

# PIV-Messungen im hohen Überschall am ISL-Stoßrohr-Windkanal

M. Havermann, J. Haertig, C. Rey, A. George  
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)  
5 Rue du Général Cassagnou, 68301 Saint-Louis, Frankreich

## 1 Einleitung

Die Particle Image Velocimetry (PIV) ist seit über zehn Jahren eine etablierte Strömungsmesstechnik und ist insbesondere für die ebene Vermessung von inkompressiblen und Unterschallströmungen weit verbreitet. Das PIV-Verfahren ist auch für den Einsatz an Überschall-Windkanälen geeignet, sofern eine gute Partikelimpfung der Strömung durchgeführt werden kann. Erstmals wurden PIV-Messungen an einem Stoßrohr-Windkanal mit Strömungsgeschwindigkeiten im hohen Überschall am ISL durchgeführt [1], [2]. Dabei wurde für Machzahlen von 3,5 und 4,5 die Düsenströmung und die Strömung um Keile und Kugeln vermessen. Die Anwendung des PIV-Verfahrens am Stoßrohr-Windkanal stellt sehr hohe Anforderungen an das Messsystem, da es sich hier um eine extrem kurzzeitig blasende Anlage mit sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten handelt. Innerhalb der Messzeit von typischerweise einigen Millisekunden ist mit einem Doppelpuls-PIV-System nur eine einzige Messung durchführbar. Weiterhin ist keine Echtzeit-Justierung der Optik und der Partikelverteilung in der Strömung möglich. In diesem Beitrag werden PIV-Messungen an Strömungen mit einer Machzahl von 6 vorgestellt: Neben der Strömung am Austritt einer Lavaldüse wurden Strömungsfelder um spitze und stumpfe Körper mit anliegenden und abgelösten Stoßwellen vermessen. In diesem Zusammenhang wird auch auf das Folgeverhalten der verwendeten Streupartikel eingegangen.

## 2 Versuchsanlage

### 2.1 Stoßrohr-Windkanal

Ein Stoßrohr-Windkanal ist ein kurzzeitig blasender Windkanal für hohe Überschall-Strömungsgeschwindigkeiten. Er wird eingesetzt, um Flugbedingungen im hohen Überschall in der unteren Atmosphäre richtig zu duplizieren, was die Geschwindigkeit, die Drücke und Temperaturen der Anströmung betrifft. Solche realistischen Anströmbedingungen sind mit einem konventionellen Windkanal praktisch nicht zu erzielen. Konstruktiv gesehen besteht diese Art von Windkanal aus einem Stoßrohr, einer Überschalldüse und einer Messkammer mit Vakuumbüchse (Abb. 1). Das Stoßrohr der ISL-Anlage hat einen inneren Durchmesser von 100 mm und eine Länge von ca. 21 m. Das Rohr ist vor dem Versuch durch eine Stahlmembran in einen 2,7-m-langen Hochdruckteil und in

einen 18,4-m-langen Niederdruckteil getrennt. Der Hochdruckteil enthält eine Mischung aus Wasserstoff und Stickstoff mit einem Druck von einigen hundert bar als Treibgas, während der Niederdruckteil das Testgas Stickstoff mit einem Druck von einigen bar enthält. Die Stahlmembran ist mit Sollbruchstellen versehen und wird durch Aufpumpen des Hochdruckteils zum Platzen gebracht. Durch die plötzliche Druckfreisetzung bildet sich eine Stoßwelle aus, die sich mit Überschallgeschwindigkeit in das ruhende Laufgas ausbreitet. Am Eintritt der Lavalldüse wird die Stoßwelle reflektiert, wodurch kurzzeitig ein Gasvolumen mit einer hohen Temperatur und hohem Druck entsteht. Dieses Gas wird anschließend in der Lavalldüse auf eine Überschallgeschwindigkeit beschleunigt. Für die hier verwendeten Atmosphärenbedingungen (Höhen zwischen 15 und 20 km) entspricht eine Machzahl von 6 einer Geschwindigkeit von ca. 1,8 km/s. Hinter der Düse befindet sich die Messkammer, in der die Modelle montiert werden. Die Messkammer hat Fenster an drei Seiten, um optische Messmethoden einsetzen zu können. Der Vakuummessel hinter der Messkammer hat ein Volumen von 10 m<sup>3</sup> und dient der Aufnahme der entspannten Gase während und nach dem Versuch.

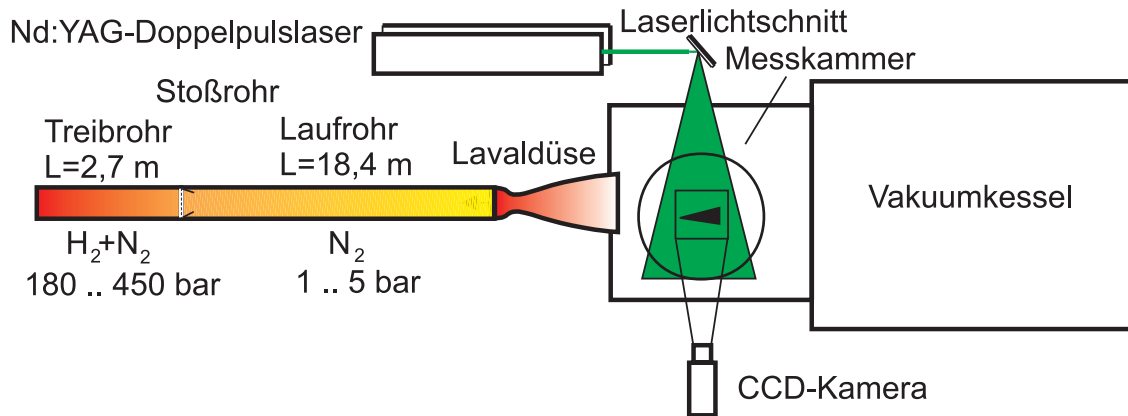


Abb. 1: ISL-Stoßrohr-Windkanal mit PIV-System.

## 2.2 PIV-System

Das PIV-System verwendet einen frequenzverdoppelten Quantel Nd:YAG Doppelpuls-Laser mit einer nominalen Pulsenergie von 150 mJ. Über der Messkammer (Abb. 1) wird mit einer Teleskopoptik ein ca. 300 mm breiter und ca. 0,2 mm dünner Laserlichtschnitt in der Strömungsebene erzeugt. Zur Bildaufnahme dient eine CCD-Kamera von der Firma IDT (sharpVISION 1300 DE) mit einer Auflösung von 1280 x 1024 Pixel und einem minimalen Pulsabstand von 200 ns zwischen den zwei PIV-Bildern auf dem CCD-Chip, wobei mit einem Nikon-Zoomobjektiv der Messfeldausschnitt abgebildet wird. Die Auslösung des Lasers erfolgt nach dem Platzen der Membran durch die Detektion der Stoßwelle im Laufrohr mit einer Wärmestromsonde. Als Streupartikel wird getrocknetes Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pulver mit einem nominellen Teilchendurchmesser von 0,3 μm verwendet. Die Partikel werden durch einen Wirbelschichtgenerator mit Zyklonabscheider vor dem Versuch zusammen mit dem Laufgas in das Stoßrohr gefüllt. Nach dem Versuch werden die aufgenommenen PIV-Bilder mit der IDT-Software ausgewertet, wobei ein adaptiver Kreuzkorrelationsalgorithmus [3] mit Abfragefenstergrößen von hier minimal 24 x 24 Pixel verwendet wird.

## 3 Versuchsergebnisse

### 3.1 Mach-6-Düsenströmung

Zunächst wurde das Strömungsfeld am Düsenaustritt einer Mach-6-Düse (Durchmesser: 220 mm) mit dem PIV-Verfahren vermessen (Abb. 2). Ein Messfenster von 180 mm x 140 mm wurde mit einer Zoom-Brennweite von 80 mm auf den CCD-Chip abgebildet, was einen optischen Kalibrationsfaktor von  $140 \mu\text{m}/\text{Pixel}$  ergab. Der Laserpulsabstand wurde auf 400 ns eingestellt, so dass sich für eine zu erwartende Maximalgeschwindigkeit von 1,8 km/s eine Partikelverschiebung von ca. 5 Pixel ergibt. Damit ist eine minimale horizontale Abfragefenstergröße von 24 Pixel möglich. In Abb. 3 ist eines der beiden PIV-Bilder dargestellt. Die Streupartikel sind gut zu erkennen und die Verteilung in der Kernströmung der Düse ist homogen. Oben am inneren Düsenrand treten offenbar Turbulenzen durch Grenzschichteffekte auf.

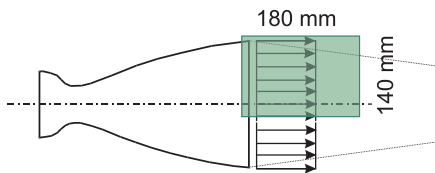


Abb. 2: Lavaldüse mit PIV-Messfenster.

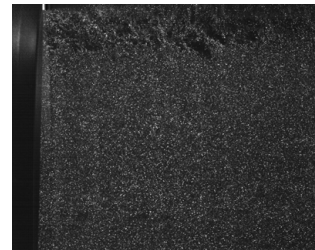


Abb. 3: PIV-Bild der Düsenströmung.

Die PIV-Bilder wurden mit Abfragefenstern von  $64 \times 64$  Pixel und 50 % Überlappung ausgewertet, was einer räumlichen Auflösung von  $4,5 \text{ mm} \times 4,5 \text{ mm}$  entspricht. Die Auswertungsergebnisse für die horizontale und vertikale Geschwindigkeitskomponente sind in Abb. 4 dargestellt. Die Messung liefert eine homogene Kernströmung mit einer horizontalen Geschwindigkeitskomponente von  $1755 \pm 16 \text{ m/s}$  und einer vertikalen Geschwindigkeitskomponente von  $-3 \pm 10 \text{ m/s}$ . Am oberen rechten Rand ist ein Anstieg der vertikalen Komponente zu erkennen, was mit einem Expansionsfächer am Düsenrand zusammenhängt (unterexpandierte Düse). Eine eindimensionale Düsenrechnung ohne Berücksichtigung der Düsen Grenzschicht ergab eine Ausströmgeschwindigkeit von 1789 m/s. Damit weicht die Messung weniger als 2 % von der idealisierten Rechnung ab.

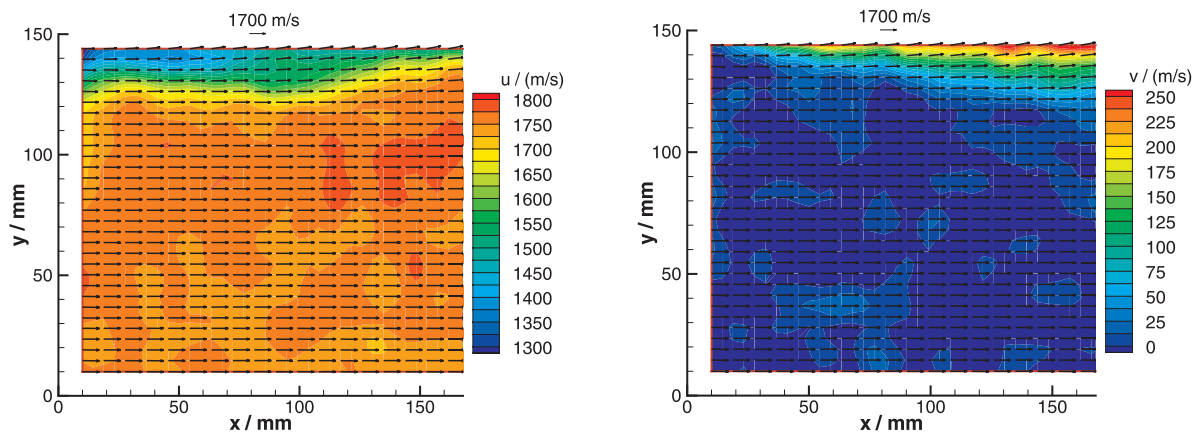


Abb. 4: Horizontale und vertikale Geschwindigkeitskomponente der Mach-6-Düsenströmung.

### 3.2 Mach-6-Keilströmung

Die Umströmung eines Keils führt bei entsprechend kleinem Keilwinkel zur Ausbildung einer an der Keilspitze anliegenden schrägen Stoßwelle. Diese stellt einen starken Gradienten der Zustandsgrößen und der Strömungsgeschwindigkeit dar. Da die räumliche Ausdehnung der Stoßwelle im Bereich weniger freier Weglängen liegt, ist sie auch ein idealer Testfall für das Partikelfolgeverhalten.

Für diesen Versuch wurde ein Keil mit einem Keilwinkel von  $40^\circ$  in die Messkammer eingebaut. Das Messfenster wurde mit einer Zoom-Brennweite von 150 mm auf eine Ausdehnung von 111 mm x 89 mm reduziert, so dass der sich daraus ergebende optische Kalibrationsfaktor von  $87 \mu\text{m}/\text{Pixel}$  eine maximale Partikelverschiebung von ca. 8 Pixel für eine Geschwindigkeit von 1,8 km/s liefert. Das aufgenommene PIV-Bild (Abb. 5) zeigt wiederum eine homogene Partikelverteilung in der Anströmung, wobei die an der Keilspitze anliegende Stoßwelle an Hand der höheren Partikeldichte zu erkennen ist. In Abb. 6 ist die Auswertung der horizontalen Geschwindigkeitskomponente für eine Abfragefenstergröße von  $24 \times 24$  Pixel (künstliche Pixelverschiebung von -6 Pixel, räumliche Auflösung von 1 mm x 1 mm) dargestellt. Der Bereich um den Verdichtungsstoß zeigt eine kleine Relaxationszone für die Partikelgeschwindigkeit. Innerhalb des Verdichtungsstoßes wurde für die horizontale Geschwindigkeitskomponente ein Wert von  $1456 \pm 28$  m/s, für die vertikale von  $520 \pm 16$  m/s gemessen. Die berechneten theoretischen Werte betragen 1500 m/s bzw. 546 m/s und bestätigen damit erneut die gute Genauigkeit des Messverfahrens.

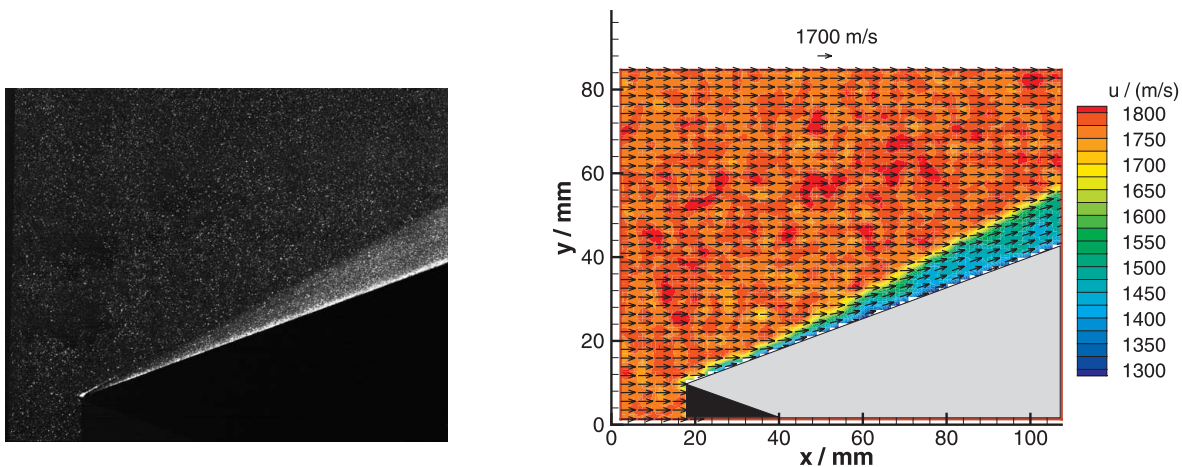


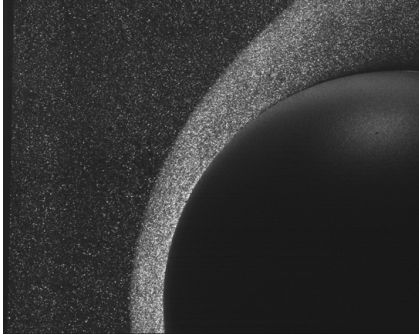
Abb. 5: PIV-Bild der Keilströmung.      Abb. 6: Horizontale Geschwindigkeitskomponente.

### 3.3 Mach-6-Kugelanströmung

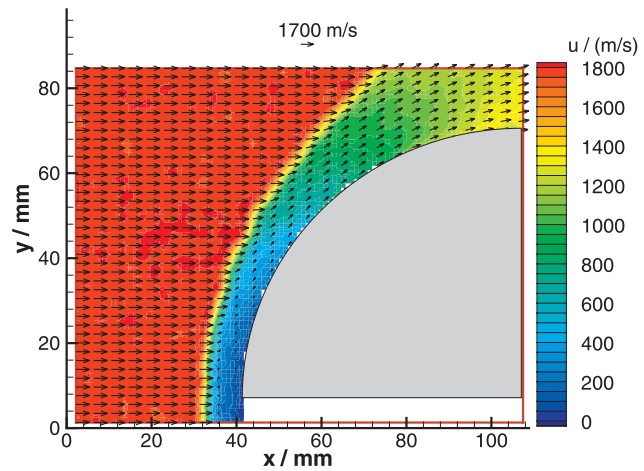
Vor einem stumpfen Körper bildet sich in einer Überschallströmung eine bogenförmige, abgelöste Stoßwelle aus. Eine wichtige Referenzgeometrie für stumpfe Körper ist die Kugel, die auch häufig für die Validierung von Rechenprogrammen verwendet wird. Zwischen dem Stoß und der Kugel gibt es eine dreidimensionale Umströmung mit Zonen im Unter-, Trans- und Überschall.

Für diesen Versuch wurde eine Kugel mit 120 mm Durchmesser in die Messkammer eingebaut. Die optischen Einstellungen entsprechen dem Versuch mit dem Keil. Im PIV-Bild (Abb. 7) ist die abgelöste Stoßwelle wiederum deutlich zu erkennen und das Ergebnis der Auswertung ist für die horizontale Geschwindigkeitskomponente in Abb. 8 dargestellt.

Zwischen Stoßwelle und Kugel lassen sich deutlich die verschiedenen Strömungsbereiche unterscheiden: Im Bereich des Staupunkts ist die Strömung im Unterschall, wohingegen ab einer  $y$ -Höhe von ca. 40 mm eine Beschleunigung auf Überschall erfolgt.



**Abb. 7:** PIV-Bild der Kugelanströmung.



**Abb. 8:** Horizontale Geschwindigkeitskomponente.

### 3.4 Partikelfolgeverhalten

Ein gutes Partikelfolgeverhalten ist für alle auf Lichtstreuung basierenden Strömungsmessverfahren von großer Bedeutung. Ein hoher Streuquerschnitt steht meistens im Widerspruch zu einem guten Folgeverhalten, was insbesondere in Überschallströmungen wegen der hohen Gradienten von Geschwindigkeit und Dichte zu Schwierigkeiten führt. Eine theoretisch-experimentelle Untersuchung an einem abrupten Geschwindigkeitsabfall von  $u_1$  auf  $u_2$ , wie er bei einer Stoßwelle auftritt, kann Aufschluss über das Folgeverhalten geben. Die Partikelbewegung lässt sich mit Hilfe der vereinfachten Bewegungsgleichung und dem Stokes-Widerstandsgesetz für eine Kugel ( $c_w = 24/Re$ ) relativ gut abschätzen. Definiert man die Partikelrelaxationszeit zu  $\tau = \rho_p d_p^2 / 18\mu$ , so fällt die relative Partikelgeschwindigkeit  $(u_p - u_2)/(u_1 - u_2)$  nach  $2\tau$  auf einen Betrag von  $1/e^2$  ab, was hier als Vergleichsmaßstab für die mit der PIV gemessenen Relaxationslängen gewählt wurde.

Die Auswertung der Staupunktstromlinie der Kugelanströmung ist in Abb. 9 zusammen mit der aus dem PIV-Bild entnommenen Stoßlage dargestellt. Die gemessene Stoßverbreiterung beträgt insgesamt ca.  $0,3x/D$ , was einer Distanz von 3,6 mm entspricht ( $D=120$  mm). Die stromauf von der ausgemessenen Stoßlage auftretende Stoßverbreiterung steht allerdings nicht mit den physikalischen Gesetzmäßigkeiten von Überschallströmungen in Einklang. Vermutlich entsteht diese durch Anwendung des PIV-Algorithmus an der gekrümmten Stoßwelle. Nimmt man nur die Stoßverbreiterung stromab vom Stoß als Maßstab für die Relaxationslänge, so ergibt sich ein Wert von  $0,15x/D$ , was einer Distanz von 1,8 mm entspricht. Aus der oben angegebenen Theorie ergibt sich mit den Streupartikeldaten für  $Al_2O_3$  eine Relaxationslänge von 2 mm.

Um den Einfluss des PIV-Algorithmus zu verringern, wurde ein weiterer Versuch mit dem Keil gemacht. Dabei wurde die CCD-Kamera so gedreht, dass der Stoß horizontal zur CCD-Ebene aufgenommen wurde. Mit dem Stoßwinkel von  $8,1^\circ$  und dem halben Keilwinkel von  $20^\circ$  ergab sich somit ein Drehwinkel von  $28,1^\circ$ . Damit lässt sich die normal zum Stoß liegende Geschwindigkeitskomponente ohne Krümmungseffekte vermessen. Das

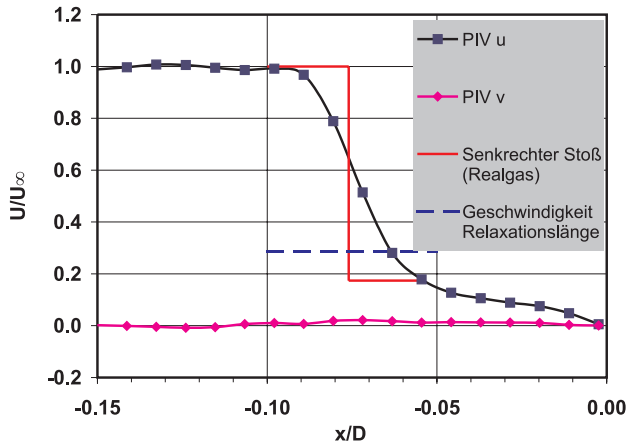


Abb. 9: Staupunktstromlinie der Mach-6-Kugelanströmung.

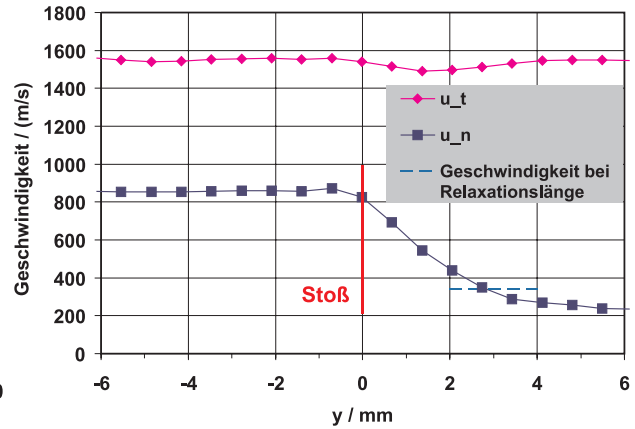


Abb. 10: Geschwindigkeiten über den Stoß am Keil mit gedrehter Kamera.

Messergebnis ist in Abb. 10 dargestellt und zeigt eine Relaxationslänge von 2,7 mm, was einem aerodynamischen Durchmesser der Streupartikel von  $0,41 \mu\text{m}$  entspricht.

## 4 Zusammenfassung

Die Particle Image Velocimetry wurde zur Vermessung von Strömungsfeldern im hohen Überschall am Stoßrohr-Windkanal des ISL eingesetzt. Für eine Machzahl von 6 betragen die Strömungsgeschwindigkeiten  $1,8 \text{ km/s}$ . Neben einer Düsenströmung wurde die Umströmung von einem Keil und einer Kugel untersucht, wobei eine gute Übereinstimmung zwischen Messungen und Rechnungen erzielt wurde. Die bei den Modellen auftretenden Stoßwellen wurden korrekt wiedergegeben, weiterhin lieferten sie eine gute Testströmung zur Untersuchung des Partikelfolgeverhaltens. Dieses wurde mit einem einfachen theoretischen Modell abgeschätzt und mit den Messungen an den Verdichtungsstößen vor der Kugel und am Keil verglichen. Die so ermittelten Relaxationslängen der Streupartikel bewegen sich im Bereich von wenigen Millimetern, was verglichen mit den Modellgrößen akzeptabel ist. Das PIV-Verfahren ist damit für die Messung kurzzeitiger Hochgeschwindigkeitsströmungen gut geeignet und wird in Zukunft auch für die Untersuchung von komplexeren Strömungsfeldern eingesetzt.

## Literatur

- [1] Havermann, M., Haertig, J., Rey, C., and George, A. (2001). "Particle Image Velocimetry (PIV) Applied to High-Speed Shock Tunnel Flows", 23rd International Symposium on Shock Waves, Fort Worth/TX, USA, July 2001.
- [2] Haertig, J., Havermann, M., Rey, C., and George, A. (2002). "Particle Image Velocimetry in Mach 3.5 and 4.5 Shock Tunnel Flows", *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 6, pp. 1056-1060.
- [3] Lourenço, L.M., and Krothapalli, A. (2000). "TRUE Resolution PIV: A Mesh-free Second Order-Accurate Algorithm", 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July 2000.