgebung

Zur Reproduktion der charakteristischen Überschall-Freistrahlen wurde die Gasgenerator-Mimik in ein spezielles Druckgehäuse (Abb. 1) eingesetzt und an die Druckluftversorgung des Hyperschall-Kanals H2K des DLR Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik (Köln) angeflanscht. Der Gasgenerator besteht im Wesentlichen aus zwei übereinander geschobenen Hohlzylindern, so dass zwischen den Zylindern ein Ringspalt entsteht. Über den inneren Zylinder wird die Druckluft durch eine zentrale Öffnung (Blende) in den Ringspalt geleitet. Dort verteilt sich die Luft über den Umfang und tritt über eine charakteristische Lochkonfiguration aus dem Zylinder in Form von expandierenden Überschall-Freistrahlen wieder aus (siehe Abb. 2).

In der realen Anwendung sorgen diese Freistrahlen für die ordnungsgemäße Entfaltung des eigentlichen Airbags in einer Unfallsituation. Der Luftsack entfiel hier für die Strömungsuntersuchung zugunsten der optischen Zugänglichkeit und stationärer Strömungsverhältnisse. In der vorliegenden Versuchsanordnung wurde die Freistrahlsströmung über das Druckgehäuse und den Abluftkanal des H2K abgeführt. Die Löcher waren in vier symmetrischen Reihen von je 10 Löchern gleichmäßig über den Umfang des äußeren Zylinders verteilt. Das gesamte Versuchsprogramm umfasste verschiedene Lochkonfigurationen, die jedoch in diesem Beitrag nicht näher berücksichtigt werden.

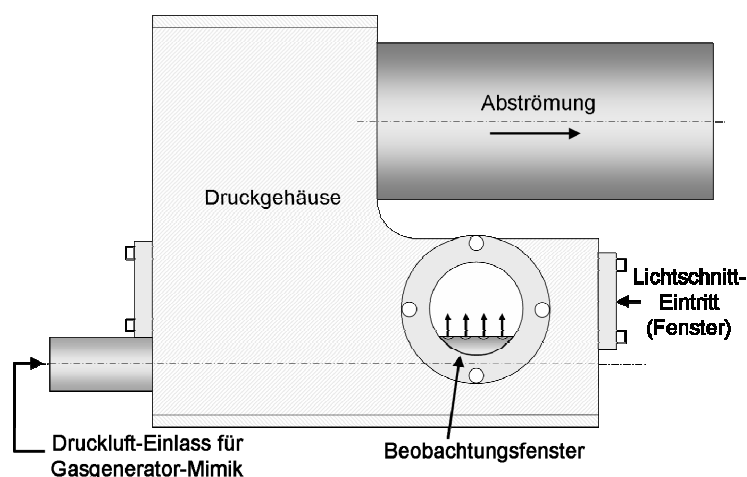


Abb. 1: Druckgehäuse für die Gasgenerator-Mimik mit Fenstern zur Anwendung optischer Messtechnik

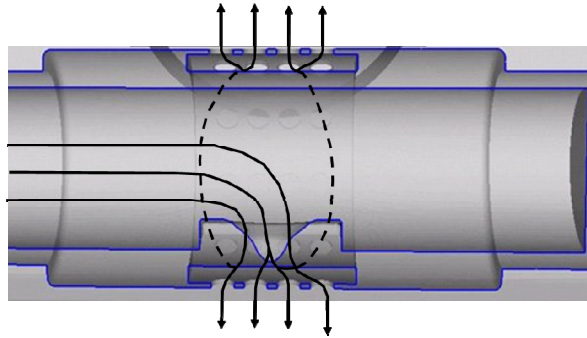


Abb. 2: Detailansicht der Gasgenerator-Mimik mit angedeutetem Ringspalt und Lochkonfiguration. Die schwarzen Pfeile illustrieren den Weg der Versuchsluft durch den Gasgenerator vom Einlass (Links) bis zu den Lochmustern am äußeren Umfang (hier exemplarisch oben und unten angedeutet)

3 Das PIV System

Abb. 3 zeigt den realisierten PIV Aufbau für die Untersuchung der Freistrahelströmung in einer zentralen, symmetrisch zum Lochmuster liegenden Lichtschnitt-Ebene. Der Strahl des Doppelpuls-Lasers wurde über einen Gelenk-Spiegelarm (2) störungsfrei in die Lichtschnitt-optik (3) eingekoppelt, aufgeweitet, kollimiert und als vertikales Lichtband mit einer Höhe von etwa 48 mm mittig und oberhalb des Prüflings durch das Fenstermodul (4) geleitet. Mit einer Blende wurde die Höhe der unteren Lichtschnittkante dem Außendurchmesser des Prüflings angepasst, um störende Reflexe zu vermeiden. Die Lichtschnittdicke betrug im Sehfeld 1,5 mm. Die Pulsenergie des verwendeten Nd:YAG Lasers betrug jeweils 120 mJ bei einer Doppelpuls-Folgefrequenz von 15 Hz, welche auch der Bildrate der PIV-Kamera (1) entspricht.

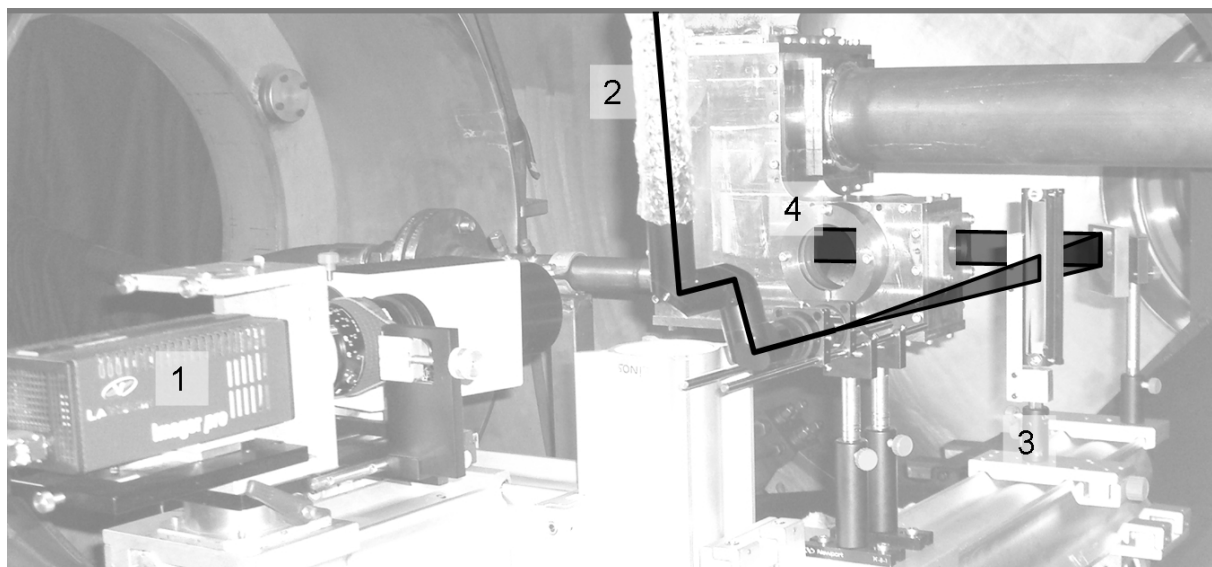


Abb. 3: Anordnung des PIV Systems am Druckgehäuse im Prüfstand H2K: 1. PIV Kamera, 2. Gelenk-Spiegelarm zur Führung des Laserstrahls, 3. Lichtschnittoptik mit Umlenkspiegel und 4. Druckgehäuse mit Gasgenerator-Mimik (Laser nicht sichtbar)

Bei voller Ausnutzung des Kamera-Sensors mit einer Auflösung von 1600 x 1200 Pixeln begrenzte der interne Speicher von 1 GB die Anzahl der Bilder pro PIV-Sequenz auf 172 Aufnahmen. Zur repräsentativen Bestimmung von rms-Werten des Geschwindigkeitsfeldes wurden daher mehrere PIV-Bildserien je Versuchskonfiguration durchgeführt. Die optische

38.4

Achse des Kameraobjektivs wurde normal zum Lichtschnitt ausgerichtet. Durch diese Anordnung und die Verwendung eines verzeichnungsfreien, langbrennweitigen Objektivs ($f = 105 \text{ mm}$) wurde gewährleistet, dass der Abbildungsmaßstab im gesamten Sehfeld nicht mehr als $\pm 1\%$ abwich. Die Genauigkeit des Laser-Pulsabstands Δt wurde mit $\pm 50 \text{ ns}$ angegeben, so dass die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung bei einem Δt von $1,5 \mu\text{s}$ insgesamt bei ca. 4% lag. Weitere Details über das PIV Verfahren sind in Raffel et al. (1998, 2007) zusammengestellt.

Die Zugabe der Seeding-Partikel erfolgte ca. 4 m stromauf vom Druckgehäuse des Gasgenerators durch zwei parallel geschaltete Fließbett-Partikelgeneratoren. Über ein pneumatisch geschaltetes 3-Wege-Ventil wurde das Partikel-Trägermedium (trockene, ölfreie Luft) für den Förderbetrieb in das Partikel-Fließbett geleitet bzw. für den Bypassbetrieb am Fließbett vorbei in die Messstrecke geführt. So wurde gewährleistet, dass der Massenstrom für alle Betriebszustände konstant blieb. Darüber hinaus konnten die Partikel zeitlich dosiert, d.h. nur für die Dauer einer PIV Messung in die Gasgenerator-Mimik eingeleitet werden, wodurch eine Verschmutzung der Messstrecke durch Seedingablagerungen deutlich reduziert wurde. Die Seedingmenge wurde durch die Verwendung verschieden großer Blenden am Generatöraustritt eingestellt. Diese Blende diente auch als Schallstelle zur Agglomeratzerkleinerung des Seedings. Um die Blende kritisch betrieben zu können, muss der Eingangsdruck am Partikel-Generator doppelt so hoch eingestellt werden wie der Druck in der Messstrecke, die mit Partikeln angereichert werden soll. Daher wurde der Vordruck am Generator auf 40 bar eingestellt. Als Seeding wurden zunächst Aluminiumoxid-Partikel (Al_2O_3 Martinswerk, Martoxid) mit einer Größe von ca. $0,2 - 3 \mu\text{m}$ und einer Dichte von $3,96 \text{ g/cm}^3$ verwendet. Im weiteren Verlauf der Messungen wurden, aus später genannten Gründen, poröse Siliziumdioxid-Partikel (SiO_2) mit einer Größe von ca. $0,5 - 1,5 \mu\text{m}$ und einer Schüttdichte von ca. $0,3 \text{ g/cm}^3$ eingesetzt.

Ergebnisdiskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der PIV-Messungen am Airbag-Gasgenerator für die 40-Loch-Konfiguration bei 20 bar Innendruck, stationären Ausströmbedingungen und 350 K Ruhetemperatur im Gasgenerator diskutiert und mit den Simulationsergebnissen der AUDI AG gegenübergestellt.

Die Parameter der PIV-Messung und Bildauswertung, wie Pulsabstand, Größe der Abfragefenster, Abstand der Datenpunkte, Vergrößerung und Anzahl der Mittelungen wurden in Vorversuchen und über Parameterstudien optimiert. Die endgültigen Einstellungen und Auswerte-Parameter der PIV-Messung sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Parameterübersicht der PIV-Messung und -Auswertung

	AL₂O₃-Partikel	SiO₂-Partikel
Laser Pulsabstand Δt	$2 \mu\text{s}$	$1,5 \mu\text{s}$
Anzahl Bilder pro Messung	344	344
Abbildungsmaßstab	21,3 Pixel/mm	
Bildfilterung	Hochpass filterung ($\sigma = 5 \text{ pixel}$) Dynamische Intensitätskappung Tiefpassfilterung (3x3 Gauss)	
“Ensemble”	48x48 Pixel (= $2,2 \times 2,2 \text{ mm}^2$)	48x48 Pixel (= $2,2 \times 2,2 \text{ mm}^2$)
Kreuzkorrelation	50% Überlappung	75% Überlappung
Punktabstand (Gitter)	$1,1 \text{ mm}$	$0,75 \text{ mm}$

Während der Messung mit den Al_2O_3 -Partikeln stellte sich heraus, dass im Bereich der überexpandierenden Freistahlströmung oberhalb der Austrittslöcher, bedingt durch die hohen Dichtefluktuationen, nur eine geringe Anzahl detektierbarer Partikel auftraten. In diesem Fall wirkte die Gasgenerator-Mimik durch die Loch-Konfiguration mit diversen scharfen Umlenkungen wie ein komplexes Schallstellen-System, sodass nur kleinste Primärteilchen des Seeding den beobachteten Strömungsbereich erreichen konnten. Dies führte in der Datenauswertung zu sehr geringen SNR- ("Signal-to-Noise" Ratio) Kennzahlen im Bereich der Freistrahlen und somit zu einer deutlichen Unterschätzung der tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeiten in den Überschall-Freistrahlen (siehe Abb. 4, rechte Seite). Die vier in der Lichtschnitt-Ebene liegenden Freistrahlen konnten nicht aufgelöst werden, sämtliche Strukturen wurden sozusagen "verschmiert".

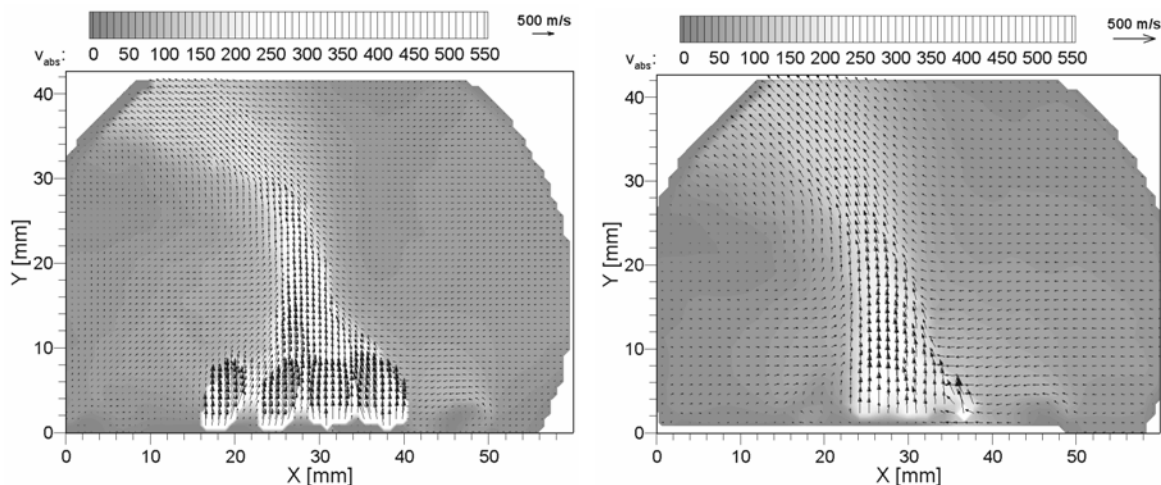


Abb. 4: Ensemble-gemittelttes Geschwindigkeitsfeld der vier Überschall-Freistrahlen; links: verwendetes Seeding SiO_2 , Geschwindigkeiten werden gut erfasst und Freistahlstrukturen sind eindeutig identifizierbar; rechts: verwendetes Seeding Al_2O_3 , Geschwindigkeiten werden deutlich unterschätzt und sämtliche Strukturen erscheinen "verschmiert"

Im zweiten Versuchsabschnitt wurden daher neuartige Partikel aus porösem Siliziumdioxid (SiO_2) mit einer relativ geringen spezifischen (Schütt)Dichte¹ von $0,18 - 0,25 \text{ g/cm}^3$ und einer Größenverteilung zwischen $0,5 - 1,5 \mu\text{m}$ eingesetzt. Mit ihrer runden Form haben sie besonders gute Streueigenschaften und zeigen durch ihre niedrige spezifische Dichte zusätzlich ein besseres Folgeverhalten als herkömmliches Al_2O_3 . Trotz der beträchtlichen Dichtefluktuationen im Bereich der Freistrahlen konnte das Strömungsfeld mit diesem Seeding verlässlich und reproduzierbar erfasst werden (vgl. Abb. 4, linke Seite). Durch die erhöhte Anzahl detektierbarer Teilchen im beobachteten Strömungsbereich konnte sogar die räumliche Auflösung (Abstand der Datenpunkte im Geschwindigkeitsfeld) verbessert werden. Die vier direkt im Lichtschnitt liegenden Freistrahlen sind nun ebenso deutlich erkennbar wie der überexpandierende Strömungsbereich unmittelbar stromab der Löcher. Die Ausprägung der interagierenden Überschall-Freistrahlen erscheint weitgehend symmetrisch. Im weiteren Verlauf der Strömung entwickelt sich ein gemeinsamer Kernstrahl, der die charakteristische Einschnürung eines Freistrahls zeigt. Das Abknicken der Strömung nach oben links ist spezifisch für diesen Versuchsaufbau, da die Strömung zum Auslass des Druckgehäuses umgelenkt werden musste.

¹ Die mittlere spezifische Dichte der Einzelpartikel konnte bisher nicht quantifiziert werden, liegt aber deutlich unter der spezifischen Dichte von massiven Partikeln aus SiO_2 (ca. 2.3 g/cm^3)

38.6

Auf der Basis der PIV-Ergebnisse mit SiO_2 -Partikeln wurden im Anschluss weitere Strömungsgrößen bestimmt. Abb. 5 (links) zeigt die rms- ("Root-Mean-Square") Werte der Absolutgeschwindigkeit, die im weiteren Sinne ein Maß für den Turbulenzgrad der untersuchten Strömung darstellen. Wie erwartet zeigt sich im Bereich der interagierenden Überschall-Freistrahlen der hoch-turbulente Charakter dieses Strömungsfeldes. Um einen Eindruck über die Lage der Verdichtungsstöße im System der Freistrahlen zu gewinnen, wurde die partielle Ableitung dv/dy der dominanten y-Komponente (in Richtung der Freistrahlen) des Geschwindigkeitsfeldes berechnet. In der resultierenden Darstellung des Gradientenverlaufs (Abb. 5, rechte Seite) konnte auf diese Weise die maximale Geschwindigkeitsänderung und somit das Stoßsystem visualisiert werden. Dass im Gradientenverlauf dennoch keine prägnanten Stoßlinien (Mach-Disks) vorhanden sind, ist damit zu erklären, dass die relative Ortsauflösung hierfür unzureichend war und sich zusätzlich im beobachteten Strömungsabschnitt nicht nur die vier in der Lichtschnittebene liegenden Freistrahlen, sondern zusätzlich auch die über den Umfang verteilten Freistrahlen überlagerten. Da die Strömungsphänomene in der Lichtschnittebene nicht mehr zu unterscheiden waren, erscheint das Stoßsystem für diesen Fall räumlich leicht verwischt. Darüber hinaus wurde hier nur die dominante y-Komponente betrachtet, die Änderungen in x-Richtung bzw. der Absolutbetrag der Gradienten sind zur Vereinfachung nicht berücksichtigt worden.

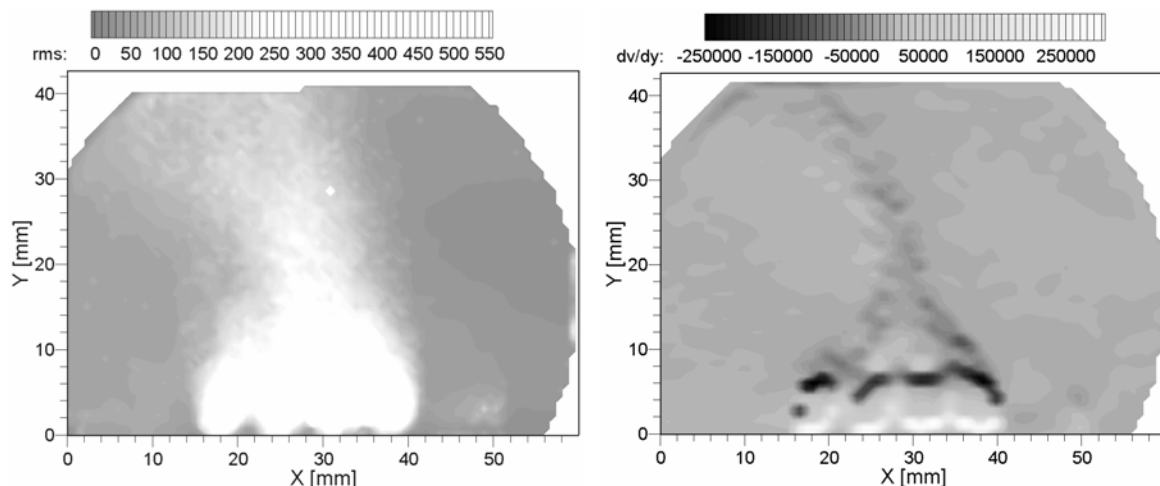


Abb. 5: links: rms-Werte der Absolutgeschwindigkeit im Strömungsfeld; rechts: Darstellung der Gradienten in der dominanten y-Komponente des Strömungsfeldes über die partielle Ableitung dv/dy ; Lage der Stöße (Mach-Disks) ist trotz Überlagerungseffekten erkennbar

Abschließend sollten die gemessenen Geschwindigkeitsfelder der Gasgenerator-Mimik mit dem simulierten Strömungsfeld der hier vorgestellten 40-Loch-Konfiguration verglichen werden. Die numerischen Simulationen wurden mit dem kommerziellen Code STAR-CD, Version 4.02, durchgeführt. Die kompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen wurden zusammen mit Massen- und Energieerhaltungsgleichung sowie einem Standard $k-\epsilon$ -Turbulenzmodell in einer Finite-Volumen-Formulierung gelöst. Zur Diskretisierung wurde ein 2. Ordnung-TVD Verfahren (MARS) angewandt. Die zeitlich implizite Diskretisierung ist 1. Ordnung genau. Das Rechengitter umfasste ca. 2,3 Millionen Rechenzellen. Im Bereich der Austrittsöffnungen betrug die Zellkantenlänge ca. 0,2 mm, weiter stromab vergrößerte sich dieses Maß auf 2,5 mm. Zeitaufgelöste Simulationen wurden mit einer Zeitschrittweite von 10 μs durchgeführt. Der Gesamtaufwand einer Simulation über 2,5 ms betrug unter Verwendung von vier Prozessoren auf einem Linux-Rechenserver ca. 20 Stunden.

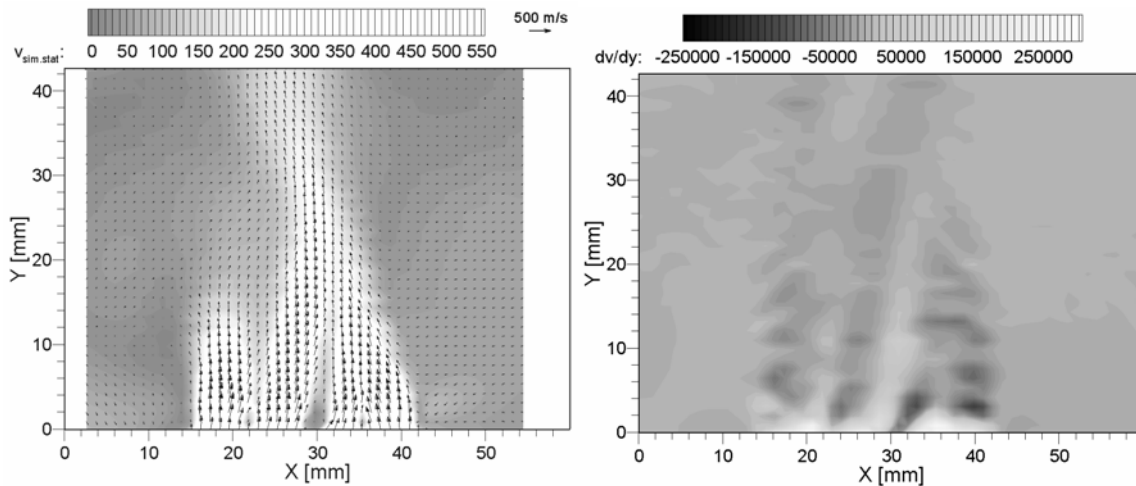


Abb. 6: Ergebnisse der Strömungssimulation; links: Strömungsfeld der stationären Rechnung zeigt gute Übereinstimmung zur Messung; rechts: Darstellung der Gradienten in der dominanten y-Komponente des Strömungsfeldes über die partielle Ableitung dv/dy aus instationärer Rechnung; Lage der Stöße (Mach-Disks) im Vergleich zur Messung eher undeutlich

Wie in Abb. 6 ersichtlich wird, sind die Simulationsergebnisse qualitativ mit der PIV-Messung vergleichbar. Die Größenordnung der Absolutgeschwindigkeit des stationären Strömungsfeldes ist ähnlich (vgl. linke Seite in Abb. 6 und linke Seite in Abb. 4), jedoch zeigte sich eine unterschiedliche Ausprägung der einzelnen Freistrahlen. Diese erschienen in der Simulation eher separiert und unterschiedlich stark ausgeprägt. Die deutliche Symmetrie der PIV-Messergebnisse konnte in der Simulation nicht klar wiedergegeben werden. In den Simulationsergebnissen zeigte sich eine Interaktion der Freistrahlen auch in der Umfangsrichtung: Die Freistrahlen "pendelten" aus der dargestellten Mittelebene heraus und befanden sich nicht immer zeitgleich mit dem Kernstrahl in der dargestellten xy-Ebene. Größere Unterschiede sind im Gradientenverlauf, (rechte Seite in Abb. 6), zu erkennen. Dieser ist in der Simulation noch deutlicher verschmiert als es die Messungen zeigten, was z.T. in der unzureichenden räumlichen Auflösung begründet ist. Aber auch das Verhältnis aus Lochdurchmesser zu Wandstärke der untersuchten Konfiguration sowie Rundungsradien stellten sich in der Simulation als sensible Parameter für die Orientierung der Freistrahlen heraus.

Zusammenfassend kann die sehr erfreuliche Vergleichbarkeit des gemessenen Strömungsfeldes mit den Simulationsergebnissen und darauf aufbauend die Nutzung von Tendenzangaben aus Parameterstudien in Simulationen von Airbag-Gasgeneratoren bestätigt werden.

Danksagung

Die Autoren danken der AUDI AG für die gute Zusammenarbeit sowie die Erlaubnis zur Veröffentlichung dieser Daten. Weiterer Dank gilt dem Team des Prüfstandes H2K des DLR in Köln für die ebenfalls gute Zusammenarbeit während der Versuche.

Literatur

- Melling, A., 1997 "Tracer particles and seeding for particle image velocimetry" Meas Sci Technol 8, pp. 1406-1416
- Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J., 1998: "Particle Image Velocimetry, a practical guide", Springer-Verlag Berlin

38.8

Raffel, M., Willert, C., Wereley, S., Kompenhans, J., 2007: "Particle Image Velocimetry, a practical guide" (Second Edition), Springer-Verlag Berlin

Scarano, F., van Oudheusen, B.W., 2003: "Planar velocity measurements of a two-dimensional compressible wake", Exp. Fluids 34, pp. 430-441

Voges, M., Beversdorff, M., Willert, C., Krain, H., 2007: "Application of Particle Image Velocimetry to a Transonic Centrifugal Compressor" Exp. Fluids DOI 10.2007/s00348-007-0279-1

Voges, M., Klinner, J., Willert, C., Beversdorff, M., Schodl R., 2007: "Assessment of powder-based seeding materials for PIV applications in transonic, supersonic and reacting flows", 7th Int. Symposium on Particle Image Velocimetry, Rome, Italy, 11-14 September 2007