

Untersuchung der Tröpfchengeschwindigkeit in einem Sprühstrahl mittels High-Speed PIV bei 10 kHz

M. Khula, G. Ohmstede, W. Hentschel

Volkswagen AG, Forschung und Entwicklung, Wolfsburg

Kurzfassung

Der Beitrag berichtet über den Einsatz der zeitlich hochaufgelösten PIV-Methode zur Bestimmung der Tröpfchengeschwindigkeit in einem Sprühstrahl. Mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera wurden Bildaufnahmen des Einspritzvorgangs im Einzeltakt bei 10 kHz Bildfrequenz in Form einer Zeitreihe aufgenommen und auf deren Auswertbarkeit hin überprüft. Dabei wurde festgestellt, dass es durch die Gegebenheiten des Sprays einige Bereiche in der Strömung gibt, in denen die Kreuzkorrelation keinen belastbaren Verschiebungsvektor liefern kann. Dies ist grundsätzlich auf die inhomogene Tröpfchenverteilung und deren Größenvariation zurückzuführen. Die ausgewerteten Strömungsgeschwindigkeiten liegen im Bereich zwischen 10 und 35 m/s. Für die Bestimmung des mittleren Geschwindigkeitsfeldes wurden zwei Mittlungsstrategien eingesetzt und deren Ergebnisse miteinander verglichen. Dabei hat die Sum-of-Correlation Methode eine um ca. 4 m/s höhere mittlere Strömungsgeschwindigkeit geliefert als die statistische Mittlung über die Vektorfelder.

Einleitung und Zielsetzung

Die Theorie der Particle Image Velocimetry (PIV) erwartet eine möglichst homogene Verteilung von gleich lichtstreuenden Seeding-Partikeln in der zu untersuchenden Strömung. In der technischen Praxis können aber Fälle auftreten, bei denen diese Anforderung nur bedingt oder gar nicht erfüllt werden kann. Zu dieser Gruppe von Anwendungen gehört auch die Bestimmung der Tröpfchengeschwindigkeit in instationären Sprühstrahlen mittels PIV. Die Zielsetzung dieser Untersuchung war daher, die Durchführbarkeit einer Geschwindigkeitsbestimmung an den Einzeltröpfchen eines Sprays zu überprüfen, eventuelle Auswertungsstrategien anzuwenden und deren Ergebnisse zu vergleichen. Dabei sollten die vom Injektor zerstäubten Flüssigkeitströpfchen als Seeding-Partikel verwendet werden. Da für die Untersuchung ein Injektor im getakteten Betrieb mit kurzer Einspritzdauer eingesetzt wurde und die einzelnen Einspritzungen voneinander abweichen könnten, wurde die Geschwindigkeitsbestimmung im einzelnen Sprühvorgang angestrebt. Aus der Tatsache, dass die Kamera und der Laser nur mit einem konstanten zeitlichen Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Aufnahmen (bzw. Pulse) betrieben werden konnten, ergab sich die hohe Aufnahmefrequenz aus dem zu erwartenden Geschwindigkeitsniveau und der Anforderung von PIV an die maximale Pixelverschiebung in der Größe eines Viertels des Auswertefensters. Dank den – im Vergleich zum herkömmlichen Seeding – großen Tröpfchen im Spray war nach der Streulichttheorie eine intensive Lichtstreuung zu erwarten [1], was trotz der niedrigen Pulsenergie des Lasers (hohe Repetitionsrate) und einem relativ dicken Lichtschnitt, lichtstarke Aufnahmen erlaubte.

17.2

Messaufbau und Versuch

Bei der Untersuchung wurde ein Messaufbau verwendet wie er in der Abbildung 1 dargestellt ist. Für die Bildaufnahmen wurde eine Phantom 7.0 (*Vision Research*) CMOS-Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt, die bei der Aufnahmefrequenz von 10 kHz eine ausreichend große Bildauflösung von 304 x 600 Pixel ermöglicht. Die Abbildung erfolgte mit Hilfe eines Nikkor 35 mm Objektivs, an dem die Blendenzahl 4 eingestellt wurde. Als Lichtquelle diente ein gepulster Nd:YLF-Hochgeschwindigkeits Laser (*Positive Light, Evolution 30*) mit einer Wellenlänge von 527 nm. Die Pulsenergie betrug etwa 2 mJ bei einer Pulsbreite von ca. 200 ns. Es wurde ein relativ breiter Lichtschnitt von 10 mm gewählt, um die sich frei bewegenden Tröpfchen in dem Messfeld möglichst lange beobachten zu können.

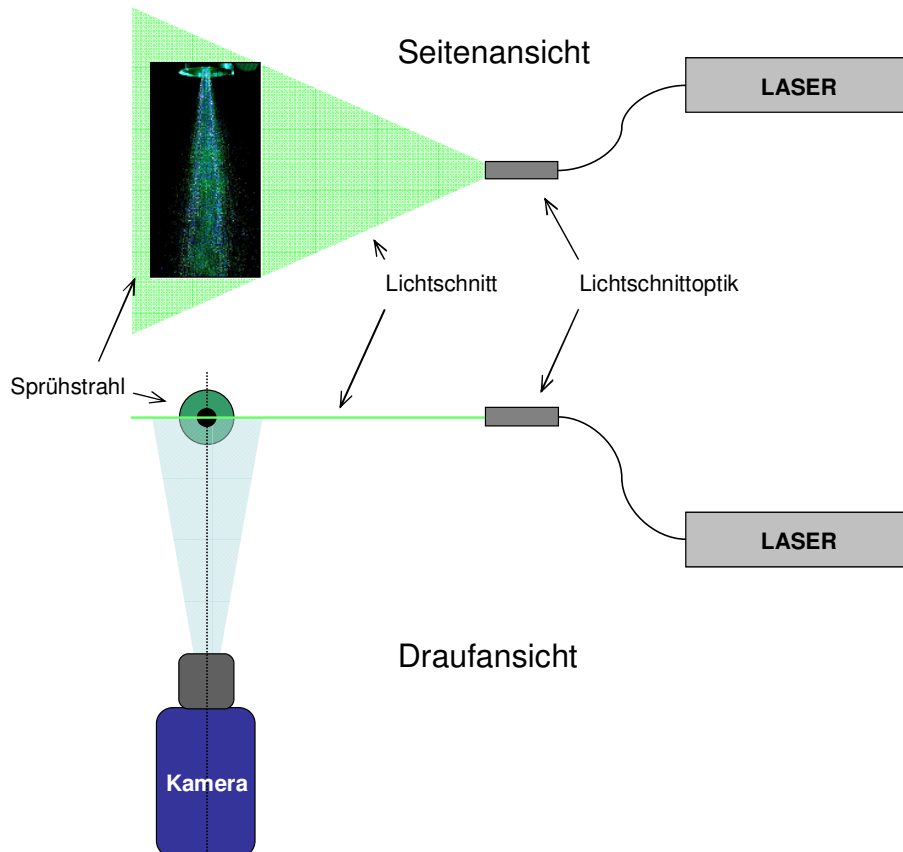


Abb. 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus

Die Messungen wurden an einem vertikalen Sprühstrahl durchgeführt, der durch einen Niederdruckinjektor mit drei Öffnungen erzeugt wurde. Eingespritzt wurde im getakteten Betrieb eine wasserähnliche Flüssigkeit bei einer Einspritzdauer von 40 ms und 5 bar Einspritzdruck unter Normalbedingungen in die Umgebungsluft.

Messung und Auswertung

Bei der Messung wurden für mehrere aufeinander folgende Einspritzungen Einzelbilder des gesamten Sprühvorgangs als Zeitserie aufgenommen. Abbildung 2 illustriert drei typische Fortschrittsphasen des Vorgangs: links ist ein Beispiel für den Anfang der Einspritzung, das Bild in der Mitte zeigt den voll ausgebildeten Strahl, rechts wird das Sprühende dargestellt. In den gespeicherten Partikelbildern ist eine inhomogene Verteilung der Flüssigkeitströpfchen deutlich zu erkennen. Dabei zeichnen sich die Tröpfchenabbildungen durch unterschiedliche Größe und damit verbundene Lichtstärke aus, was für die Anwendung des PIV-Auswertungs-

verfahrens ungünstig sein kann [2]. Die Sprayaufnahmen zeigen zwei seitlich angeordnete Strahlkeule, die aus den größeren Tröpfchen mit höherem Impuls bestehen; daher wird in diesen Bereichen die höchste Strömungsgeschwindigkeit vermutet.

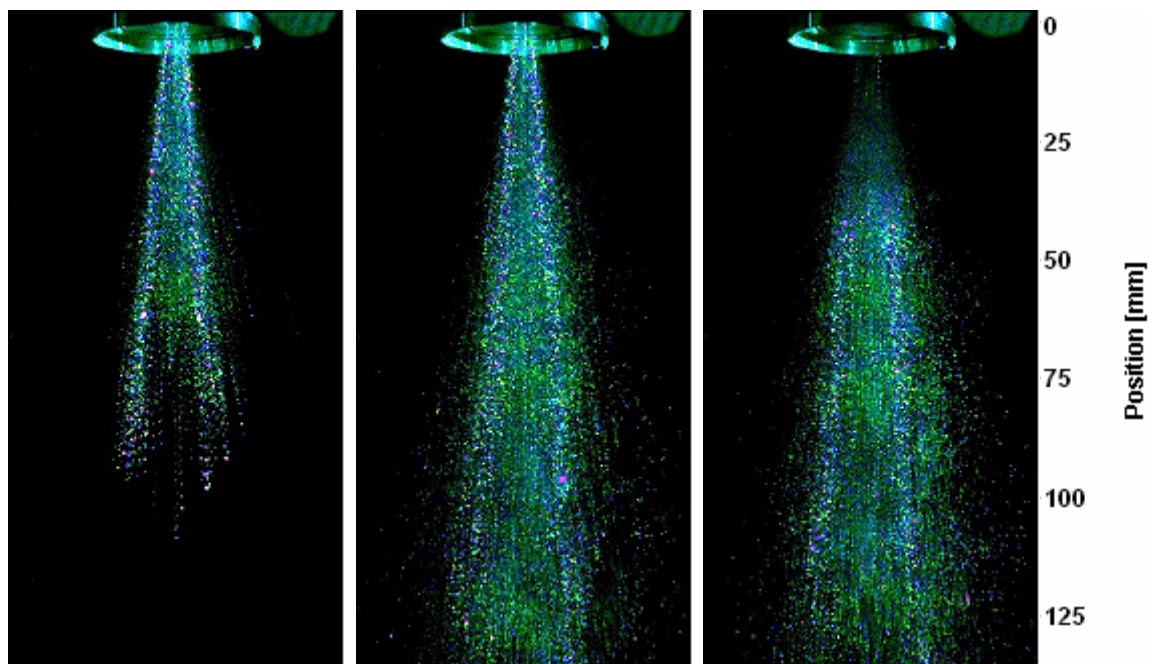


Abb. 2: Aufnahmen der Einspritzung mit 10 kHz

Die Auswertung der Geschwindigkeitsfelder aus der gespeicherten Bild-Zeitserie erfolgte mit dem in DaVis 7.1 (*LaVision GmbH*) implementierten PIV-Algorithmus. Für die Berechnung der Vektorfelder wurde die Standardkreuzkorrelation mit der Multi-Pass Funktion angewendet, bei der die Rastergröße von 16x16 Pixel mit 25% Überlappung im ersten Durchlauf auf 12x12 Pixel für weitere Abläufe verfeinert wurde. Die Postprocessing-Einstellungen sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Validierung des Korrelationspeaks	Vektor löschen wenn $Q < 1,3$
Median Filter	Differenz zu Mittelwert $> 2 \cdot \text{RMS}$ der benachbarten Vektoren
Vektorgruppen entfernen & ersetzen	wenn < 5
Leerstellen auffüllen	ja
Glättung	1 x glätten 3x3
Maskierung einzelnen Bereiche	ja

Preprocessing-Funktionen wurde nicht angewendet, da die Methoden wie Subtraktion eines gleitenden Hintergrunds oder Particle-Intensity-Normalisation das Ergebnis nicht verbessern konnten.

Die berechneten Geschwindigkeitsfelder zeichnen sich durch starke Schwankungen aus. Dies wird deutlich erkennbar im Vergleich der benachbarten Zeitschritte, in denen die überwiegend stationäre Strömung für diese Veränderung nicht verantwortlich sein dürfte (Abb. 3).

17.4

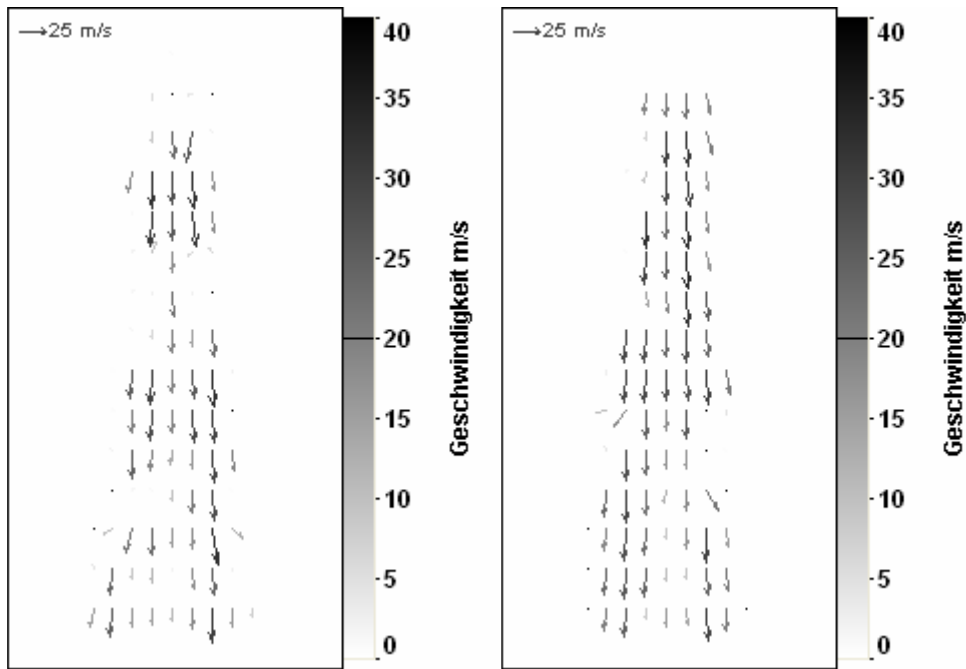


Abb. 3: Schwankungen des berechneten Vektorfeldes – ausgewertete Aufnahmen mit einem Zeitabstand von 1 ms

Die Ursache der Abweichungen kann auf die Ungleichmäßigkeit der Tröpfchenverteilung und dadurch bedingte Schwierigkeiten bei der Korrelationspeakbestimmung zurückgeführt werden. Der Einfluss der Tröpfchenverteilung auf die Eindeutigkeit der Korrelationspeaksbestimmung ist in der Abbildung 4 dargestellt.

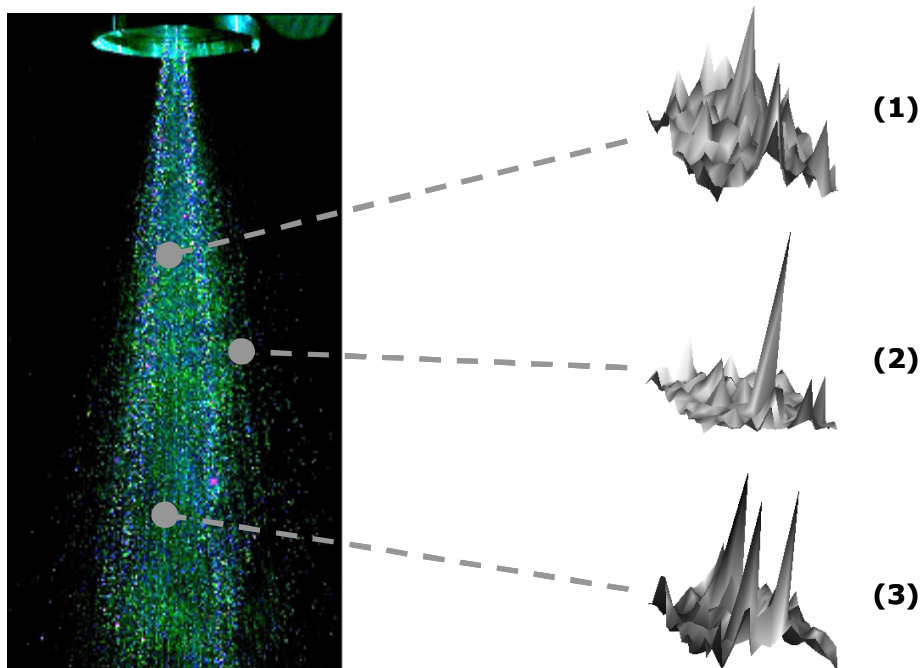


Abb. 4: Abhängigkeit der Korrelationsqualität von der Tröpfchenverteilung

In dem Spray kann man abhängig von der Anzahl und Größe der Tröpfchen Stellen finden, an denen kein eindeutiger Korrelationspeak berechnet werden kann (Abb. 4, (1) und (3)), was letztendlich zur Verfälschung des örtlichen Geschwindigkeitsvektors führt.

Für die Berechnung des mittleren Geschwindigkeitszustandes wurden zwei Auswertungsstrategien eingesetzt – beim ersten Verfahren wurden die Einzelbilder (Paare aufeinanderfolgenden Bilder der Zeitserie) ausgewertet um anschließend über die Vektorfelder zu mitteln (Averaging – AVG), die andere Strategie beruhte auf der Mittlung von Korrelationsfelder und der Berechnung des daraus resultierenden mittleren Geschwindigkeitszustands (Sum-of-Correlation – SOC). Für die Berechnung wurden 260 Bilder herangezogen, bei denen das Spray vollständig ausgebildet war und die Einspritzung daher einer quasistationären Strömung entsprach. Bei der Sum-of-Correlation Methode werden aus den Einzelbildpaaren der Zeitserie zuerst die Correlation Maps erstellt [3]:

(für eine Correlation Map der Größe $n \times n$, Bild i mit Koordinaten x_0, y_0)

$$C_i(x_0, y_0) = I_1(t_1, x_0, y_0) \otimes I_2(t_2, x_0, y_0),$$

die anschließend aufsummiert werden:

$$C_{avg}(x_0, y_0) = \sum C_i(x_0, y_0)$$

Aus der Summe wird dann der Verschiebungsvektor berechnet, der letztendlich den Geschwindigkeitsvektor ergibt:

$$V_{avg}(x_0, y_0) = \text{Position des höchsten Peaks in } C_{avg}(x_0, y_0)$$

Mit diesem Verfahren kann die Verfälschung des mittleren Geschwindigkeitsniveaus durch Mittlung über „falsche“ Vektoren der einzelnen Vektorfelder verhindert werden. Diese Methode wird häufig eingesetzt bei Aufnahmen mit geringer Anzahl der Seedingpartikel im Messbild, niedrigem Signal/Rausch Verhältnis, schlechtem Bildkontrast oder bei starker Out-of-Plane Geschwindigkeitskomponente. Die Einsetzbarkeit ist auf stationäre Strömungen eingeschränkt, bei denen die Aussage über den mittleren Geschwindigkeitszustand ausreichend ist. Die Mittlung über die Correlation Maps sollte nicht verwendet werden, wenn es sich um eine instationäre bzw. turbulente Strömung handelt oder es möglich ist, mit Hilfe der statistischen Mittlung eine ausreichende Genauigkeit des Ergebnisses zu erzielen [4].

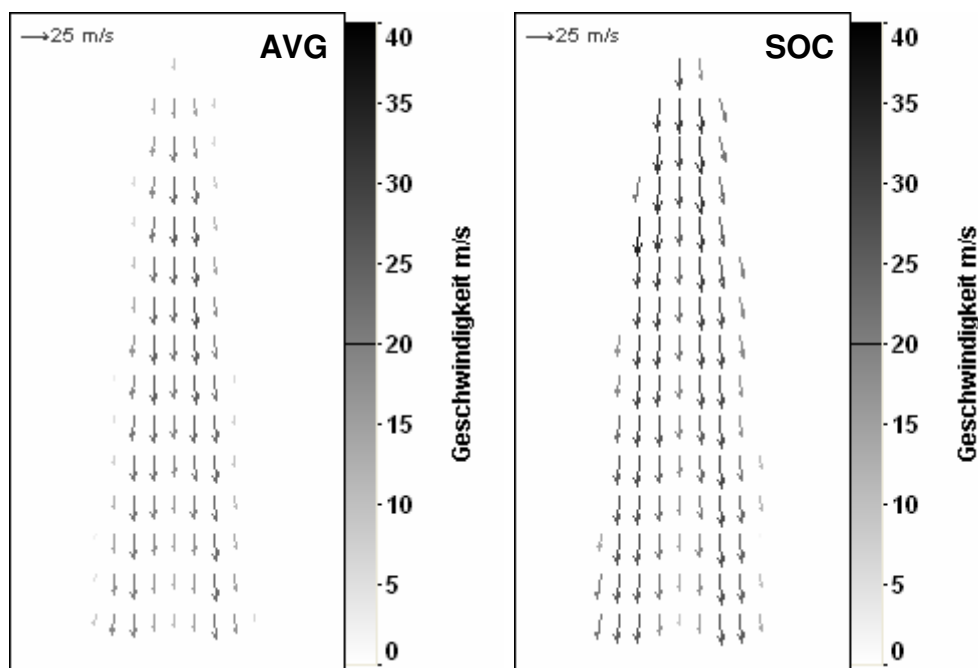


Abb. 5: Vergleich des mittleren Geschwindigkeitszustandes, links das Ergebnis der statistischen Mittlung über Vektorfelder, rechts das mit der Sum-of-Correlation Methode berechnete Vektorfeld

17.6

Der Vergleich der zwei Auswertestrategien (Abb. 5) zeigt deutliche Unterschiede in der Form des Geschwindigkeitsfeldes sowie auch in den absolut erreichten Geschwindigkeiten. Das durch Mittlung über Vektorfelder ermittelte Geschwindigkeitsniveau erreicht Werte von 9,5 bis 27 m/s, bei der Sum-of-Correlation Methode sind es 11 bis 35 m/s. Um die unterschiedlichen Ergebnisse der zwei Auswerteverfahren genauer bewerten zu können, wurden Geschwindigkeitsprofile aus beiden Vektorfeldern erzeugt und verglichen. Die Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der Geschwindigkeitsprofile in 120 mm Entfernung von dem Injektoraustritt. Aus der direkten Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsprofile ist deutlich zu erkennen, dass die Sum-of-Correlation Methode ein um ca. 11 Prozent breiteres Vektorfeld liefert. Dazu übertrifft dieses das durch die statistische Mittlung erzeugte Geschwindigkeitsniveau um 3 bis 5 m/s. Dies ist auf die Art der Mittlung zu führen, wobei die sporadisch auftretenden Vektoren am Rand des Sprays einen höheren Beitrag zum Mittelbild leisten als bei der Mittlung über die Vektorfelder.

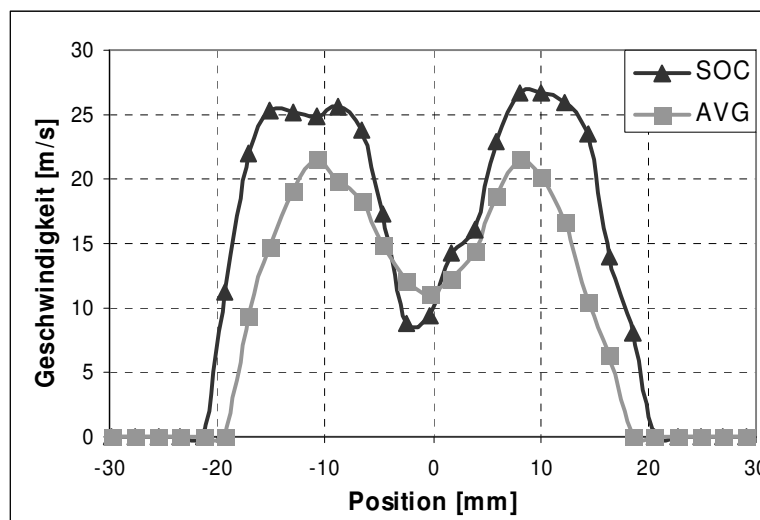


Abb. 6: Vergleich der Geschwindigkeitskomponente in Ausbreitungsrichtung

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Auswertung der Tröpfchengeschwindigkeit mittels PIV an einem Sprühstrahl durchführbar ist. Die Auswahl der geeigneten Mittlungsstrategie spielt bei dieser spezifischen Anwendung eine wichtige Rolle und beeinflusst wesentlich das Endergebnis. Für Geschwindigkeitsbestimmung an Sprühstrahlen dieser Art scheint die Sum-of-Correlation Methode sinnvollere Ergebnisse zu liefern als die Mittlung über Vektorfelder. Für zukünftige Untersuchungen wird ein Vergleich der Ergebnisse mit denen der Particle-Tracking-Methode unter dem Einsatz eines dünneren Lichtschnitts empfohlen.

Literatur

- [1] Adrian, R.J.: Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs particle image velocimetry; Appl. Optics 23, 1984, pp. 1690-91
- [2] Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J.: Particle image velocimetry: A practical Guide; Berlin, Heidelberg; Springer 1998, pp. 13-22
- [3] Meinhart, C.D., Wereley, S.T., Santiago, J.G.: A PIV Algorithm For Estimating Time-Averaged Velocity Fields; Proceedings of Optical Methods and Image Processing in Fluid Flow, 3rd ASME/JSME Fluids Engineering Conference, San Francisco 1999.
- [4] LaVision GmbH: DaVis Flow Master Software Manual for DaVis 7.1; Göttingen 2005, pp. 139-142