

Einflussfaktoren auf PIV Auswertungen mit Single Pixel Ensemble Correlation

Factors influencing Single Pixel Ensemble Correlation PIV analyses

Claudia Strobl, Daniel Quosdorf und Michael Manhart

Fachgebiet Hydromechanik, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München

PIV, turbulente Strömungen, Verteilungsfunktion der Geschwindigkeiten
Particle Image Velocimetry, turbulent flows, velocity probability density

Zusammenfassung

Mit Hilfe der Single Pixel Ensemble Korrelation ist es möglich, PIV Daten in hoher räumlicher Auflösung auszuwerten. Diese Auswertung hängt stark von der Qualität des verwendeten Datensatzes ab, insbesondere von der Partikeldichte und -größe und der allgemeinen Bildqualität. An einem Datensatz einer Strömung über periodisch angeordnete Hügel mit hohem Rauschanteil und geringer Partikeldichte wird dargestellt, wie die Auswertung der Korrelationsfunktionen, durch das Freistellen der Korrelationsspitze, verbessert werden kann um mit Standard-PIV vergleichbare jedoch feiner aufgelöste Ergebnisse zu erzielen.

Einleitung

Single Pixel Ensemble Korrelation ist eine Möglichkeit die räumliche Auflösung von PIV Daten zu verbessern vgl. Cierpka et. al. (2013), Kähler et. al. (2006), Westerweel et. al. (2004). Auf Grund der Mittelung über alle Zeitschritte können mit dieser Methode jedoch nur zeitliche Mittelwerte bestimmt werden. In der Vergangenheit wurden daher verschiedene Methoden entwickelt, die in der Korrelationsfunktion enthaltene Wahrscheinlichkeitsdichte Funktion (PDF) der Geschwindigkeit zu rekonstruieren vgl. Scharnowski et. al. (2011), Strobl und Manhart (2013) und Scharnowski und Kähler (2013), um diese bezüglich ihrer höheren Momente auswerten zu können. Die rekonstruierten PDFs sind stark von der Partikelgröße und -dichte, der Anzahl der verwendeten Bildpaare sowie der Bildqualität selbst abhängig, s. Scharnowski und Kähler (2013). Der von uns ausgewertete Datensatz einer Strömung über periodisch angeordnete Hügel, stellt daher auf Grund seiner geringen Partikeldichte und dem hohen Rauschniveau, vgl. Abb. 1 und Abb. 3a, eine Herausforderung an diese Auswertemethode dar.

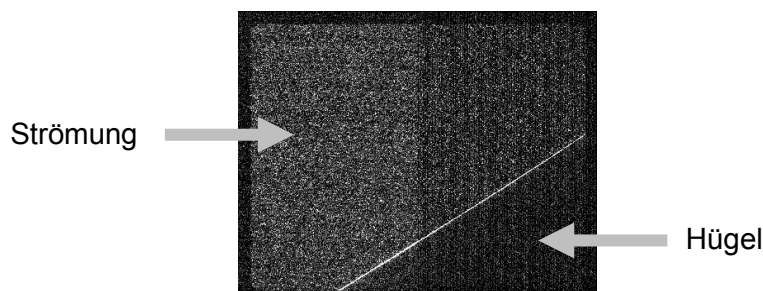


Abb. 1 Originalbild mit hohem Rauschanteil, Intensitätsunterschied zwischen linker und rechter Bildhälfte sowie starke Reflexionen an der Hügelwand

Beschreibung der Strömungssituation

Der Datensatz wurde an Luvseite des achten Hügels einer periodischen Reihe von zehn Hügeln aufgenommen. Als Fluid wurde Wasser verwendet. Über die Höhe des Hügels ($h=5\text{cm}$) und den Abstand der Hügel zueinander ($d=9h$), kann die dimensionslose Messposition mit $x/h=8$ angegeben werden (vgl. Abb. 2). Weitere Details zum Aufbau des Experiments finden sich bei Rapp und Manhart (2011). Die Reynoldszahl wurde zu 37 000 ermittelt.

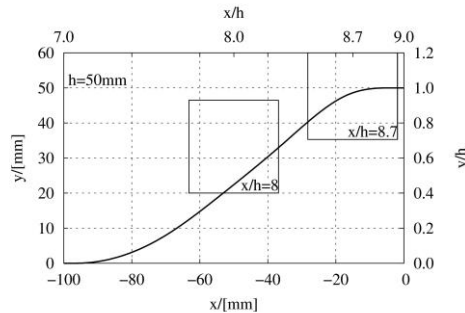
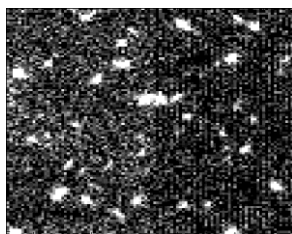


Abb. 2 Messposition bei $x/h=8$ auf der Luvseite des Hügels

Eigenschaften des verwendeten Datensatzes

Der verwendete Datensatz besteht aus 10 000 Doppelbildern mit einer räumlichen Auflösung von $13\ \mu\text{m}$ / Pixel, aufgenommen in einem Wasserkanal. Als Partikel wurden Rhodamin-B beschichtete Partikel ($d_p=1-20\ \mu\text{m}$) verwendet. Die aus den Aufnahmen bestimmte Partikeldichte liegt bei 0,25 Prozent. Die Aufnahmen sind aufgrund der hohen Vergrößerung stark verrauscht (Abb. 3a). Zudem besteht ein deutlicher Intensitätsunterschied zwischen der linken und der rechten Bildhälfte (vgl. Abb. 1 und Abb. 3a) sowie im Bildpaar selbst zwischen den zu korrelierenden Bildern A und B. Die Partikeldichte, als auch die Laserleistung nehmen über die Zeitreihe hinweg ab, was zudem zu einer Abnahme der mittleren Intensität über die Zeit führt.



(a) Originalbild

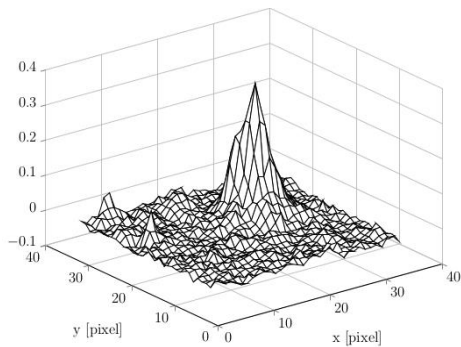


(b) Nachbearbeitetes Bild

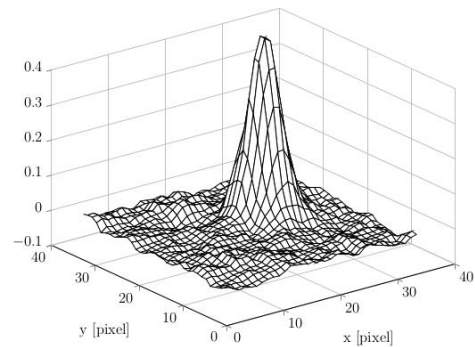
Abb. 3 Vergleich eines Ausschnitts von 100×100 Pixel in der Bildmitte

Einfluss der Ausgangsdaten auf die Korrelationsfunktion

Aus diesen Eigenschaften resultieren fehlerhafte Anteile an den über die Zeitreihe gemittelten Korrelationsfunktionen, vgl. Abb. 4a. Die Funktion erscheint rau und fällt bei genauer Betrachtung an den Rändern nicht, wie erwartet, zu Null ab. In der Auswertung führt dies zu großen Schwankungsbreiten und einer Unterschätzung der Geschwindigkeit (vgl. Abb. 7a).



(a) Korrelationsfunktion aus Originalbildern



(b) Korrelationsfunktion aus nachbearbeiteten Bildern

Abb. 4 Vergleich der Form der über die Zeitreihe gemittelten Korrelationsfunktion für Original- und nachbearbeitete Bilder

Verbesserung der Auswertung

In einem ersten Schritt wurde mittels Bildnachbearbeitung sowohl der Rauschanteil, als auch der Intensitätsunterschied zwischen den Bildhälften deutlich verringert, vgl. Abb. 3a und 3b, was zu einer Glättung der Korrelationsfunktionen führte, s. Abb. 4b. So konnte das Rauschen in den Randbereichen stark reduziert werden.

Betrachtet man jedoch einen Längsschnitt durch die Korrelationsfunktionen der nachbearbeiteten Bilder, so ist zu erkennen, dass das noch vorhandene Rauschen größtenteils positive Anteile besitzt, vgl. Abb. 5. Dies führt bei der Auswertung weiterhin zu einer Unterschätzung der Geschwindigkeit, da die Korrelationsspitze nicht in der Mitte der Korrelationsebene liegt (vgl. Abb. 7b).

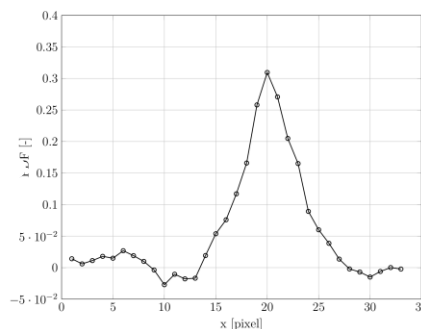


Abb. 5 Längsschnitt durch die Korrelationsspitze zur Verdeutlichung des überwiegend positiven Rauschanteils

Um diese Unterschätzung der Geschwindigkeit zu verhindern, muss der Rauschanteil bei der Auswertung der Korrelationsfunktion ausgeschlossen werden. Um eine allgemeine Anwendung zu ermöglichen, wird mit Hilfe der Methode von Otsu (1979) für jede Korrelationsfunktion ein Schwellenwert bestimmt und diese unter Berücksichtigung des Schwellenwertes in das Binärformat übertragen (vgl. Abb. 6b). Anschließend werden alle kleinen Objekte entfernt, so dass eine Binärmatrix der auszuwertenden Korrelationsfunktion zurückbleibt (vgl. Abb. 6c). Über die Multiplikation dieser Matrix mit der Korrelationsfunktion wird jene im letzten Schritt unabhängig ihrer Form vom Rauschanteil freigestellt (vgl. Abb. 6d) und kann nun ohne fehlerhafte Anteile ausgewertet werden.

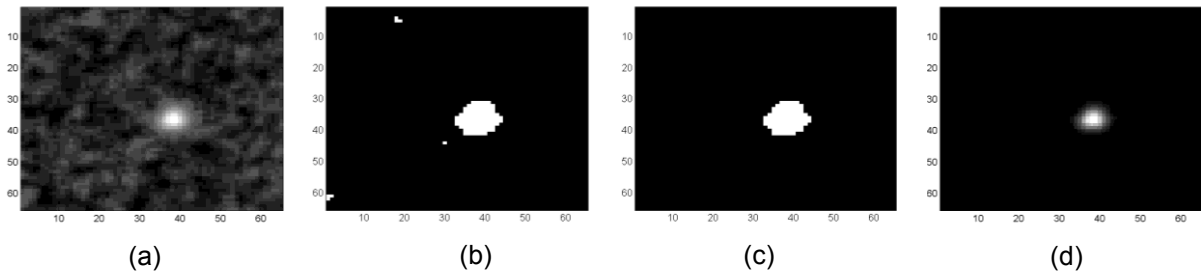


Abb. 6 Bearbeitungsschritte von der normierten Korrelationsfunktion (a) über deren Binärform (b), (c) zur freigestellten Korrelationsspitze in (d).

Ergebnisse

In Abb. 7 werden die mit Hilfe der Single Pixel PIV ermittelten Verschiebungen in horizontaler Richtung mit Standard PIV verglichen. In der Standard-PIV wurden Abtastflecken einer Größe von 32x32 Pixel und 50% Überlappung verwendet. Für die Single Pixel PIV wurden Verschiebungen aus den Originalbildern (a) und aus den nachbearbeiteten Bildern (b) berechnet, jeweils mit und ohne Freistellung der Korrelationsfunktion. Es wird jeweils nur ein Teilbereich des Gesamtprofils dargestellt. Die Geschwindigkeiten aus Single Pixel PIV zeigen starke Schwankungen von Pixel zu Pixel während diejenigen aus der Standard PIV wesentlich glatter verlaufen (durchgezogene Linie). Dies ist zunächst durch die größere Anzahl der für die Mittelung verwendeten Einzelpartikel zu erklären, da jeder instantane Geschwindigkeitswert der Standard PIV aus 32x32 Pixeln gemittelt wird. Allerdings ist deutlich zu erkennen, dass bei Verwendung der unbearbeiteten Originalbilder in den Single Pixel Geschwindigkeiten sehr große Schwankungsbreiten auftreten und ein Bias zu negative Geschwindigkeiten sichtbar wird (Abb. 7a). Dieser Bias kann nicht durch Verbesserung der Statistik verringert werden. Als Grund für diesen Bias konnte die Tatsache identifiziert werden, dass die Korrelationsfunktionen nicht auf Null abklingen. Falls das Korrelationsmaximum nicht im Zentrum des Korrelationsfensters liegt, ergibt sich bei der Integration über die Korrelationsfunktion eine systematische Verschiebung des Mittelwerts. Durch Nachbearbeitung der Bilder (Abb. 7b) verkleinert sich die Schwankungsbreite von Pixel zu Pixel, der Bias bleibt jedoch bestehen. Durch Freistellen der Korrelationsspitze kann der Bias sowohl bei Verwendung der Originalbilder als auch bei Verwendung der nachbearbeiteten Bilder eliminiert werden (gefüllte Symbole in Abb. 7a und 7b).

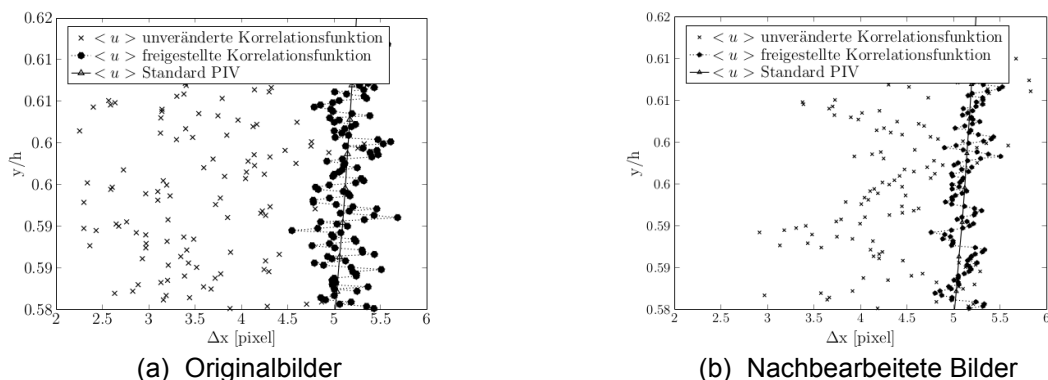


Abb. 7: Vergleich der horizontalen Geschwindigkeitskomponente aus Single Pixel und Standard PIV in einem Teilausschnitt. Verwendung der Originalbilder (a) und der nachbearbeiteten Bilder (b). Geschwindigkeiten aus der freigestellten Korrelationsfunktion weisen jeweils deutlich kleinere Schwankungen auf.

Betrachtet man in Abb. 8 die Gesamtprofile der Verschiebungen in horizontaler und vertikaler Richtung im Vergleich zur Standardauswertung mit 32x32 Pixel Abtastflecken, so ist zu erkennen, dass die Schwankungsbreite in der freien Strömung maximal 1 Pixel beträgt und im Wandbereich annähernd deckungsgleich ist. Insbesondere im Bereich der freien Strömung könnte die Schwankungsbreite z.B. durch Plausibilitätsprüfung im Vergleich mit Nachbarwerten noch verkleinert werden.

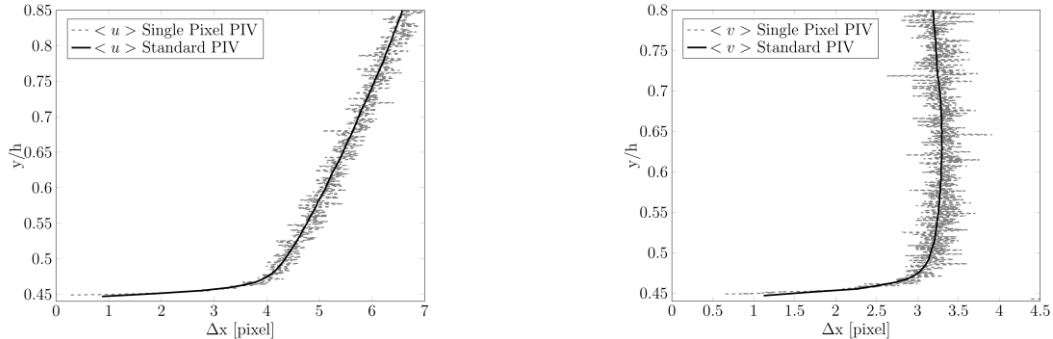


Abb. 8: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile in horizontaler und vertikaler Richtung

Betrachtet man den Bereich nahe der Wand im Detail, so ist die deutlich höhere Auflösung im Vergleich zur Standardauswertung sowie die Linearität des Profils nahe der Wand zu erkennen (Abb. 9).

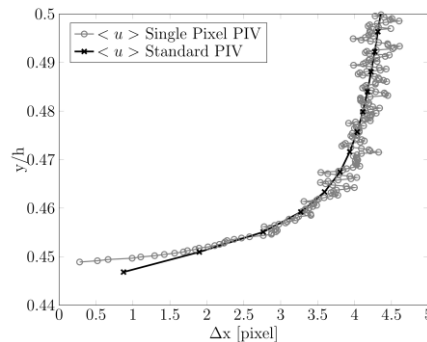


Abb. 9: Vergrößerte Darstellung des horizontalen Geschwindigkeitsprofils im Bereich der Wand

Dies ist insbesondere für die Bestimmung der Wandschubspannung aus dem Gradienten der Geschwindigkeit von Bedeutung. Bestimmt man die Wandschubspannung durch das Einpassen einer Geraden in den linearen Bereich von fünf benachbarten Geschwindigkeitsprofilen entlang der Wand, so ergibt sich in einem Bereich von 0,26mm um den Messpunkt bei $x/h=8$ eine mittlere Wandschubspannung von 0.6138 N/m^2 mit einer Standardabweichung von 0.0343 N/m^2 . In Abbildung 10 sind die wandparallele Geschwindigkeitskomponente für das Profil $x/h=8$ und der beiden oberstromigen und unterstromigen Nachbarn, sowie der eingepasste Gradient dargestellt. Im Vergleich mit dem ebenfalls abgebildeten Standard PIV Ergebnis wird die feinere Auflösung, sowie die Vielzahl an Messpunkten im wandnahen Bereich erneut deutlich. Neben der Wandschubspannung lässt sich mit diesem Verfahren über den Nullpunkt der eingepassten Geraden auch die Position der Wand bestimmen. Diese liegt an der Stelle $x/h=8$ rund 7.69 Pixel unterhalb der Oberkante der Reflexionen. Sie liegt folglich auf der dem Hügel zugewandten Seite der Reflexion.

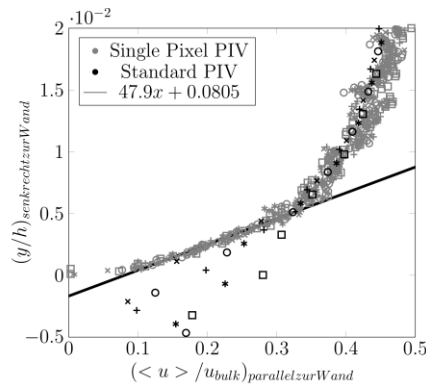


Abb. 10: Beispielhafte Darstellung für das Fitten einer Geraden in die Messwerte der vier benachbarten Pixel um $x/h=8$. Im Vergleich dazu die wandparallele Geschwindigkeit bei $x/h=8$, sowie der vier angrenzenden Standard PIV Profile.

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Ergebnisse der Single Pixel Ensemble Korrelations Auswertung deutlich vom Abfall der Korrelationsfunktion außerhalb der Korrelationspitze abhängen. Für stark verrauschte Bilder mit geringer Partikeldichte konnten wir zeigen, dass eine Glättung der Korrelationsfunktion durch Bildverbesserung weder die Schwankungsbreite noch die Unterschätzung der Geschwindigkeit zufriedenstellend reduziert. Eine Freistellung der Korrelationsspitze hingegen führte zu einer deutlichen Verkleinerung der Schwankungsbreite und zu, im Vergleich mit der Standard PIV Auswertung, plausiblen Ergebnissen. Auf diese Weise können die Geschwindigkeitsprofile im wandnahen Bereich ausgewertet werden und sowohl die Wandschubspannung als auch die Dicke der viskosen Schicht ermittelt werden. In einem nächsten Schritt sollen nun die Reynold'schen Spannungen ausgewertet werden, um die Wechselwirkung der inneren mit der äußeren Schicht zu analysieren

Literatur

- Cierpka, C., Scharnowski, S., Manhart, M. und Kähler, C.J., 2013: "On the significance of high spatial resolution to capture all relevant scales in the turbulent flow over periodic hills" In 10th International Symposium on Particle Image Velocimetry - PIV13, Delft, The Netherlands, July 1-3, 2013
- Kähler, C. J., Scholz, U. und Ortmanns, J., 2006: "Wall-shear-stress and near-wall turbulence measurements up to single pixel resolution by means of long-distance micro-piv" Experiments in Fluids, Vol. 41, No. 2, pp. 327-341
- Otsu, N., 1979: "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 9, No. 1, pp. 62-66.
- Rapp, C., Manhart, M., 2011: „Flow over periodic hills: an experimental study“, Experiments in Fluids, Vol. 51, pp. 247-269
- Scharnowski, S. und Kähler, C.J., 2013: "Methods for estimating higher order moments from piv data" In 10th International Symposium on Particle Image Velocimetry - PIV13, Delft, The Netherlands, July 1-3, 2013
- Scharnowski, S., Hain, R. und Kähler, C.J., 2011: "Reynolds stress estimation up to single-pixel resolution using piv-measurements", Experiments in Fluids, Vol. 52, No. 4, pp. 985-1002
- Strobl, C. and Manhart, M., 2013: "Reconstructing the velocity distribution from single pixel correlation piv". In M. Costa P. J. Coelho, editor, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 16-20 June 2013, Lisboa, Portugal
- Westerweel, J., Geelhood, P. F. und Lindken, R., 2004: "Single-pixel resolution ensemble correlation for micro-piv applications" Experiments in Fluids, Vol. 37, No. 3, pp. 375-384