

## STAND DER ENTWICKLUNG DES ISL DOPPLERBILDVERFAHRENS

**F. Seiler, A. George, R. Pfaff, J. Srulijes**

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

### Abstract

Die Entwicklung des Dopplerbildverfahrens DPV (Doppler Picture Velocimetry) zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit in einem Laserlichtschnitt begann im ISL im Jahre 1981. Inzwischen wurde mehrfach auf GALA-Tagungen über den Fortschritt der Arbeiten zum DPV-Verfahren berichtet, z. B. GALA 99, GALA 2002 und GALA 2004. Dabei geht es um die Analyse der Frequenzverschiebung des an Tracerpartikeln gestreuten Lichts mittels eines Michelsoninterferometers, das auf Interferenzstreifen justiert ist. Es ist nötig zwei Bilder, ein Nullbild (Referenzbild ohne Frequenzverschiebung) und ein die Frequenzverschiebung analysierendes DPV-Bildes (Dopplerbild), aufzunehmen. Problematisch ist hierbei die Abbildung beider Bilder auf zwei gesonderten CCD-Kameras bei simultaner Verarbeitung beider Bilder in einem Interferometer. Nach Bildaufnahme erfolgt die Auswertung der Interferenzstreifenverteilungen im Referenz- bzw. Dopplerbild. Diese werden in Phasenbilder gewandelt. Punktweise Subtraktion der Phasen aus dem Referenz- und Dopplerbild, nach Anpassung beider Bilder in Größe, Position und Drehung, ergibt die Änderung der Phase, ausgehend vom Referenz- zum Dopplerbild, also die Phasenverschiebung. Diese ist proportional zur Frequenzverschiebung und diese wiederum zur Tracergeschwindigkeit (Dopplereffekt).

Der aktuelle Stand der Entwicklung des DPV-Verfahrens wird anhand von Experimenten mit dem Stoßrohr-Windkanal STA des ISL erläutert. Ziel der derzeitigen Untersuchungen ist, Referenz- und Dopplerbild optisch so vollständig wie möglich zu trennen. Darüber hinaus wurde die Auswertesoftware überarbeitet und angepasst. Testversuche mit einem Keil in Überschallanströmung bieten ein wohlbekanntes Strömungsfeld. In weiteren Versuchen wurde auch das Geschwindigkeitsfeld um andere elementare Körper mittels DPV untersucht, z.B. Kugeln.

### 1. Einleitung

Das von Oertel, Seiler und George erfundene DPV-Verfahren, siehe Oertel et al. 1982, war im Jahre 1981 ein Novum und war weltweit das erste Verfahren, womit in einem Lichtschnitt durch eine Strömung die Geschwindigkeitsverteilung dargestellt werden konnte. Die Aufnahme, Bearbeitung und Auswertung der Dopplerbilder musste damals mit den zur Verfügung stehenden klassischen Methoden ausgeführt werden. Diese Nachteile sind inzwischen durch den rasanten Fortschritt in der Aufnahmetechnik wie auch in der Bildverarbeitung überwunden, siehe Seiler et al. 1998. Später entwickelte, bekannte Techniken sind „Particle Image Velocimetry (PIV)“, siehe Adrian 1986, und „Doppler Global

Velocimetry (DGV)“, siehe Meyers 1992, die heute standardmäßig in vielen Forschungseinrichtungen angewendet werden.

## 2. Keilströmung im Hyperschall

Der aktuelle Stand der Entwicklung von DPV wird anhand eines im Stoßrohrlabor des ISL durchgeführten Stoßrohr-Experiments erklärt. In Abb. 1 ist linkerhand das Stoßrohrlabor und rechts ein Blick auf die beiden darin untergebrachten Stoßrohre, STA und STB, zu sehen. Die Versuche erfolgten im Stoßrohr-Windkanal STA.

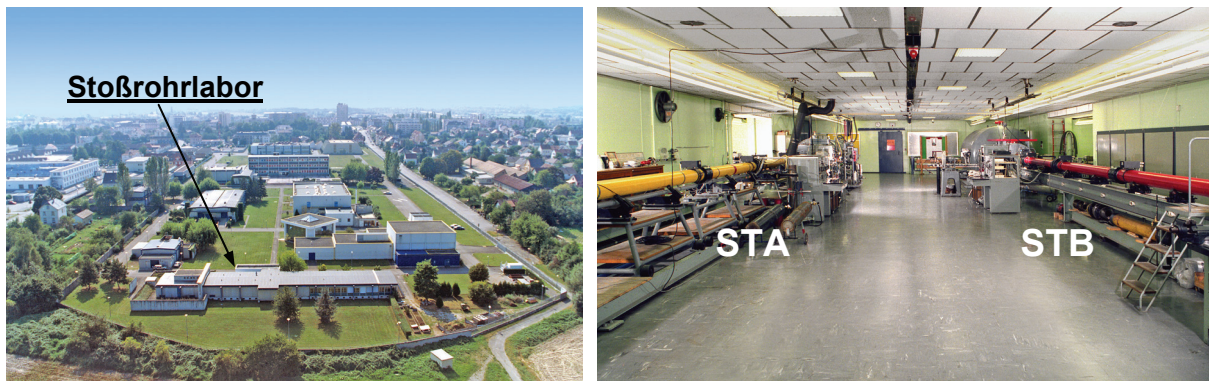


Abb. 1: Stoßrohrlabor des ISL

Die Experimente zur Aufnahme eines Dopplerbildes der Geschwindigkeitsverteilung über dem Keil erfolgten in Machzahl-6-Strömung. Abb. 2 zeigt schematisch den Aufbau des verwendeten Stoßrohr-Windkanals. Die Stoßrohrströmung beginnt nach Platzen der Membran zwischen Treibrohr und Laufrohr. Durch die Expansion des Treibgases ins Laufrohr hinein bildet sich im Laufgas ein Verdichtungsstoß aus, der sich mit Überschallgeschwindigkeit zum Ende des Laufs hin, in Abb. 2 nach rechts, fortpflanzt. In der Folge bewegt sich das zwischen expandierendem Treibgas und Stoßfront befindliche Laufgasvolumen ebenfalls Richtung Rohrende. Um in der angeflanschten Düse die Geschwindigkeit weiter zu steigern, wird das Stoßrohr so betrieben, dass diese sog. Laufgasströmung vor der Düse aufgestaut wird und hier ein praktisch ruhendes Reservoirgas bildet. In der Düse erfolgt die Expansion auf Überschallgeschwindigkeit. In Abb. 2 ist die in der Messkammer eingebaute Machzahl-6-Düse abgebildet. Der 60 mm vor der Düse befestigte Keil wird mit Machzahl  $M = 6$  bei einem statischen Druck  $p$  von 9,0 kPa und einer Temperatur  $T$  von 240 K über ca. 2 ms aus einer Parallelstrahldüse angeströmt.

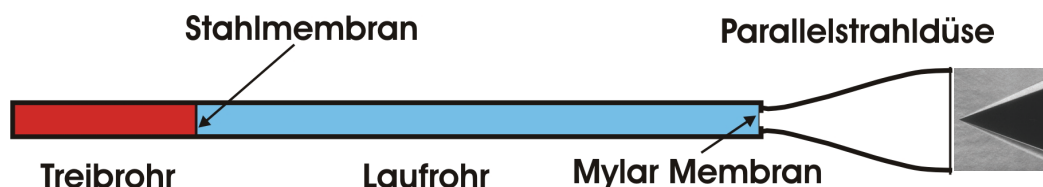


Abb. 2: Prinzipbild des Stoßrohraufbaus

Die Strömung wird durch einen ebenen Lichtschnitt beleuchtet und ist mit Streupartikeln ( $\text{TiO}_2$ ) geimpft. Über der Körperoberfläche wird die Strömung über einen Keilstoß umgelenkt und es entsteht eine vertikale Geschwindigkeitskomponente  $\vec{v}$ . Nach Beschleunigung in der Teilchenrelaxationszone bewegen sich die Tracerpartikel ebenso mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$ .

Das von den einzelnen Streuteilchen aus der Lichtschnittebene emittierte Streulicht wird mittels abbildender Optik betrachtet und durch ein Michelsoninterferometer auf seine Frequenzverschiebung hin analysiert. Die Geschwindigkeit der Streupartikel  $\vec{v}$  bewirkt eine Dopplerverschiebung der Streulichtfrequenz um  $d\nu$ . Dies ändert die Phasendifferenz im Michelsoninterferometer, was sich auf die Intensitätsverteilung am Ausgang auswirkt. Sichtbar ist diese Intensitätsänderung in Abb. 3 anhand einer Streifenverschiebung in der von der Kopfwelle beeinflussten Strömung über einer Keiloberfläche. Die Streifenverschiebung gegenüber der Lage der Referenzstreifen ist dann ein Maß für die über dem Keil vorliegende vertikale Strömungskomponente. Ebenfalls gut zu erkennen sind in diesem Fall die Verbindung zusammengehöriger Streifen in der Kopfwelle und die Relaxationszone. Das Prinzip des Aufbaus wird in Abb. 4 verdeutlicht.

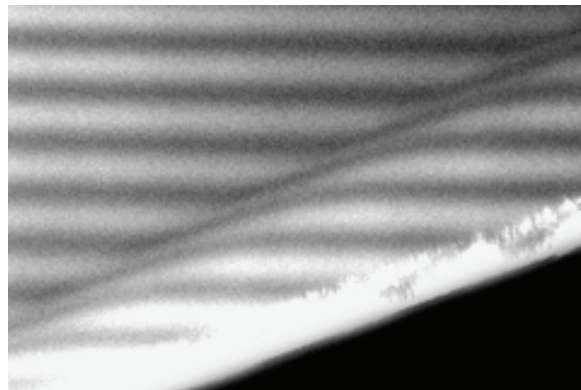


Abb. 3: Streifenverschiebung an einem Keil

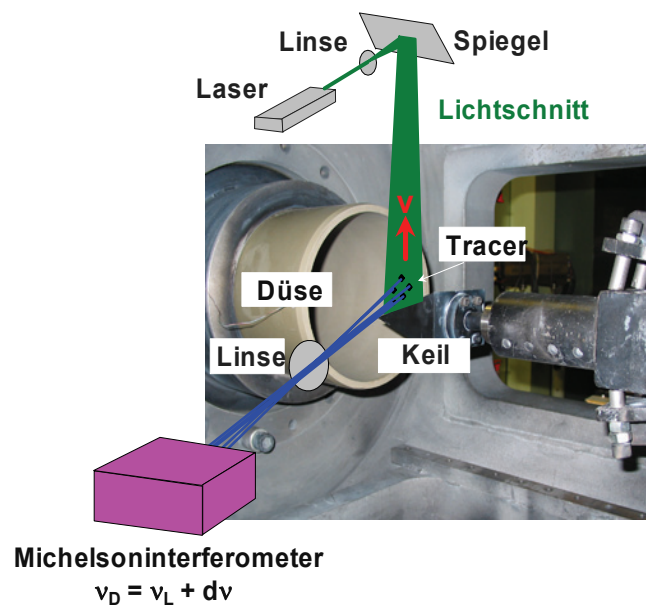


Abb. 4: Mach-6-Parallelstrahldüse mit Optik

### 3. Messung der Frequenzverschiebung

Abb. 5 zeigt links z.B. einen keilförmigen Körper, der mit der Geschwindigkeit  $\vec{u}$  angeströmt wird. Seine Form erzwingt eine Umlenkung der Strömung und verursacht eine Vertikalkomponente  $\vec{v}$ . In der Anströmung befinden sich  $\text{TiO}_2$ -Streupartikel. Ein einzelnes Partikel in der Strömung über dem Körper ist rechts in Abb. 5 zu erkennen. Die betrachtete Strömungsebene wird mit Laserlicht und abbildender Zylinderoptik von oben beleuchtet, wie in Abb. 5 links dargestellt. Im Vektordiagramm rechts ist die Richtung zwischen Lichtquelle und Streupartikel durch den Einheitsvektor  $\vec{e}_L$  charakterisiert. Der Einheitsvektor  $\vec{e}_D$  zeigt vom Partikel zum Beobachter, in diesem Fall das Michelsoninterferometer. Für die Dopplerverschiebung der Streulichtfrequenz ist die Projektion von  $\vec{v}$  auf den Differenzvektor  $\vec{e}_D - \vec{e}_L$  maßgeblich. Die Theorie der Einbündelvelozimetrie beschreibt die Abhängigkeit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  von der Dopplerverschiebung  $dv_L = v_D - v_L$  wie folgt:

$$\frac{v_D - v_L}{v_L} = \frac{\vec{v} \cdot (\vec{e}_D - \vec{e}_L)}{c} \quad (1)$$

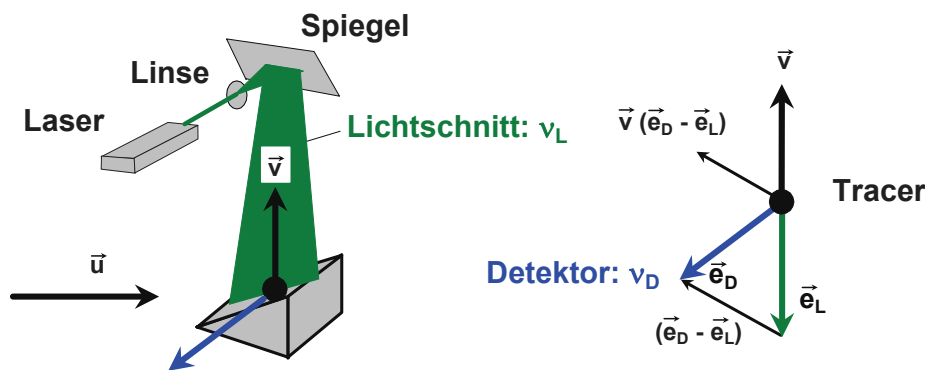


Abb. 5: Dopplereffekt

Die Beleuchtung des Strömungsfeldes erfolgte mit einem kontinuierlichen  $\text{Ar}^+$ -Laser wie auch mit einem gepulsten Nd/YAG-Laser.

Das Licht des Lasers wird durch einen Strahlteiler im Verhältnis 95/5 aufgeteilt. Der kleinere Anteil beleuchtet durch einen Lichtleiter eine ruhende Mattscheibe, der Hauptanteil beleuchtet die in der Strömung befindlichen Partikel. Das frequenzverschobene Streulicht der Partikel wie auch das Licht der Mattscheibe werden in das Interferometer gebündelt und vor Eintritt polarisiert. Das Licht der ruhenden Mattscheibe bildet am Ausgang des Michelsoninterferometers das Referenzbild, das Streulicht der bewegten Partikel das Dopplerbild. Durch die um  $90^\circ$  verschiedene Polarisierung ist es möglich, das Doppler- und das Referenzbild zeitgleich in einem Interferometer zu erzeugen. Der Aufbau des Michelsoninterferometers ist in Abb. 6 zu sehen, die gemeinsame Strahlführung wird durch grüne Felder dargestellt.

Der optische Aufbau (Abb. 6) wurde gegenüber Seiler et al. 2004 dahingehend verändert, dass die Übertragung des Referenzlichtes mittels eines Lichtleiters erfolgt und die Trennung von Referenz- und Dopplerlicht verbessert wurde. Die Übertragung mittels Lichtleiter vereinfacht die Strahlführung. Die Verbesserung der Trennung von Doppler- und Referenzlicht

wurde durch das besser polarisierbare Licht des kontinuierlichen Lasers möglich, weiterhin wurde die Justierung des Aufbaus vereinfacht. Der neue Aufbau in Verbindung mit dem kontinuierlichen Laser bietet einen gesteigerten Signal-Rausch-Abstand sowie eine höhere Auflösung. Mit dem kontinuierlichen Ar<sup>+</sup>-Laser ist eine vollkommene Trennung der Lichtwege möglich, aus Gründen höherer Bildintensität musste jedoch auf den Polarisator am Eingang des Interferometers verzichtet werden, daher erscheint der Körper im Referenzbild.

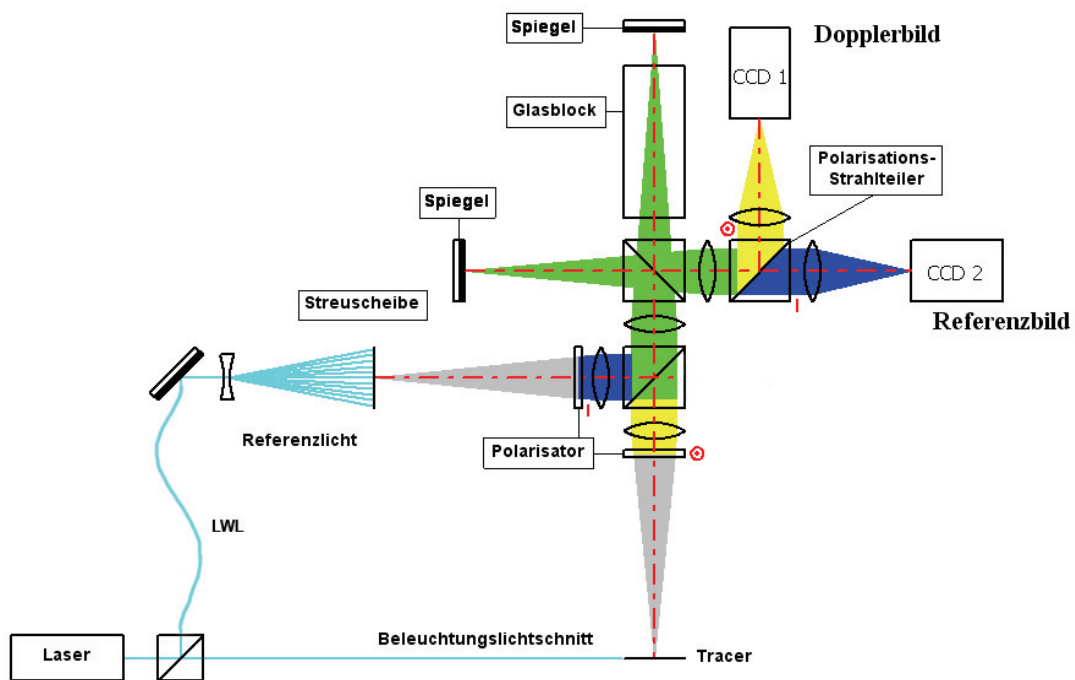


Abb. 6: Michelsoninterferometer

Die Lichtintensität in allen Bildpunkten hängt von der Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  ab, die durch die Differenz der optischen Weglängen in beiden Armen des Interferometers definiert wird. Mit der Dopplerverschiebung, also Änderung der Frequenz des Streulichts, ändert sich die Phasendifferenz  $\Delta\varphi$ . Gemäß

$$I = \hat{I} \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2} \quad (2)$$

kann bei idealen optischen Bauteilen aus der Verteilung der Lichtintensität im Dopplerbild die Phasendifferenz  $\Delta\varphi$ , also die Frequenzverschiebung, und damit die Geschwindigkeit bestimmt werden. Da die verwendeten optischen Bauteile keine idealen Charakteristiken aufweisen, ist die Auswertung gemäß Lichtintensitäten in den einzelnen Punkten nicht möglich. Stattdessen wird das Interferometer durch Drehung des Spiegels am Glasblock um einen kleinen Winkel auf ein Interferenzstreifenmuster eingestellt. Dieser Drehwinkel bestimmt den Abstand der Streifen. Bei einer Änderung der Frequenz des Lichtes erscheinen diese Interferenzstreifen gegenüber der Ausgangslage ohne Geschwindigkeit verschoben. Die begrenzte optische Güte der Komponenten wie auch die Fluktuation der Partikelverteilung hat auf die dunklen Streifen mit  $I=0$  keinen Einfluss, diese können also zur Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung herangezogen werden. Abb. 7 zeigt Doppler- und Referenzbild eines Keils in Mach 6-Strömung, beleuchtet mit kontinuierlichem Ar<sup>+</sup>-Laser während 2 ms.

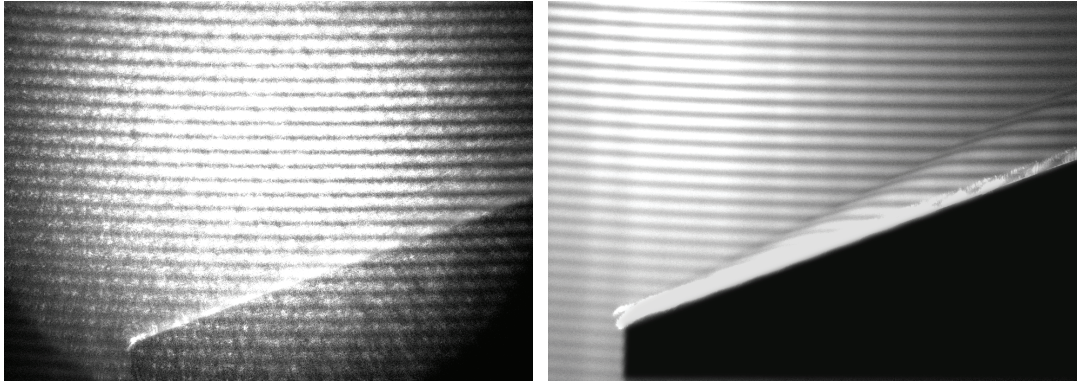


Abb. 7: Referenzbild links und Dopplerbild rechts für  $M = 6$  mit  $\text{Ar}^+$ -Laser, 2 ms

#### 4. Bildverarbeitung

Für die Bildverarbeitung wurde eine interaktive Auswertesoftware basierend auf der Java Advanced Imaging Bibliothek implementiert. In einem ersten Schritt überlagert der Benutzer anhand von Marken die Bilder deckungsgleich bezüglich Orientierung und Größe. In den transformierten Bildern werden zusammengehörige Dunkelstreifen mit  $I(x, y) = 0$  ausgewählt. Mit Gleichung (2) ist in diesen Dunkelstreifen wegen

$$I(x, y) = \hat{I} \cos^2 \left( \frac{\Delta\varphi(x, y)}{2} \right) = 0, \text{ also} \quad (4)$$

$$\Delta\varphi(x, y) = (2k - 1)\pi, \quad k = (\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots). \quad (5)$$

Wenn die Lage zusammengehöriger Dunkelstreifen bekannt ist, können in eine Matrix, die in ihrer Größe mit den eingegebenen Bildern übereinstimmt, Linien gleicher Phase eingetragen werden. Um nun in jedem Pixel des Bildes eine Phasenaussage treffen zu können, wird orthogonal zum Referenzstreifensystem linear interpoliert. Zwei derart entstandene Phasenbilder zeigt Abbildung 8.

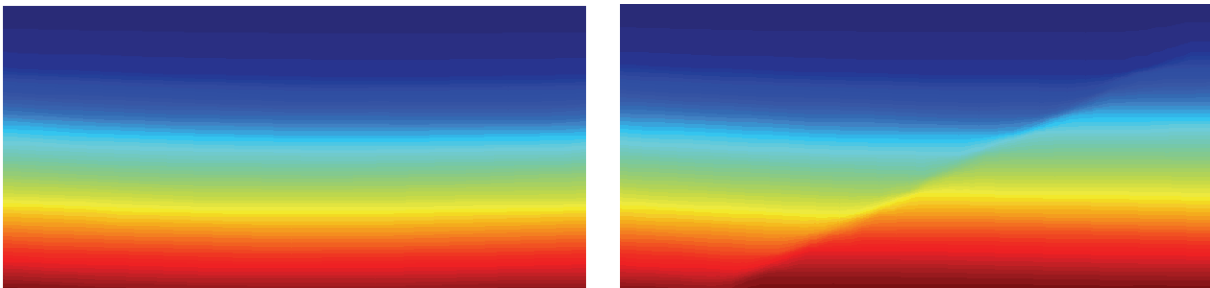


Abb. 8: Referenzphasenbild links und Dopplerphasenbild rechts für Bedingungen von Abb. 7

Wenn die Phasen in jedem Punkt bestimmt sind, ergibt sich die Phasendifferenz  $d(\Delta\varphi(x, y))$  durch pixelweise Subtraktion der Phasen  $\Delta\varphi(x, y)$  im Doppler- bzw. Referenzbild. Es ist (siehe Seiler et al. 2002)

$$dv(x, y) = \frac{c_0}{2\pi\Delta\phi} d(\Delta\varphi(x, y)) \quad (6)$$

Damit kann aus beiden Phasenbildern  $dv$  bestimmt werden. Einsetzen von  $dv$  in Gleichung (1) liefert punktweise die gemessene Verteilung der Vertikalkomponente  $\vec{v}$  in der Strömung. Da nur die Lage der Dunkelstreifen ausgewertet wurde, ergibt sich eine Auflösung der

Geschwindigkeitsverteilung von 1 Pixel in Richtung des Streifensystems und 40 Pixel orthogonal zum Streifensystem. Abb. 9 zeigt anhand von Falschfarben kodiert die mit dem oben beschriebenen Auswertalgorithmus erhaltene Geschwindigkeitsverteilung.

Die mittels DPV gemessenen Geschwindigkeiten stimmen im Rahmen der Messgenauigkeit von ca.  $\pm 10\%$  mit den berechneten überein. Mit der verbesserten Optik und Software kann eine höhere Auflösung erzielt werden, so dass die Teilchenrelaxationszone sowie Schwankungen der Geschwindigkeit deutlicher zu erkennen sind.

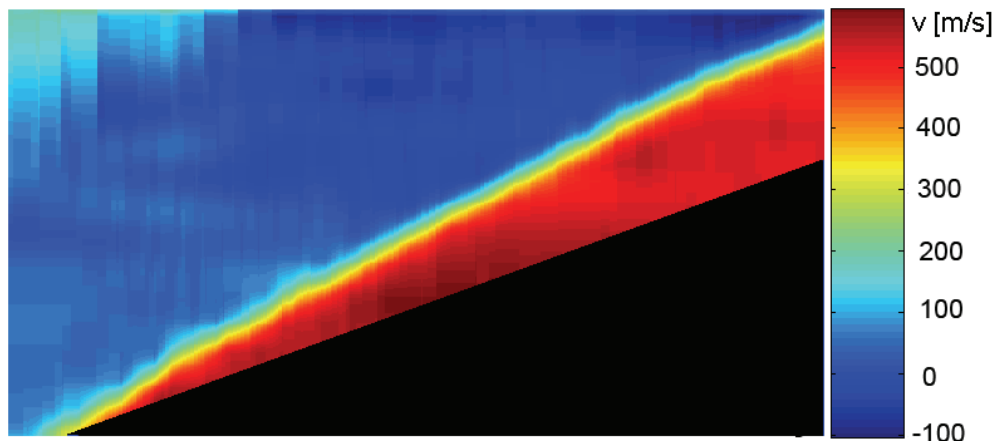


Abb. 9: DPV-Bild der Strömung am Keil

Ein erstes DPV-Bild für die Strömung um eine Kugel mit einem Durchmesser von 40 mm zeigt Abb.10. Die Anströmbedingungen entsprechen den in Abschnitt 2 angegebenen Daten für die die Keilanströmung. Auch hier stimmen die mittels DPV gemessenen Geschwindigkeiten innerhalb einer Messgenauigkeit von  $\pm 10\%$  mit den Rechnungen überein, die Auflösung ist horizontal 1 Pixel, vertikal 35 Pixel.

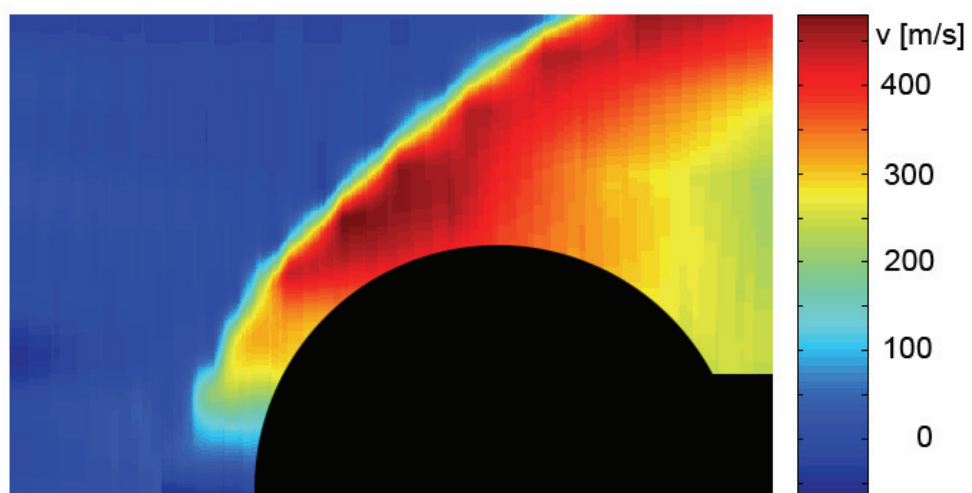


Abb. 10: DPV-Bild der Strömung um eine Kugel

## 5. Schlussbemerkungen

Durch verbesserte Polarisierung und einen veränderten optischen Aufbau können mit dem Doppler Picture Velocimetry Verfahren Messungen der Absolutgeschwindigkeit in Strömungen durchgeführt werden. Die Geschwindigkeit wird sichtbar durch Streifenverschiebung in einem Interferenzstreifenmuster. Die Bildqualität und die optische Trennung von Doppler- und Referenzlicht konnte durch Einsatz eines kontinuierlichen Lasers erhöht werden. Eine neue Auswertesoftware vereinfacht die Auswertung und verbessert die Auflösung der Geschwindigkeitsbilder.

In Zukunft soll die Untersuchung von Strömungen mittels DPV auf komplexere Strömungsphänomene ausgedehnt werden. Es ist ebenfalls geplant, die Benutzereingaben der interaktiven Auswertesoftware durch automatische Algorithmen zu ersetzen.

## Literatur

Oertel H., Seiler F., George A., 1982: Visualisierung von Geschwindigkeitsfeldern mit Dopplerbildern, ISL Bericht R 115/82

Seiler F., George A., Srulijes J., 1998: Doppler Picture Interference Velocimetry (DPV), Proc. of the 8th International Symposium on Flow Visualization, Sorrento, Italy

Adrian R. J., 1986: Multipoint optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow – a review, Int. J. Heat and Fluid Flow 7(2), pp 127 - 145.

Meyers J. F., 1992: Doppler Global Velocimetry the next generation, AIAA 92-3897

Seiler F., George A., Leopold F., Havermann M., Srulijes J., 2002: Enhanced Doppler Picture Velocimetry (DPV) for Planar Velocity Measurements in High Speed Shock Tunnel Flow. Proc. of the 10th International Symposium on Flow Visualization, Kyoto, Japan

Seiler F., George A., Leopold F., Srulijes J., Havermann M., 2002: Das Dopplerbildverfahren (DPV) des ISL zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit in einer Ebene, 10. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik: Neuere Entwicklungen und Anwendungen", Universität Rostock, 10.-12. September 2002 und ISL-Bericht PU 627/2002

Seiler F., George A., Srulijes J., 2004: Stand des ISL Dopplerbildverfahrens (DPV) anhand einer Keilströmung im Hyperschall, 12. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Universität Karlsruhe, 7.-9. September 2004 und ISL-Bericht PU 637/2004