

STAND DES ISL DOPPLERBILDVERFAHRENS (DPV) ANHAND EINER KEILSTRÖMUNG IM HYPERSCHALL

F. Seiler, A. George, 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) begann im ISL im Jahre 1981. Schwierigkeiten bereitete zu jener Zeit infolge der noch nicht vorhandenen digitalen Aufnahme- und Bildauswertegeräte die Auswertung der Dopplerbilder, was inzwischen mit Einsatz der heutigen Rechner und durch den rasanten Fortschritt in der Aufnahmetechnik wie auch der Bildverarbeitung überwunden werden konnte. Die Aufnahme und Auswertung der Dopplerbilder ist unterdessen den heutigen Standards angepasst. Probleme bereitete noch die Aufnahme des Referenzbildes zur Bestimmung der absoluten Geschwindigkeiten. Nach damaligem Stand konnten nur relative Angaben über die Geschwindigkeitsverteilung in einem Lichtschnitt erhalten werden. Dieser Nachteil wurde unterdessen durch eine veränderte Aufnahmetechnik beseitigt. Nach neuestem Stand sind nun die Geschwindigkeiten als Absolutwerte bestimmbar. Dieser wird anhand von Versuchen im Stoßrohr-Windkanal STB des ISL erläutert. Dabei wird ein 20° Keil mit Machzahl 6 bei Atmosphärenbedingungen wie sie in 21 km Höhe vorliegen angeströmt. Über dem Keil bildet sich eine vertikale Strömungskomponente. Diese wird in einem Dopplerbild mittels Michelsoninterferometrie visualisiert. Durch Anwendung von Bildverarbeitungsalgorithmen entsteht an n·m Bildpunkten des Lichtschnitts die Geschwindigkeitsverteilung.

1. Einleitung

Das von Oertel, Seiler & 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 mehr oder weniger 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 Merzkirch 1990, 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 STB. Abb. 2 zeigt die in STB montierte Machzahl-6-Parallelstrahldüse mit Optik. Der Düsenaustrittsquerschnitt beträgt 344,5 mm. Die innere Kontur der Mach-6-Düse ist so konzipiert, dass die Ausströmung parallel ohne Querkomponente erfolgt.

Zur Prüfung von DPV bot sich an, ein wohlbekanntes Testobjekt zu benutzen. Bestens geeignet erschien dazu die Umströmung eines Keils. Dieser war, wie aus Abb. 2 ersichtlich ist, im Abstand von 60 mm vor dem Düsenaustritt montiert. Verwendet wurde ein Doppelkeil mit 20° Halbwinkel.

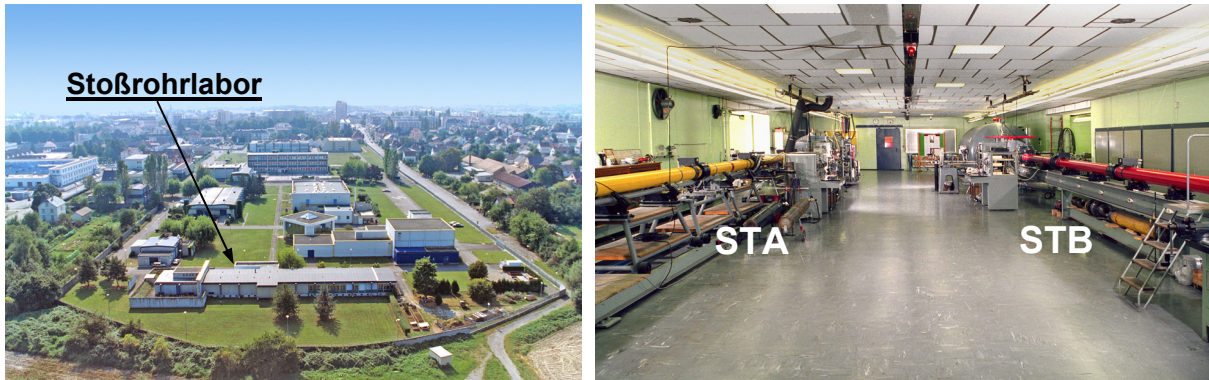


Abb. 1: Stoßrohrlabor des ISL

Die Keilströmung wird durch einen ebenen Lichtschnitt beleuchtet und ist mit Streupartikeln (TiO_2) geimpft. Deren Bewegung verschiebt infolge des Dopplereffektes die Frequenz ν_D des gestreuten Lichts gegenüber der Frequenz ν_L der Laserlichtquelle. Das von den einzelnen Streuteilchen aus der Lichtschnittebene emittierte Streulicht wird durch eine abbildende Optik betrachtet und durch ein Michelsoninterferometer auf seine Frequenzverschiebung hin analysiert. Die Verteilung der Lichtintensität im Bild informiert dann mittels Grauwertverteilung über die Geschwindigkeiten in der Ebene des Lichtschnitts.

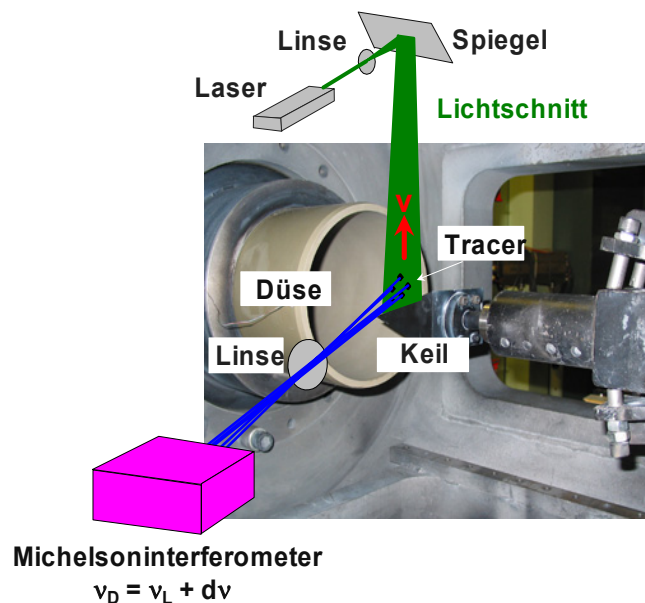


Abb. 2: Mach-6-Parallelstrahldüse mit Optik

3. Messung der Frequenzverschiebung

3.1 Dopplereffekt

Der Keil wird mit der Geschwindigkeit \vec{u} angeströmt. Siehe Abb. 3. Die Keilneigung erzwingt eine Umlenkung der Strömung um 20° und verursacht eine Querkomponente \vec{v} . In der Anströmung befinden sich die TiO_2 -Streupartikel. In Abb. 3 ist zur Veranschaulichung lediglich ein einzelnes Streupartikel über der Keiloberfläche überdimensional eingezeichnet. Die betrachtete Strömungsebene wird mit Laserlicht und abbildender Zylinderoptik von oben beleuchtet, siehe Lichtschnitt im Bild links. Im Vektordiagramm rechts ist die Richtung zwischen Lichtquelle (L) und Streupartikel durch den Einheitsvektors \vec{e}_L charakterisiert. Der Einheitsvektor \vec{e}_D zeigt vom Partikel zum Beobachter, d. h. zum Detektor D. Dieser wird durch das Michelsoninterferometer repräsentiert. Für die Dopplerverschiebung der Streulichtfrequenz ist der Differenzvektor $\vec{e}_D - \vec{e}_L$ maßgeblich. Der Vektor $\vec{e}_D - \vec{e}_L$ definiert die Projektion der Geschwindigkeitskomponente \vec{v} in Richtung $\vec{v}(\vec{e}_D - \vec{e}_L)$. Die Theorie der Einbündelvelozimetrie beschreibt die Abhängigkeit der Geschwindigkeit \vec{v} von der Dopplerverschiebung $d\nu_L = \nu_D - \nu_L$ wie folgt:

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

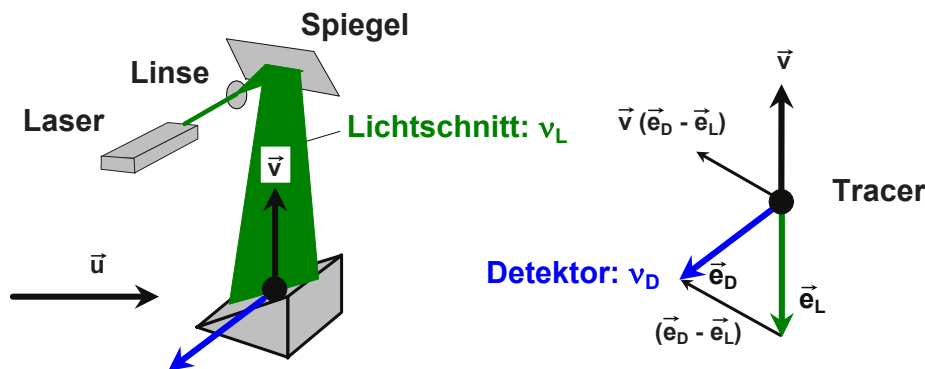


Abb. 3: Dopplereffekt

3.2 Michelsoninterferometer

Das aus dem Lichtschnitt kommende Streulicht wird in das Michelsoninterferometer (MI) gebündelt, siehe Abb. 2, und dort auf seine Frequenzverschiebung $d\nu_L = \nu_D - \nu_L$ hin interferometrisch untersucht. Abb. 4 zeigt den für die Aufnahme von Dopplerbildern benötigten optischen Aufbau. Ein Laserlichtschnitt beleuchtet eine axial über dem Keil orientierte Strömungsebene, die Objektebene Σ . Die Lichtquelle, ein frequenzverdoppelter Nd/YAG Puls laser, emittiert Licht der Frequenz $\nu_L = 532 \text{ nm}$. Die Lichtleistung beträgt 180 mJ bei 30 ns Pulsdauer. Das von den Tracern gestreute Licht ist im Falle bewegter Partikel nach ν_D verschoben.

Die Frequenzverschiebung ν_D wird in dem in Abb. 4 gezeigten MI detektiert und verarbeitet, dessen optischer Aufbau gegenüber dem von Seiler et al. 2002 gegebenen Stand hinaus verändert wurde. In der neuesten Version wird das Laserlicht durch einen ersten Strahlteiler

in zwei Anteile im Verhältnis 30%/70% aufgeteilt. Der 30%-Anteil beleuchtet eine Mattscheibe. Dieses verdeutlicht die Darstellung der Optik in Abb. 4. Der andere Teil (70%) bestrahlt in der Objektebene Σ die der Strömung zugegebenen Streupartikel. Beide, das von der Mattscheibe kommende Streulicht (blau markiert), wie auch das von den Tracern reflektierte Streulicht (gelb gekennzeichnet), durchlaufen auf gleichen Wegen das MI, also überlappend. Vor Eintritt in das Michelsoninterferometer wird das Licht der Mattscheibe, das sog. „Referenzlicht“, wie auch das von den Streuteilchen emittierte Licht („Dopplerbild“) durch die vor dem ersten Strahlteiler platzierten Polarisatoren senkrecht zueinander polarisiert. Das Referenzlicht und das vom Objekt Σ kommende Streulicht werden jeweils zu 30% und 70% aufgeteilt. 70% des Referenz- wie auch des Streulichts gehen in das eigentliche MI (grün = blau + gelb). Die anderen 30% werden auf die CCD3-Kamera abgebildet. Der Polarisator vor CCD3 erlaubt, dass nur die Streulichtintensität aus der Objektebene Σ auf der CCD3-Kamera abgebildet wird (gelb angezeigt).

Die optischen Komponenten des MI sind Abb. 4 zu entnehmen, das sind: der Strahlteilerwürfel T, die zwei Spiegel S_1 und S_2 und der Glasblock G zwischen S_2 und T. Das Referenzlicht und das Streulicht von Σ kommen, wie schon angemerkt, senkrecht zueinander polarisiert in das MI. Am Eintritt werden sie durch T in jeweils zwei Anteile aufgespalten, durchlaufen Arm 1 und Arm 2, werden an S_1 bzw. S_2 reflektiert und erreichen schließlich, nach erneuten Durchlauf von T den dritten Strahlteiler, der als Polarisationsstrahlteiler wirkt. Die Armlängen sind l_1 und l_2 . Das von der Mattscheibe und von der Objektebene Σ kommende Licht wird über die in Abb. 4 gezeigten Linsen in das Interferometer geleitet. Die Abbildungen erfolgen zuerst auf die Spiegel S_1 bzw. S_2 und anschließend durch zwei weitere Linsen auf die Bildebenen Σ' , d. h. die CCD2- und CCD1-Kameras. Der Polarisationsstrahlteiler lenkt das Referenzlicht auf CCD2 und das Streulicht aus der Objektebene Σ auf CCD1. Dort werden die durch T aufgetrennten Lichtbündel wieder vereinigt, d. h. sie interferieren.

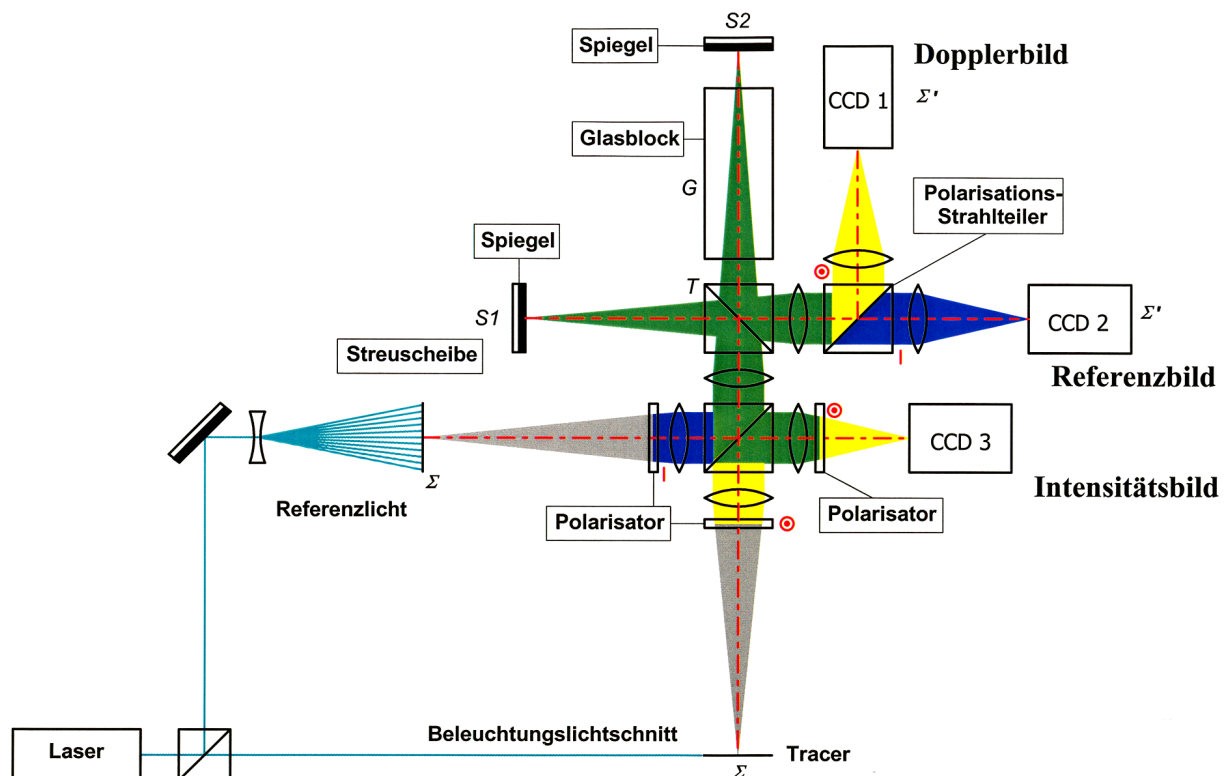


Abb. 4: Michelsoninterferometer

Die Lichtintensität I in allen Bildpunkten Σ' hängt von der Phasendifferenz $\Delta\varphi$ ab, die durch die Differenz der optischen Weglängen in beiden Armen des Interferometers definiert wird, siehe Gleichung (2). Eine nähere Beschreibung der Abhängigkeiten ist bei Seiler et al. 2002 nachzulesen.

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

4. Aufnahme der Dopplerbilder

Die Experimente zur Aufnahme eines Dopplerbildes der Geschwindigkeitsverteilung über dem Keil erfolgten in Machzahl-6-Strömung. Abb. 5 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. 5 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 des Laufgases 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.

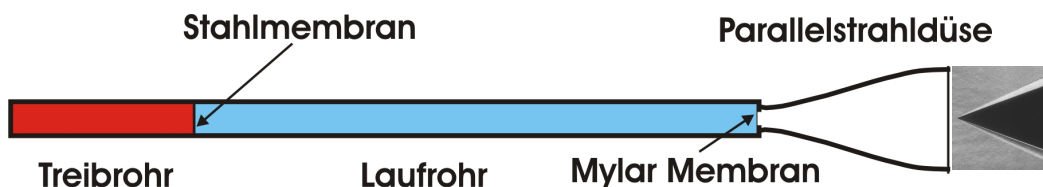


Abb. 5: Prinzipbild des Stoßrohraufbaus

Der 60 mm vor der Düse befestigte Keil wird mit Machzahl $M = 6$ bei einem statischen Druck p von 4,2 kPa und einer Temperatur T von 200 K über ca. 2 ms angeströmt. Das von den TiO_2 Streuteilchen abgegebene Streulicht wird von der Seite unter 90° zum Lichtschnitt beobachtet (Abb. 3). Verantwortlich für die Frequenzverschiebung des Laserlichtes ist die Projektion des Geschwindigkeitsvektors \vec{v} in Richtung $\vec{e}_D - \vec{e}_L$. Aufgenommen wurden mit dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen MI zum einen das Dopplerbild (CCD1) wie auch das Referenzbild (CCD2), die in Abb. 6 dargestellt sind.

Über der Keiloberfläche wird die Strömung umgelenkt. Es entsteht dadurch eine vertikale Geschwindigkeitskomponente, die, wie Abb. 3 verdeutlicht, mit der hierzu aufgebauten Optik vermessen wird. Die Umlenkung der horizontal aus der Düse ausströmenden Streupartikel bewirkt eine Dopplerverschiebung der Streulichtfrequenz um dv . Nach Gleichung (3) wird dadurch die Phasendifferenz $\Delta\varphi$ im MI verändert, was sich mit Gleichung (2) auf die Intensitätsverteilung am Ausgang des MI auswirkt. Sichtbar ist diese Intensitätsänderung in Abb. 6 anhand einer Streifenverschiebung in der von der Kopfwelle beeinflussten Strömung über der Keiloberfläche. Die Streifenverschiebung gegenüber der Lage der Referenzstreifen ist dann ein Maß für die über dem Keil vorliegende vertikale Strömungskomponente.

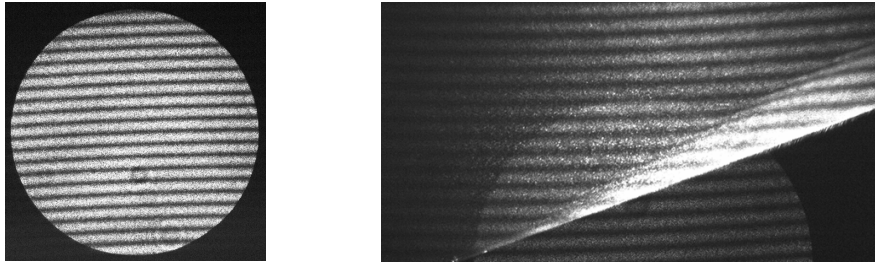


Abb. 6: Referenzbild links und Dopplerbild rechts für Versuch Nr. 02110701

Wünschenswert wäre, das MI auf einheitliche Helligkeit I in der Bildebene Σ' zu justieren. In der Praxis ist diese Forderung leider nicht machbar, da die verwendeten optischen Bauteile nur eine begrenzte optische Qualität besitzen. Demzufolge ist das MI durch Drehung des Spiegels S_1 um einen kleinen Winkel β auf ein sog. Interferenzstreifenmuster eingestellt. Der Drehwinkel β bestimmt den Abstand der Streifen.

5. Bildverarbeitung

In dem von Seiler et al. 2002 beschriebene Aufbau war von Nachteil, dass das Referenz- und das Dopplerbild zeitlich nacheinander aufgenommen wurden. Durch kleine Verschiebungen der optischen Bauteile des MI während dieser Zeitspanne war leider keine exakte Zuordnung beider Bilder möglich, weshalb mit dem in Seiler et al. 2002 gegebenen MI nur relative Geschwindigkeiten angegeben werden konnten. Im Zuge der Weiterentwicklung der Messmethode wurde nun das Referenzbild wie auch das Dopplerbild zeitgleich durch CCD1 und CCD2 registriert. Das von der ruhenden Mattscheibe reflektierte Streulicht, das Referenzlicht CCD2, ist in seiner Frequenz unverschoben und dient somit als direkter Bezug für die Auswertung des Dopplerbildes auf CCD1.

In einem ersten Auswerteschritt werden das Referenzbild und das Dopplerbild in Größe und Orientierung deckungsgleich einander angepasst. Die Überlagerung beider Bilder ist in Abb. 7 gezeigt. Danach erfolgt die Bestimmung der Dunkelsteifen, d. h. der Mitten zwischen jeweils zwei hellen Streifen. In der Darstellung in Abb. 8 sind die Streifen des Referenzbildes in rot (linkes Diagramm) und diejenigen des Dopplerbildes in schwarz (rechts) eingetragen. Die Streifenverteilung, d. h. die Intensitätsverteilung ist ein Maß für die Phasendifferenz $\Delta\varphi$ im MI und nach Gleichung (3), siehe Seiler et al. 2002, ein Maß für die Verteilung der Frequenz ν_L .

$$\frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \nu_L \frac{\Delta\phi}{c_0} . \quad (3)$$

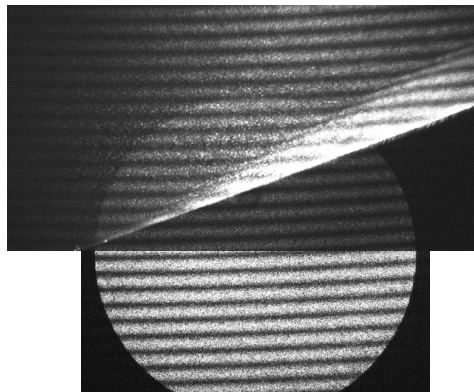


Abb. 7: Überlagerte CCD1 und CCD2 Bilder

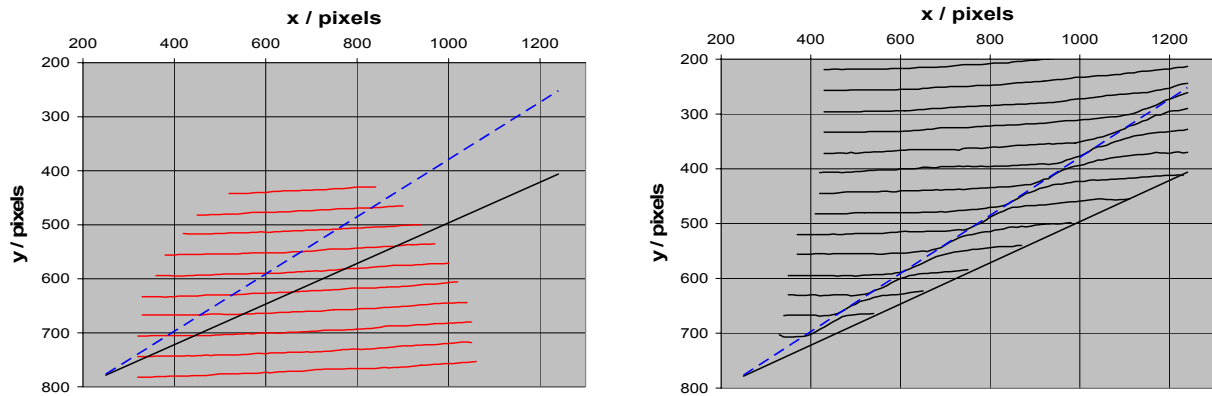


Abb. 8: Streifenauswertung

6. Geschwindigkeitsbild

Durch Überlagerung eines Auswertegitters mit $n \cdot m$ Gitterpunkten und linearer Interpolation von Streifen zu Streifen entsteht das in Abb. 9 dargestellte Geschwindigkeitsbild. Nachdem mit Gleichung (2) aus der Intensitätsverteilung Punkt für Punkt $\Delta\varphi$ berechnet ist, wird durch Gleichung (3) die Verteilung von dv bestimmt. Einsetzen von dv in Gleichung (1) liefert punktweise die gemessene Verteilung der Querkomponente v in der Strömung hinter der Keilkopfzelle über der Keiloberfläche. Abb. 9 zeigt anhand von Falschfarben codiert die mit der oben beschriebenen Auswerteprozedur erhaltene Geschwindigkeitsverteilung. Die Vertikalkomponente der Geschwindigkeit über der Keiloberfläche beträgt gemessen: $\Delta v = 514 \pm 25$ m/s. Über dem Keil ist die Strömung konstant, wie theoretisch gefordert. Die Rechnung liefert $\Delta v = 515$ m/s. Die Trägheit der TiO_2 -Partikel verbreitert die Keilkopfzelle. Die beiden in Abb. 9 weiß eingezeichneten Linien verdeutlichen die Dicke der Teilchenrelaxationszone, hier ca. 2 mm.

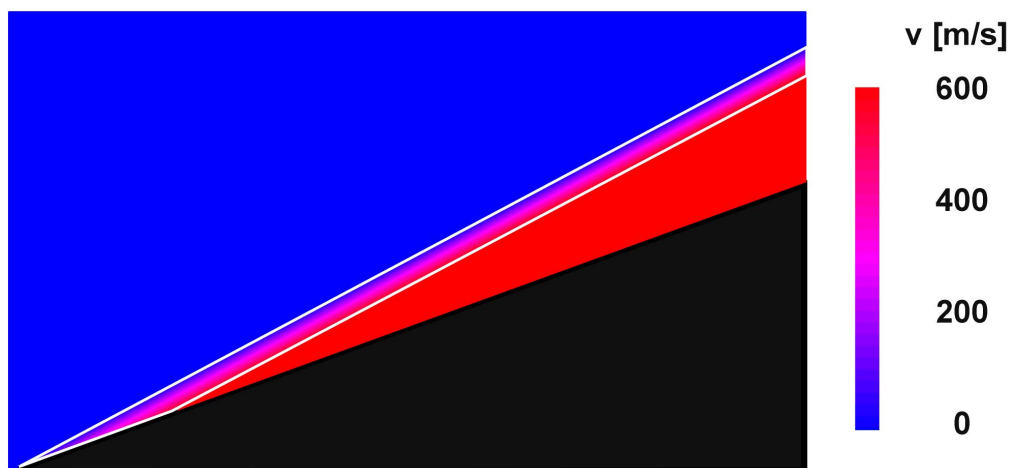


Abb. 9: DPV-Bild der Strömung am Keil

Die Übereinstimmung zwischen den mit DPV hinter der Keilkopfzelle gemessenen Geschwindigkeiten und der Rechnung ist bestens, was zeigt, dass mittels des neuen optischen Aufbaus die Absolutgeschwindigkeiten im Rahmen des Messfehlers von ca. $\pm 5\%$ korrekt gemessen werden. Allerdings erscheint im Hintergrund des Dopplerbildes in Abb. 6 eine unerwünschte Reflexion des Referenzbildes. Das Ziel der Weiterentwicklung von DPV ist demzufolge auf Eliminierung dieses Hintergrundbildeseffekts gerichtet. Erste Versuche

mit einem kontinuierlich leuchtenden Ar+-Laser zeigten eine erheblich verbesserte Trennung der Referenz- und Dopplerbilder. Möglicherweise ist der vom ND/YAG Laser emittierte Laserpuls aufgrund der kurzen Dauer von 30 ns nicht einwandfrei zu polarisieren. Die zukünftigen Versuche erfolgen demzufolge mit kontinuierlicher Lichtquelle. Die Verschlusszeit wird über die verwendeten CCD-Kameras getriggert. Um genügend Belichtung zu erhalten, sind Öffnungszeiten im Mikrosekundenbereich vorgesehen.

7. Schlussbemerkungen

Ziel der Untersuchungen war anhand von Experimenten mit dem Stoßrohr-Windkanal STB des ISL die Messung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente in der Strömung über einem Keil mit 20° Halbwinkel. Die Strömung wird durch einen ebenen Lichtschnitt mittels Puls laser beleuchtet. In der Strömung befinden sich hinreichend viele TiO₂-Streupartikel. Mittels eines Michelsoninterferometers (MI) wird das von den einzelnen Streuteilchen aus der Lichtschnittebene emittierte Licht auf seine Frequenzverschiebung infolge des Dopplereffekts hin analysiert. Das MI ist auf Streifen justiert. Die dv werden durch das MI in Intensitätsänderungen gewandelt, die sich als Streifenverschiebungen äußern. Neu ist gegenüber der Veröffentlichung von Seiler et al. 2002, dass nun die Trennung des Referenz- und des Dopplerbildes mittels Polarisation erfolgt. Leider konnte eine gänzliche Trennung von Referenz- und Dopplerbild bis jetzt noch nicht erreicht werden. Im Dopplerbild ist schwach das Referenzbild erkennbar. Die Transformation des Dopplerbilds in das entsprechende Bild der Geschwindigkeitsverteilung erfolgt über einen speziell dafür entwickelten Auswertalgorithmus.

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
- Merzkirch W., 1990: Laser-Speckle-Velocimetrie, In „Lasermethoden in der Strömungsmechanik“, Hrsg. Ruck B., AT-Fachverlag, Stuttgart
- 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