

Korrelationsalgorithmen und Optischer Fluss zur Berechnung von Dichtefeldern einer expandierenden Düsenströmung mittels der BOS Methode im Vergleich

Application of the BOS-Method for the calculation of the density field of expanding nozzle flows: comparison of correlation algorithms and optical flow

B. Over, A. Schröder, R. Geisler, A. Bulit*, R. Schwane*, J. Kompenhans
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Bunsenstr. 10, 37073 Göttingen, Deutschland
Tel.: + 49 [551] 709-2283, Fax: +49 [551] 709-2830
*ESA- ESTEC, EPL, Noordwijk, The Netherlands

Background-Oriented-Schlieren, Mikrodüsen, Optischer Fluss
Background-Oriented-Schlieren, micro nozzle, optical flow

Einleitung

Zur Lage- und Bahnregelung von Raumfahrzeugen werden Steuertriebwerke (Mikrodüsen) mit einer Größe von wenigen Millimetern verwendet. Zur Charakterisierung ihres Ausstoßverhaltens müssen diese Düsen experimentell und mittels numerischer Simulationen untersucht werden.

Durch den Betrieb der Düsen im Vakuum entstehen besondere Herausforderungen an die angewandten Messtechniken und Simulationsalgorithmen. Unter anderem wird die Anwendung der Particle Image Velocimetry (PIV) zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes unmöglich, da bei diesem Verfahren der Strömung Partikel beigefügt werden müssen. Aufgrund der hohen mittleren Weglänge der Moleküle und der Trägheit der Partikel würden diese den Beschleunigungen und damit den Stromlinien nicht folgen.

Zur Untersuchung dieser Strömungen müssen andere Messtechniken, wie die Background Oriented Schlieren (BOS)-Technik (siehe Richard u. a. 2002), eingesetzt werden. Bei diesem Messverfahren handelt es sich um ein optisches Messsystem, das eine berührungslose Messung des Dichtegradienten und damit auch der Dichte ermöglicht, wobei die Strömung nicht durch Partikel geimpft werden muß. In der vorliegenden Arbeit wurde die BOS-Messtechnik dem Skalenbereich von Mikrodüsen angepasst und ihre Anwendbarkeit untersucht. Diese modifizierte Messtechnik wird im Weiteren als μ BOS-Messtechnik bezeichnet. Mit Hilfe der μ BOS-Messtechnik wurde die Expansionsströmung einer Mikrodüse in das Vakuum untersucht. Zur Rekonstruktion von dreidimensionalen Dichtefeldern wendeten Venkatakrishnan u. Meier 2004 ein Tomographie-Verfahren auf BOS-Messergebnisse an. Dieses Verfahren wurde verwendet, um das radialsymmetrische Dichtefeld zu rekonstruieren.

Background Oriented Schlieren

Bei der Background Oriented Schlieren-Methode wird der physikalische Zusammenhang zwischen Dichte und Brechungsindex genutzt, um die Dichte eines Fluids zu bestimmen. Der Aufbau (siehe Abb.1) besteht aus einem Hintergrundbild (a) und einer Kamera (hier: Digitalkamera, Objektiv (c) und CCD-Sensor (d)). Die Linie (b) bezeichnet die Ebene, in der sich das Messobjekt befindet. Als Hintergrundbild wird ein zufälliges Punktemuster verwendet.

Während der Messung werden zwei Bilder vom gleichen Hintergrundbild aufgenommen:

Ein Referenzbild ohne das zu untersuchende Fluid¹ und ein Messbild, bei dem das Fluid zwischen Kamera und Hintergrundbild eingebracht wird.

Aufgrund von Dichtegradienten im Messobjekt kommt es zu räumlich unterschiedlichen Ablenkungen des Lichtes. Die Punkte des Messbildes werden unterschiedlich stark gegen die Punkte des Referenzbildes verschoben. Die Verschiebungen der Punkte in der Bildebene können mit Hilfe einer räumlichen Korrelation oder dem sog. Optischen Fluss berechnet und als Verschiebungsvektoren in der Bildebene dargestellt werden.

Unter der Annahme einer Parallelprojektion und kleiner Ablenkwinkel ϵ lassen sich die Ablenkwinkel aus den Verschiebungsvektoren $\Delta \mathbf{d} = (\Delta x, \Delta y)$, dem Abbildungsmaßstab M , und dem Abstand zwischen Hintergrundbild und Objektebene l berechnen.

Merzkirch stellt in [Merzkirch 1987] einen Zusammenhang zwischen dem Winkel ϵ und dem Brechungsindexgradienten dar. Dabei wird der jeweils senkrechte Anteil der Verschiebung zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes betrachtet:

$$\frac{\Delta x'}{l} \approx \tan \epsilon_x = \int_{\eta} \frac{\partial n}{\partial x} dz.$$

Dabei ist η der Lichtweg und n der Brechungsindex. Aus dem berechneten Brechungsindex sowie der Gladstone-Dale-Konstante K , die sowohl vom verwendeten Fluid als auch von der Wellenlänge des Lichtes abhängig ist, lässt sich mit Hilfe der folgenden Gleichung die Dichte bestimmen (siehe Merzkirch 1987):

$$K \rho = n - 1.$$

Damit wird ein Zusammenhang zwischen dem Verschiebungsvektor $\Delta \mathbf{d}$ und der Dichte unter Zuhilfenahme der Messobjekteigenschaft (K) sowie den geometrischen Größen des Messaufbaus und der Eigenschaften der Digitalkamera (M, l) dargestellt.

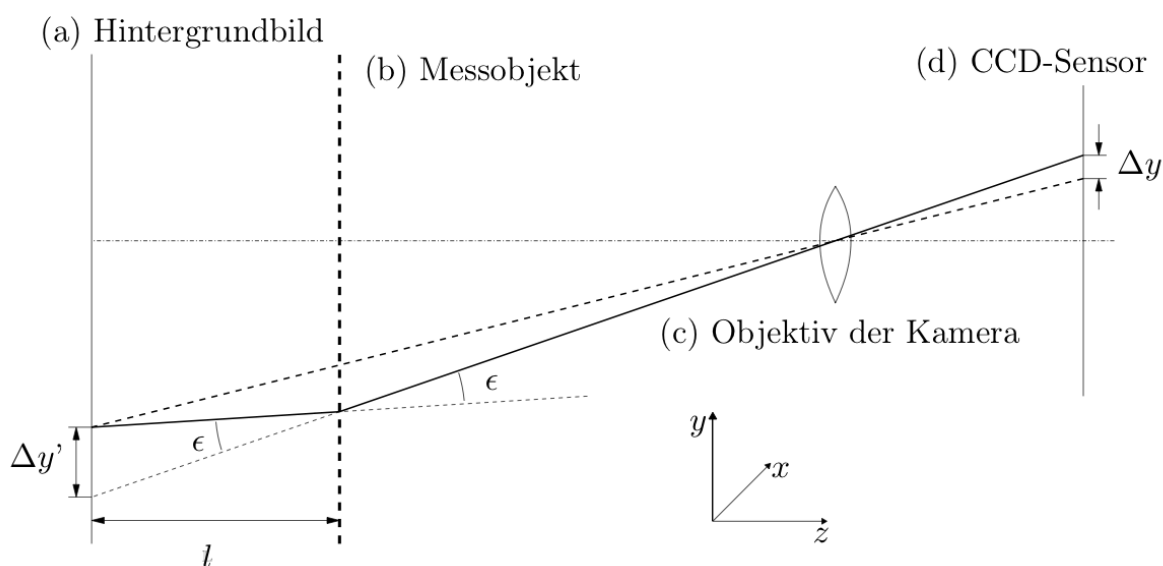


Abb. 1: Schematische Darstellung der Background Oriented Schlieren Methode mit direktem Lichtweg (gestrichelt) und abgelenktem Lichtweg

Bestimmung der Verschiebungsvektoren mit Hilfe des Optischen Flusses

Neben den korrelationsbasierten Auswertalgorithmen zur Bestimmung des Verschiebungsvektorfeldes, welche in der PIV Messtechnik Anwendung finden (siehe Raffel u. a. 2007), können diese auch mit Hilfe eines linearen Gleichungssystems auf Grundlage der Graustufenverteilung der Bilder berechnet werden. Während bei korrelationsbasierten

¹ Im Weiteren wird ohne Einschränkung der Allgemeinheit ein transparentes Fluid als Objekt mit räumlichen Dichtegradienten angenommen

Auswertelgorithmen die Position des Maximums der normierten Korrelationsfunktion bestimmt werden soll, wird beim Optischen Fluss (OF) ein Minimierungsproblem gelöst. Werden zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommene Bilder betrachtet, dann ist der Optische Fluss als das zweidimensionale Vektorfeld definiert, welches die Bewegung zwischen den beiden Bildern beschreibt. Dabei wird angenommen, dass die Veränderung der Intensitätsverteilung der Bilder allein auf die Bewegung und nicht auf unterschiedliche Belichtungen zurückzuführen ist. Sei Δx eine Verschiebung eines Bildausschnittes in x -Richtung und Δy eine Verschiebung in y -Richtung in der Zeit Δt , so folgt unter der Annahme konstanter Intensität (vgl. Horn u. Schunck 1994):

$$\begin{aligned} I(x, y, t) &= I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \\ &= I(x, y, t) + \Delta x \frac{\partial I}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial I}{\partial y} + \Delta t \frac{\partial I}{\partial t} + \epsilon, \end{aligned}$$

dabei beschreibt ϵ die höhere Terme der Taylorentwicklung, welche unter der Annahme kleiner Verschiebungen vernachlässigt werden können. Zum Lösen dieser Gleichung wird ein Gleichungssystem basierend auf einer Signal-Rekonstruktions-Idee nach Gesemann 2008 aufgestellt:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}.$$

mit:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \partial_x I_1^1 & \partial_y I_1^1 \\ \vdots & \vdots \\ \partial_x I_1^n & \partial_y I_1^n \end{pmatrix}, \mathbf{x} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{b} = \begin{pmatrix} I^1(x, y, t_2) - I^1(x, y, t_1) \\ \vdots \\ I^n(x, y, t_2) - I^n(x, y, t_1) \end{pmatrix}.$$

Unter der Annahme, dass die Verschiebung im betrachteten Bereich konstant ist, können zur Bestimmung der Unbekannten x, y Verfahren der Ausgleichsrechnung angewendet werden. Dies führt zu einem Minimierungsproblem, dass sich wie folgt lösen lässt:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}.$$

Dieses Verfahren fand in verschiedenen Bereichen der Strömungsmesstechnik Anwendung. Miozzi 2004 berechnete mit Hilfe dieses Verfahrens Geschwindigkeitsfelder in der PIV-Messtechnik. Atcheson u. a. 2008 verwendete diesen Ansatz erstmalig in der BOS-Messtechnik.

Vergleich der Auswerteverfahren anhand von simulierten Daten

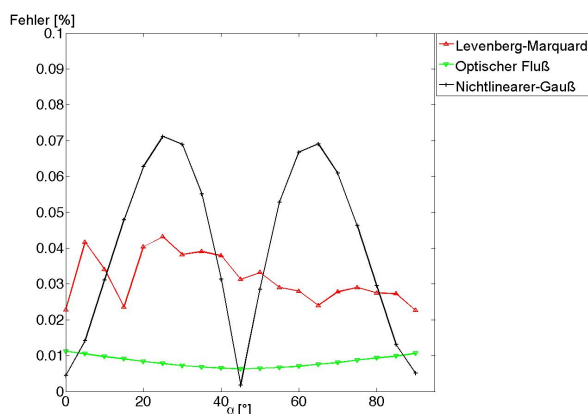


Abb. 2: Vergleich zwischen Levenberg-Marquardt-Algorithmus, Multigrid-Algorithmus und Optischem Fluss bei simulierten Bildern mit einer niedrigen Punktdichte.

Im folgenden Abschnitt soll die Genauigkeit der korrelationsbasierten Algorithmen mit dem OF-Algorithmus verglichen werden. Als korrelationsbasierte Auswertelgorithmen werden der Levenberg-Marquardt-Algorithmus (siehe Ronneberger u. a. 1998), sowie der Multigrid-Algorithmus (siehe Raffel u. a. 2007) in Verbindung mit einer nichtlinearen Gauß-Anpassung verwendet. Bei dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus handelt es sich um ein iteratives Auswerteverfahren, welches eine zweidimensionale Gauß-Funktion an das Maximum der Korrelationsfunktion anpasst. Dabei wird vor der Anpassung die Fisher-Transformation auf die Korrelationsfunktion

angewendet. Bei der nichtlinearen Gauß-Anpassung werden zwei eindimensionale Gauß-Funktionen an die Korrelationsfunktion angepasst. Zum Vergleich der verschiedenen Ansätze werden Bilder generiert, auf denen Punkte abgebildet sind, deren Graustufenverteilungen nicht einer radialsymmetrischen Gauß-Funktion entsprechen, sondern deren Ausdehnungen in x - und y - Richtung unterschiedlich sind. Insbesondere soll die Genauigkeit der verschiedenen Ansätze hinsichtlich der Gauß-Funktionen überprüft werden, deren Halbachsen um einen Winkel α gedreht sind. Solche Graustufenverteilungen spielen in der μ BOS-Messtechnik eine besondere Rolle, da aufgrund von Abschattungen (z.B. durch die Düse) außerhalb der Fokusebene die abgebildeten Punkte nicht immer einer radialsymmetrischen Gauß-Funktion entsprechen. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse dargestellt. Diese zeigen, dass die nichtlineare Gauß-Anpassung eine starke Winkelabhängigkeit aufweist. Dies lässt sich durch die Anwendung zweier eindimensionalen Anpassungen begründen. Der Optische Fluss hat, wie zu erwarten war, nur eine minimale Abhängigkeit vom Drehwinkel der Halbachse. Da dieser Ansatz die Grauwerte der Bilder als Grundlage für ein Minimierungsproblem verwendet, sind die berechneten Verschiebungen unabhängig von der Form der Punkte auf den Bildern. Die Qualität hängt im Wesentlichen von zwei Eigenschaften der Bilder ab. Zum einen muss sichergestellt werden, dass die Differenz der Grauwerte zwischen den beiden Bildern allein aus der zu untersuchenden Strömung resultiert, zum anderen, dass sich ein Grauwertgradient in den Bildern befindet, um die partiellen Ableitungen berechnen zu können. Für die simulierten Daten werden diese Voraussetzungen erfüllt. Der Levenberg-Marquardt-Algorithmus weist zwar keine Winkelabhängigkeit auf, der Fehler ist aber um 0,02 % größer als beim Optischen Fluss.

Untersuchung einer expandierenden Düsenströmung

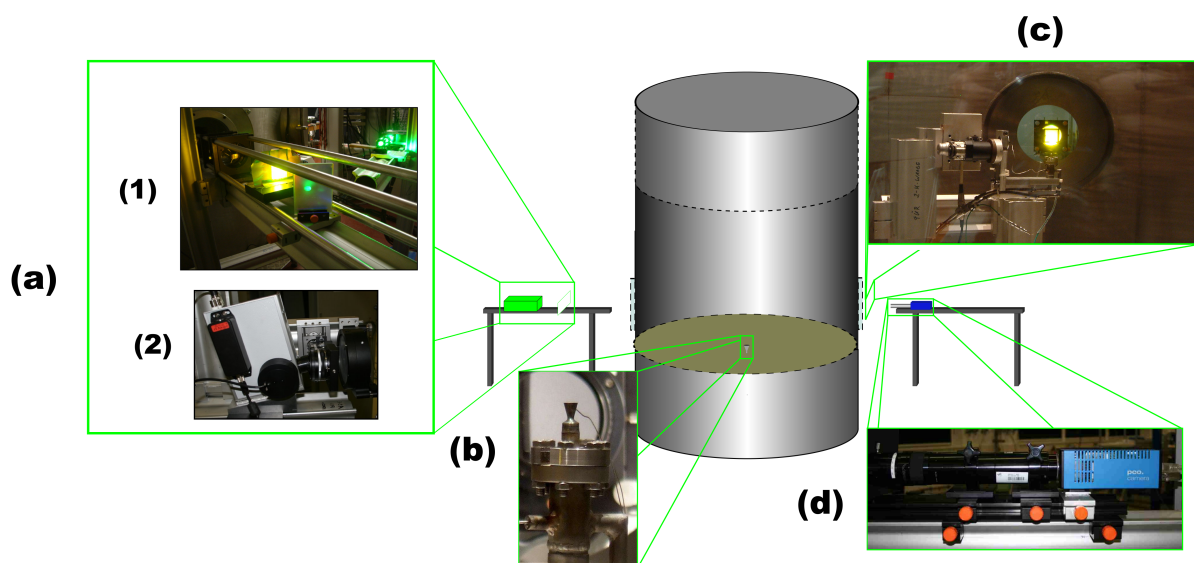


Abb. 3: Der Versuchsaufbau

Die Messungen zur Untersuchung der Mikrodüse wurden in der Kontaminationskammer Göttingen (CCG) sowie im European Space Research and Technology Centre (ESTEC-EPL, Noordwijk, Niederlande) in der Vakuumkammer Galileo durchgeführt.

In Abb. 3 ist eine Übersichtsskizze des Versuches mit dem μ BOS-Aufbau dargestellt. Auf der linken Seite (a) sind die verschiedenen Möglichkeiten zur Generierung des Hintergrundbildes abgebildet: (1) die Laserbeleuchtung mit Farbzelle und (2) ein Projektor mit einer digitalen Mikrospiegel-Baugruppe (engl. Digital Micromirror Device, DMD). Mit diesem war es möglich verschiedene Hintergrundbilder zu generieren und die mit ihnen berechneten Verschiebungsvektorfelder zu mitteln.

In der Mitte des Bildes (b) ist die Düse abgebildet (Düsenhalsdurchmesser $d^*=0,6$ mm), rechts oben (c) wird der Blick durch die Kontaminationskammer von der Digitalkamera aus gezeigt, diese ist unter (d) zusammen mit dem Distanzmikroskop abgebildet. Untersucht wurde der Ausstoß einer 0,5N-Einkomponententreibstoffschubdüse der Firma Astrium. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse von zwei Messungen vorgestellt. Bei der ersten wird das Hintergrundbild durch den Laser beleuchtet. Bei der zweiten Messung werden mit Hilfe des Projektors verschiedene Hintergrundmuster während einer Messung generiert. Die Verschiebungsvektorfelder einer Messung mit verschiedenen Hintergrundbildern werden anschließend gemittelt. Der Kammervordruck beträgt bei der ersten Messungen 10 bar und bei der zweiten 0,94 bar.

Vergleich der Auswertalgorithmen

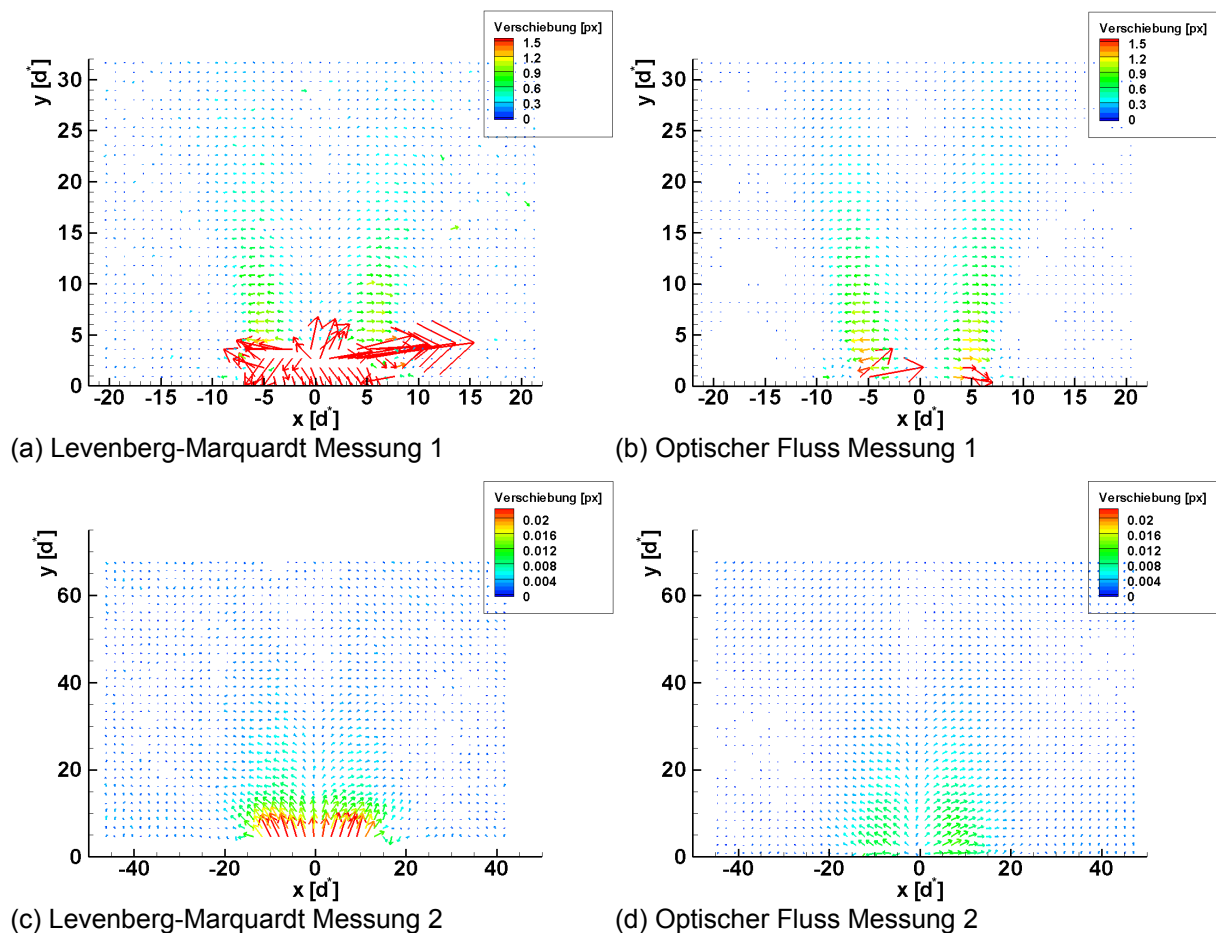


Abb. 4: Berechnete Verschiebungsfelder mit verschiedenen Algorithmen

Zum Vergleich der Auswertalgorithmen werden die Daten mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus und dem Optischen Fluss ausgewertet. In Abb. 4 sind die resultierenden Verschiebungsvektorfelder der beiden Messungen abgebildet. (a) und (b) zeigen die Ergebnisse der Messung am CCG, (c) und (d) die Ergebnisse der Messung am Galileo. Der Koordinatenursprung befindet sich in der Mitte der Düsenkante. Diese wird unscharf abgebildet, da sie nicht in der Fokusebene liegt. Dies hat Auswirkungen auf die Korrelationsfunktion: die Annahme einer Gauß-Funktion in der Umgebung des Maximums ist nicht mehr gegeben und führt zu fehlerhaft berechneten Verschiebungsvektoren. Die Auswirkungen der Düsenkante auf die Ergebnisse, welche mit dem Optischen Fluss ausgewertet wurden, sind dagegen gering.

In Abb. 5 ist die Abhängigkeit der Anzahl der Messungen gegenüber der quadratischen Abweichung

$$q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}$$

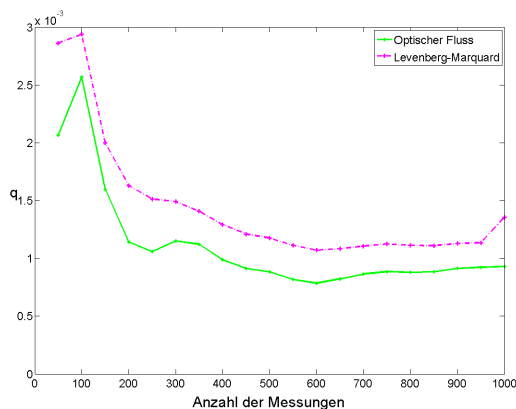


Abb. 5: Das Konvergenzverhalten der quadratischen Abweichung der 2. Messung

der zweiten Messung aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass durch die Verwendung verschiedener Hintergrundbilder die quadratische Abweichung deutlich mit der Anzahl der Messungen abnimmt. Dies Ergebnis wird durch die in Tab. 1 dargestellten quadratischen Abweichungen beider Messungen bestätigt. Die quadratischen Abweichungen der Ergebnisse des Levenberg-Marquardt-Algorithmus liegen etwas höher als bei den Ergebnissen des Optischen Flusses, außerdem ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Messungen zu erkennen. Die Mittelung über Ergebnisse, die auf Grundlage verschiedener Hintergrundbilder berechnet wurden, weisen

eine wesentlich geringere quadratischen Abweichung auf.

Tab. 1: Übersicht über die quadratischen Abweichungen vom Mittelwert $q[\text{px}]$

Levenberg-Marquardt & Multipass-Algorithmus	$q[\text{px}]$ (in Messung 1)	$q[\text{px}]$ (Messung 2)
x-Richtung	0,06052	0,00091
y-Richtung	0,05623	0,00119
Optischer Fluss	$q[\text{px}]$ (Messung 1)	$q[\text{px}]$ (Messung 2)
x-Richtung	0,03082	0,00064
y-Richtung	0,02744	0,00095

Strömungsmechanische Betrachtung der Ergebnisse

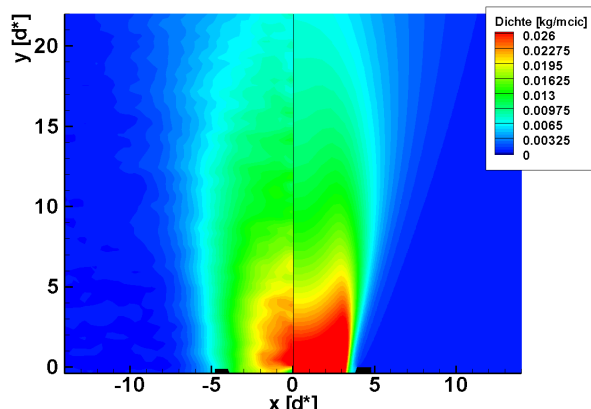


Abb. 6: Gegenüberstellung der Messergebnisse (linke Bildhälfte) mit der Simulation (rechte Bildhälfte) einer Expansionsströmung bei einem Vorkammerdruck von 5,0 bar

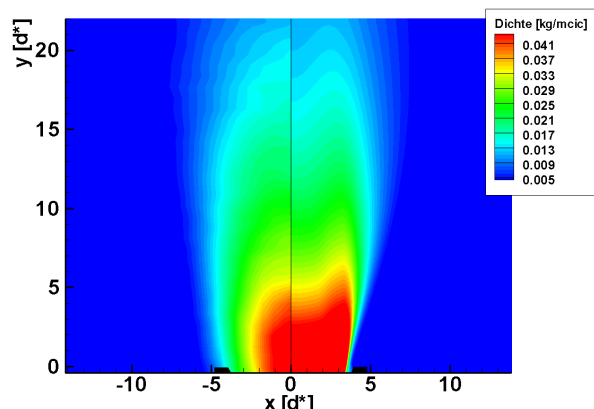


Abb. 7: Gegenüberstellung der Messergebnisse (linke Bildhälfte) mit der Simulation (rechte Bildhälfte) einer Expansionsströmung bei einem Vorkammerdruck von 10,0 bar.

Zur Rekonstruktion der dreidimensionalen Dichteverteilung wurde das Programm von Over 2007 verwendet. Bei der folgenden Darstellung der Dichteverteilungen steht nicht die Validierung des Messverfahrens im Mittelpunkt, vielmehr soll die quantitative Gegenüberstellung der Ergebnisse mit denen einer numerischen Simulation vorgestellt werden. In den Abbildungen 6 und 7 werden gemessene Dichtefelder den Ergebnissen von numerischen Simulationen gegenübergestellt. Neben dem Ergebnis aus Messung 1 des vorigen Abschnittes (Vorkammerdruck 10 bar) wurde zum Vergleich eine Messung mit einem Vorkammerdruck von 5 bar gewählt. Beide Messungen fanden am CCG statt. Die Simulation wurde von Grabe 2008 durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Geometrie der im Versuch verwendeten 0,5 N-Düse der Firma Astrium als auch die strömungsmechanischen Randbedingungen der Messung übernommen. Für die Simulation wurde ein Verfahren zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen (TAU-Code, siehe Schwamborn u. a. 2006) verwendet. Die Anwendbarkeit dieses Simulationsverfahrens lässt sich dadurch begründen, dass die Annahmen der Kontinuumsmechanik mit Ausnahme der Grenzschicht in dem betrachteten Bereich erfüllt sind. Zwischen den numerischen und den experimentellen Ergebnissen kann eine gute Übereinstimmung der Dichtewerte festgestellt werden. Die Strukturen werden in der Messung nicht so vollständig wie in der Simulation aufgelöst. Insbesondere können die durch die Expansion der Grenzschicht entstehenden Bereiche maximaler Dichte im linken und rechten Außenbereich der Strömung nicht von dem BOS-Messverfahren dargestellt werden. Diese Abweichungen der BOS-Ergebnisse von den Ergebnissen der Simulation lassen sich auf die begrenzte räumliche Auflösung zurückführen. Die Limitierung der räumlichen Auflösung ist maßgeblich in der Tatsache begründet, dass sich das Messobjekt nicht in der Fokusebene der aufnehmenden Kamera befindet. Das von einem Punkt des Hintergrundbildes ausgehende Strahlenbündel bildet einen Kegel aus, der von der Größe der verwendeten Blende abhängt. Dadurch durchläuft das Licht eines abgebildeten Punktes Bereiche verschiedener Dichte in der Objektebene. Dies führt zu einer Begrenzung der räumlichen Auflösung (siehe Over 2009).

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Anwendbarkeit der BOS-Messtechnik zur Untersuchung einer Mikrodüse im Vakuum untersucht. Zur Anpassung der Messtechnik an die entsprechenden geometrischen Abmessungen wurde der Versuchsaufbau und die Auswertalgorithmen modifiziert. Dazu wurden das Verfahren „Optischer Fluss“ zur Berechnung des Verschiebungsvektorfeldes verwendet. Anhand von synthetischen Daten wurden die Korrelationsalgorithmen aus der PIV-Messtechnik mit dem Optischen Fluss verglichen. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Optische Fluss sehr gute Ergebnisse bei der Anwendung im Bereich von Mikrodüsen erzielen kann. Anschließend wurde der Ausstoß einer 0,5 N-Einkomponententreibstoffschubdüse der Firma Astrium untersucht. Durch die Messung die bei der Auswertung der synthetischen Daten gewonnenen Erkenntnisse bestätigt werden. Außerdem konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung des optischen Flusses der Fehler bei der Berechnung des Verschiebungsvektorfeldes in der Nähe der Düsenkante reduziert wurde. Durch die Modifizierung des Versuchsaufbaus hinsichtlich der Generierung des Hintergrundbildes mit Hilfe eines Projektors konnte eine deutliche Minimierung der quadratischen Abweichung erreicht werden, da bei jeder Messung Verschiebungsvektorfelder gemittelt wurden, welche auf Grundlage verschiedener Hintergrundbilder berechnet wurden. Bei dem Vergleich mit einer numerischen Simulation konnte eine gute Übereinstimmung der Dichtewerte festgestellt werden. Die wesentliche Limitierung in der Anwendbarkeit der μ BOS-Messtechnik besteht in ihren begrenzten räumlichen Auflösungsvermögen.

Literatur

- Atcheson, B., 2008: „An evaluation of optical flow algorithms for background oriented schlieren imaging“. Experiments in Fluids, Volume 46 (2008), S. 467–476
- Gesemann, S., 2008: „Mündliche Mitteilung“, (2008)
- Grabe, M., 2008: „Numerische Simulation einer Stickstoff-Düsenströmung mit gaskinetischen und kontinuumsmechanischen Verfahren“, Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2008
- Horn, B. u. Schunck, B., 1994: „Determining optical flow: a retrospective. In: Artificial Intelligence in Perspective“, MIT Press, 1994
- Merzkirch, W., 1987: „Visualization. Academic Press“, 1987
- Miozzi, M., 2004: „Particle Image Velocimetry using Feature Tracking and Delaunay Tessellation“, International Symposia on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 2004
- Over, B., 2007: „Weiterentwicklung der C-Programmibibliothek zur tomographischen Auswertung von Dichtefeldern mit der Hintergrundsclieren-Methode“, Universität Göttingen, Bachelorarbeit
- Over, B., 2009: „Weiterentwicklung und Anwendung der BOS-Messtechnik zur Dichtebestimmung der Expansionsströmung einer Mikrodüse“, Universität Göttingen, Diplomarbeit
- Raffel, M., Willert, C., Wereley, S., Kompenhans, J., 2007: „Particle Image Velocimetry - A Practical Guide (2nd Edition)“, Springer Berlin-Heidelberg-NewYork
- Richard, H., Raffel, M., Rein, M., Kompenhans, J., Meier, GEA., 2002: „Demonstration of the applicability of a Background Oriented Schlieren (BOS) method“, Laser Techniques for Fluid Mechanics. Springer Berlin-Heidelberg-NewYork, 2002, S. 145–156
- Ronneberger, O., Raffel, M., Kompenhans, J., 1998: „Advanced evaluation algorithms for standard and dual plane particle image velocimetry“, 9th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lissabon (Portugal), 1998
- Schwamborn, D., Gerhold, T., Heinrich, R., 2006: „The DLR TAU-Code: recent applications in research and industry“, ECCOMAS CFD 2006 Convergence, 2006
- Venkatakrishnan, L., Meier, G., 2004: „Density measurements using the Background Oriented Schlieren technique“, Experiments in Fluids Volume 37 (2004), S. 237–247