

## PIV Contest — Vergleichende Tests für PIV-Algorithmen

### PIV Contest — Competitive Tests for PIV Algorithms

#### H. Nobach

Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Am Faßberg 17, 37077 Göttingen

PIV, Genauigkeit, Auflösung, Vergleich

PIV, accuracy, resolution, contest

#### Zusammenfassung

Die PIV Challenges [1, 2, 3] der Jahre 2001, 2003 und 2005 stellten verschiedene Herausforderungen an die teilnehmenden PIV-Algorithmen und deren Entwicklerteams. Die vergleichenden Tests ermittelten unter einheitlichen Testbedingungen die Leistungsfähigkeit vieler verschiedener Algorithmen und boten so die Möglichkeit, die Algorithmen zu optimieren.

Entscheidende Nachteile des Verfahrens der PIV Challenge sind

- Die verwendeten Bilder sind nur zum Teil offen zugänglich. In einigen Fällen sind die Daten selbst geschützt, in anderen Fällen dienen die Daten der Berechnung der statistischen Eigenschaften der teilnehmenden Verfahren und sollen deshalb den Teilnehmern nicht zur Verfügung stehen.
- Die Programme zur Bestimmung der statistischen Eigenschaften stehen nicht zur Verfügung. Schnelle offline-Weiterentwicklungen der Algorithmen und die Bewertung anhand der Tests sind deshalb nicht möglich.
- Das PIV Challenge Programm ist abgeschlossen. Es gibt weder Weiterentwicklungen der Tests noch können neue Algorithmen in den direkten Vergleich eintreten.
- Neue Erkenntnisse über wesentliche Einflüsse wie die Bewegung senkrecht zur Lichtschnittebene (out-of-plane) [4, 5, 6, 7, 8] werden in den bestehenden Tests nicht untersucht.

Mit dem PIV Contest [9] sollen die positiven Erfahrungen mit der PIV Challenge aufgegriffen werden und die bestehenden Nachteile überwunden werden. Insbesondere sollen diese Tests komplett offen sein. Das betrifft sowohl die Bilder, im Falle von Simulationen auch den Quellcode und die simulierten Referenzgeschwindigkeitsfelder, als auch die vergleichenden Testroutinen incl. deren Quellcode. Die Tests sollen für jeden Interessenten zugänglich sein. Die Ergebnisse neuer oder verbesserter Algorithmen können jederzeit in den Vergleich einbezogen werden. Neue Tests können entworfen werden und nach Prüfung zugänglich gemacht werden. Auf diese Weise ist es möglich, neue Erkenntnisse über limitierende Faktoren und Herausforderungen aufzugreifen und die Entwicklung geeigneter Algorithmen anzuregen.

## Test Suiten

Bisher wurden zwei Test Suiten für den Vergleich von PIV-Algorithmen veröffentlicht, die die Genauigkeit und die räumliche Auflösung der Algorithmen prüfen. Die beiden Test Suiten enthalten numerisch generierte Testbilder mit unterschiedlichen Randbedingungen der simulierten Teilchenbewegungen.

### **Genauigkeit bei homogener Verschiebung in der Lichtschnittebene in Abhängigkeit von der Verschiebung senkrecht zur Lichtschnittebene**

In dieser Test Suite sind 1000 Bildpaare, die eine zufällige, aber in der Bildebene homogene Verschiebung darstellen, wobei verschiedene Verschiebungen senkrecht zur Lichtschnittebene als einen wesentlichen Einflussfaktor auf die zu erreichende Genauigkeit der Verschiebungsschätzung [4, 5, 6, 7, 8] simuliert werden.

Für elf verschiedene Bewegungen senkrecht zur Lichtschnittebene von 0 bis 50 % der simulierten Lichtschnittdicke werden jeweils 100 Bildpaare mit  $128 \times 128$  Pixeln erzeugt. Der simulierte Lichtschnitt hat ein kastenförmiges Profil. Die simulierten Bewegungen sind homogen über dem betrachteten Bildausschnitt sowohl senkrecht zur Lichtschnittebene als auch innerhalb der Lichtschnittebene, dort zufällig, gleichverteilt zwischen  $\pm 4$  Pixeln. Die simulierte Teilchendichte beträgt 0.02 pro Pixel. Die Teilchenabbildungen sind Airy-Scheibchen mit einer zufälligen, gleichverteilten Intensität zwischen 0 und 255 und haben einen Durchmesser von 3 Pixeln, definiert durch die erste Nullstelle des Airy-Scheibchens. Die Intensität der simulierten Teilchen wird linear überlagert und über die quadratischen Flächen der einzelnen Pixel integriert. Der simulierte Füllfaktor beträgt 1. Rauschen wird nicht überlagert. Die Bilder werden als PNG-Graustufenbilder mit 8 bit Quantisierungstiefe ausgegeben. Für alle Bildpaare werden die simulierten Verschiebungen für den späteren Vergleich mit ausgegeben.

Die Bilder und die korrekten Verschiebungen stehen online zur Verfügung und können direkt geladen werden. Alternativ ist das Simulationsprogramm online als Pascal-Quelltext oder als vorkompiliertes, lauffähiges Programm für Windows und MacOS für eine lokale Generierung der Bilddaten zu nutzen. Teilnehmende PIV-Algorithmen sollen die Bewegung in Pixeln aus den vorhandenen Bilddaten gewinnen. In dieser Test Suite wird aus jedem Bildpaar nur ein berechneter Verschiebungsvektor weiterverarbeitet. Die Positionen der geschätzten Vektoren und die räumliche Auflösung können beliebig gewählt werden. Wichtig für den Vergleich der Algorithmen ist aber, dass in allen Test Suiten die gleichen Verarbeitungsparameter eingestellt werden. Die Information über die simulierte homogene Bewegung darf deshalb nicht in die Wahl der Parameter der Bildverarbeitung eingehen. Deshalb ist in dieser Test Suite damit zu rechnen, dass die teilnehmenden Algorithmen mehr als einen Vektor liefern. Falls der PIV-Algorithmus mehr als einen Vektor liefert, wird derjenige ausgewählt, der der Bildmitte am dichtesten kommt. Eine Validierung der gelieferten Daten erfolgt bei der Weiterverarbeitung nicht. Alle gelieferten Vektoren werden weiterverarbeitet. Falls geschätzte Vektoren von der Bildverarbeitung als ungültig erkannt wurden, sind diese Vektoren aus der Liste einzureichender Bewegungsdaten zu streichen.

Bei der Weiterverarbeitung der Ergebnisse der Bewegungsschätzung wird der ausgewählte, möglichst zentrale Vektor mit der simulierten Verschiebung verglichen. Unterschieden nach Bewegungskomponenten  $u$  und  $v$  in  $x$ - bzw.  $y$ -Richtung werden die Standardabweichungen der Fehler der Verschiebungsschätzung aus den 100 Bildpaaren für jeden der 10 untersuchten Fälle der Bewegung senkrecht zur Lichtschnittebene bestimmt. Das für den Vergleich von Algorithmen verwendete Programm ist ebenfalls als Quelltext oder vorkompiliertes, lauffähiges Programm für Windows und MacOS online.

In Abb. 1 sind die Ergebnisse dieser Test Suite für zwei bisher untersuchte Algorithmen dargestellt. Die

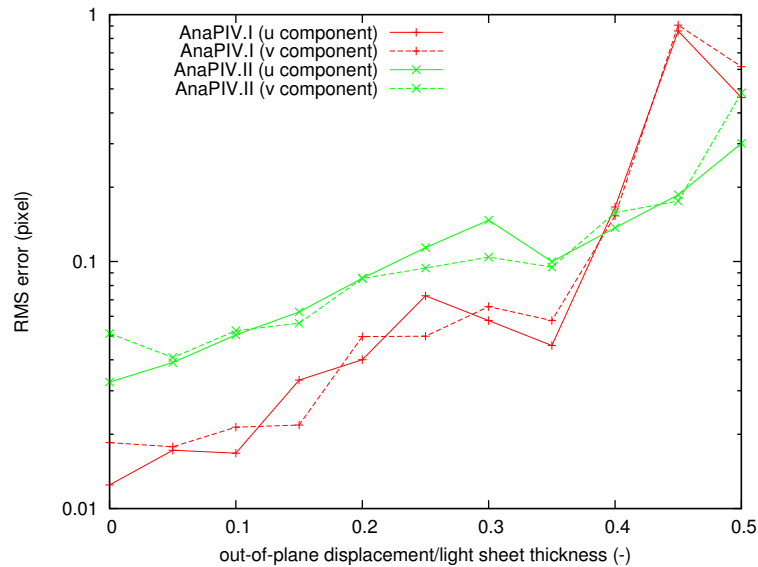


Abbildung 1: Standardabweichung der Bewegungsschätzung in der Lichtschnittebene in Abhängigkeit von der Bewegung senkrecht zur Lichtschnittebene

beiden Algorithmen sind

- **AnaPIV.I:** Ein iterativer Algorithmus mit 10 Iterationen mit Fensterverschiebung und -deformationen [10, 11, 12, 13, 14],  $32 \times 32$  Pixel großen Abfragefenstern mit dreiecksförmiger Gewichtung, Whittaker-Bildinterpolation,  $8 \times 8$  Pixel Abfrageraster (entspricht 75 % Überlappung) und Korrektur der Teilchenintensitätsschwankungen [7].
- **AnaPIV.II:** Ein iterativer Algorithmus mit 10 Iterationen mit Bildverschiebung und -deformationen [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24],  $32 \times 32$  Pixel großen Abfragefenstern mit dreiecksförmiger Gewichtung, Whittaker-Bildinterpolation,  $8 \times 8$  Pixel Abfrageraster (entspricht 75 % Überlappung) und Korrektur der Teilchenintensitätsschwankungen [7].

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt den starken Einfluss der Bewegung senkrecht zur Lichtschnittebene auf die erreichbaren Genauigkeiten der PIV-Algorithmen bei der Schätzung der Bewegung innerhalb der Lichtschnittebene. Die Standardabweichung steigt für beide untersuchten Algorithmen exponentiell mit der Bewegung senkrecht zur Lichtschnittebene an. In dieser Darstellung wird auch die wesentlich größere Empfindlichkeit der iterativen Bilddeformation gegenüber der Verschiebung und Deformation der Abfragefenster deutlich [5].

### Räumliche Auflösung und Genauigkeit

Iterative PIV-Algorithmen mit Bilddeformation sind prinzipiell in der Lage, höhere räumliche Auflösungen zu erzielen als solche mit Verschiebung und Deformation der Abfragefenster [3, 8, 15, 18, 20, 21, 22, 23].

Zur Prüfung der räumlichen Auflösung der PIV-Bildverarbeitung sind in dieser Test Suite 200 Bildpaare, die eine in der Lichtschnittebene zufällige Bewegung darstellen. Die simulierte Verschiebung senkrecht zur Lichtschnittebene ist homogen und beträgt 25 % der simulierten Lichtschnittdicke. Die Bilder sind  $384 \times 384$  Pixel groß. Der simulierte Lichtschnitt hat ein kastenförmiges Profil. Die simulierten Bewegungen sind mit der Dichte der einzelnen Pixel aufgelöst und zufällig mit einer Gauß-Verteilung. Die

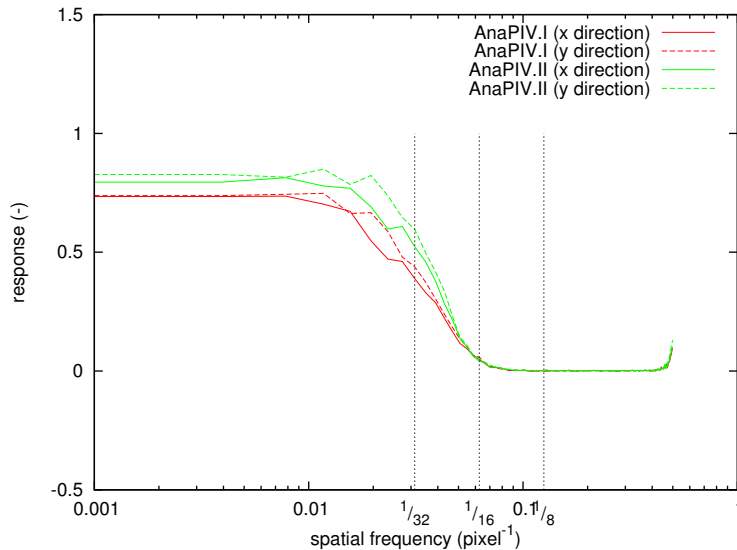


Abbildung 2: Frequenz aufgelöste Antwortfunktion der PIV-Algorithmen

Varianz der Verschiebungen beträgt  $0.5 \text{ Pixel}^2$  und ist spektral gefärbt. Das Leistungsdichtespektrum lässt mit einer dreieckigen Einhüllenden zu größeren Frequenzen nach und verschwindet für die Nyquist-Frequenz von  $1/2 \text{ Pixel}$ . Die simulierte Teilchendichte beträgt  $0.02$  pro Pixel. Die Teilchenabbildungen sind Airy-Scheibchen mit einer zufälligen, gleichverteilten Intensität zwischen  $0$  und  $255$  und haben einen Durchmesser von  $3$  Pixeln, definiert durch die erste Nullstelle des Airy-Scheibchens. Die Intensität der simulierten Teilchen wird linear überlagert und über die quadratischen Flächen der einzelnen Pixel integriert. Der simulierte Füllfaktor beträgt  $1$ . Rauschen wird nicht überlagert. Die Bilder werden als PNG-Graustufenbilder mit  $8$  bit Quantisierungstiefe ausgegeben. Für alle Bildpaare werden die simulierten Verschiebungen für den späteren Vergleich räumlich aufgelöst mit ausgegeben.

Die Bilder und die korrekten Verschiebungen stehen online zur Verfügung und können direkt geladen werden. Alternativ ist das Simulationsprogramm online als Pascal-Quelltext oder als vorkompiliertes, lauffähiges Programm für Windows und MacOS für eine lokale Generierung der Bilddaten zu nutzen. Teilnehmende PIV-Algorithmen sollen die Bewegungen in Pixeln aus den vorhandenen Bilddaten räumlich aufgelöst gewinnen. Die Positionen der geschätzten Vektoren und die räumliche Auflösung können beliebig gewählt werden, wobei die Abtastung entsprechend der Aufgabenstellung dieser Test Suite ausreichend hoch gewählt werden sollte. Wichtig für den Vergleich der Algorithmen ist aber, dass in allen Test Suites die gleichen Verarbeitungsparameter eingestellt werden. Die Information über die simulierte hochfrequente Bewegung darf deshalb nicht in die Wahl der Parameter der Bildverarbeitung eingehen. Eine Validierung der gelieferten Daten erfolgt bei der Weiterverarbeitung nicht. Alle gelieferten Vektoren werden weiterverarbeitet. Falls geschätzte Vektoren von der Bildverarbeitung als ungültig erkannt wurden, sind diese Vektoren aus der Liste einzureichender Bewegungsdaten zu streichen.

Sowohl aus dem geschätzten Vektorfeld als auch aus den Referenzdaten wird ein innerer Bereich von  $256 \times 256$  Pixeln durch Spline-Interpolation mit der Auflösung einzelner Pixel interpoliert. Mittels der Fourier-Transformation wird dann aus diesen beiden Verschiebungsfeldern eine zweidimensionale Kohärenzfunktion berechnet [6], welche anschließend in zwei orthogonale Komponenten für die  $x$ - und die  $y$ -Richtung zerlegt wird. Das für den Vergleich von Algorithmen verwendete Programm ist ebenfalls als Quelltext oder vorkompiliertes, lauffähiges Programm für Windows und MacOS online.

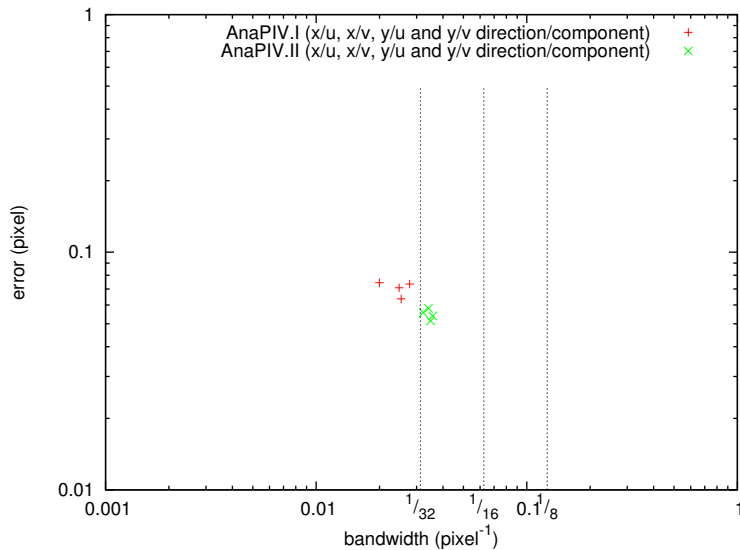


Abbildung 3: Erreichte Bandbreite und Fehler

In Abb. 2 wird der Vorteil des iterativen Verfahrens mit Bilddeformation gegenüber dem iterativen Verfahren mit Deformation der Abfragefenster deutlich. Es ist sowohl die Amplitude der Antwortfunktion bei niedrigen Frequenzen dichter an 1 als auch der Bereich ausreichend großer Werte der Antwortfunktion bis zu größeren Frequenzen ausgedehnt. Damit werden sowohl eine größere Bandbreite als auch kleinere Fehler der Bewegungsschätzung von diesen Verfahren erreicht.

Beide Größen werden getrennt für die Bewegungsrichtungen  $u$  und  $v$  und getrennt nach den Raumrichtungen  $x$  und  $y$  in einer zusätzlichen Weiterverarbeitung bestimmt. Die Bandbreite ist durch die Frequenz bestimmt, bei der die Amplitude der Antwortfunktion auf die Hälfte der Amplitude des Gleichanteils abgefallen ist. Der Fehler wird als das Produkt der Standardabweichung der simulierten Bewegung und der Abweichung der Antwortfunktion vom Wert 1 bei der Frequenz 0 berechnet.

In Abb. 3 wird der Vorteil des iterativen Verfahrens mit Bilddeformation gegenüber dem iterativen Verfahren mit Deformation der Abfragefenster sowohl in der größeren Bandbreite als auch im kleineren Fehler deutlich. Allerdings steht der kleinere Fehler der Bilddeformation im Gegensatz zu den Ergebnissen der ersten Test Suite, bei der die Deformation der Abfragefenster wesentlich genauere Schätzergebnisse der dort homogenen Verschiebung lieferte. Der Unterschied liegt genau in der hier räumlich schwankenden Verschiebung, so dass die Mittelung über die Größe der Abfragefenster zusätzlich als Fehler gewertet wird. Da prinzipiell Mittelungsfehler ebenfalls wesentlich sind, muss die Aussagekraft der vergleichenden Tests mit homogenen Bewegungen grundsätzlich kritisch geprüft werden.

### Aufruf

Die vorgestellten Test Suites und die darin enthaltenen Bilder, Programme und die Vergleichsergebnisse sollen es ermöglichen, neue Entwicklungen bei der PIV-Bildverarbeitung im Vergleich zu anderen Algorithmen zu testen. Die Bilddaten sollen deshalb für jeden unabhängig von Projektperioden online zugänglich bleiben. Entwickler können ihre Algorithmen anhand der mitgelieferten Referenzdaten und der Programme zur Weiterverarbeitung der Ergebnisse schnell im Haus vor der Weitergabe prüfen. Die Ergebnisse können ebenfalls unabhängig von Projektperioden unter Angabe von Ansprechpartnern für neue Algorithmen eingereicht und im öffentlichen Vergleich präsentiert werden.

Die zur Zeit zur Verfügung stehenden Testdaten und Vergleichsroutinen sollen kontinuierlich weiterentwickelt und gepflegt werden. Zu diesem Zweck ist die Übermittlung geeigneter Datensätze sehr willkommen.

## Literatur

- [1] M Stanislas, K Okamoto, and C Kähler. Main results of the first international PIV challenge. *Meas. Sci. Technol.*, 14(10):R63–R89, 2003.
- [2] M Stanislas, K Okamoto, C Kähler, and J Westerweel. Main results of the second international PIV challenge. *Exp. in Fluids*, 39(2):170–191, 2005.
- [3] M Stanislas, K Okamoto, C J Kähler, J Westerweel, and F Scarano. Main results of the third international PIV challenge. *Exp. in Fluids*, 45:27–71, 2008.
- [4] H Nobach and E Bodenschatz. Limitations of accuracy in PIV due to individual variations of particle image intensities. Technical report, Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization, Göttinge, germany, 2007. Report No. 2007/01.
- [5] H Nobach and E Bodenschatz. Limitations of accuracy in PIV due to individual variations of particle image intensities. *Exp. in Fluids*, 47:27–38, 2009.
- [6] H Nobach. Influence of individual variations of particle image intensities on high-resolution PIV. *Exp. in Fluids*, 50:919–927, 2011.
- [7] H Nobach. Suppression of planar PIV errors due to particle intensity variations. In *Proc. 15th Int. Symp. on Appl. of Laser Techn. to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, 2010. paper 1.12.2.
- [8] H Nobach. *Limits in Planar PIV Due to Individual Variations of Particle Image Intensities*, pages 29–50. InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0625-8.
- [9] H Nobach. PIV Contest, 2013. <http://pivcontest.nambis.de>.
- [10] A Fincham and G Delerce. Advanced optimization of correlation imaging velocimetry algorithms. *Exp. in Fluids*, 29:S13–S22, 2000.
- [11] H T Huang, H E Fiedler, and J J Wang. Limitation and improvement of PIV; Part II: Particle image distortion, a novel technique. *Exp. in Fluids*, 15:263–273, 1993.
- [12] B Lecordier. *Etude de l'interaction de la propagation d'une flamme prémélangée avec le champ aérodynamique, par association de la tomographie Laser et de la Vélocimétrie par Images de particules*. PhD thesis, l'Université de Rouen, France, 1997.
- [13] F Scarano. Iterative image deformation methods in PIV. *Meas. Sci. Technol.*, 13:R1–R19, 2002.
- [14] F Scarano and M L Riethmuller. Advances in iterative multigrid PIV image processing. *Exp. in Fluids*, 29:S51–S60, 2000.
- [15] T Astarita. Analysis of weighting window functions for image deformation. *Exp. in Fluids*, 43:859–872, 2007.
- [16] T Astarita. Analysis of velocity interpolation schemes for image deformation methods in PIV. *Exp. in Fluids*, 45:257–266, 2008.
- [17] K Jambunathan, X Y Ju, B N Dobbins, and S Ashforth-Frost. An improved cross correlation technique for particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.*, 6:507–514, 1995.

- [18] A Lecuona, J Nogueira, P A Rodríguez, and D Santana. Accuracy and time performance of different schemes of the local field correlation technique. *Exp. in Fluids*, 33:743–751, 2002.
- [19] J Nogueira, A Lecuona, and P A Rodríguez. Local field correction PIV: on the increase of accuracy of digital PIV systems. *Exp. in Fluids*, 27:107–116, 1999.
- [20] J Nogueira, A Lecuona, and P A Rodríguez. Limits on the resolution of correlation PIV iterative methods. Fundamentals. *Exp. in Fluids*, 39:305–313, 2005.
- [21] J Nogueira, A Lecuona, P A Rodríguez, J A Alfaro, and A Acosta. Limits on the resolution of correlation PIV iterative methods. Practical implementation and design of weighting functions. *Exp. in Fluids*, 39:314–321, 2005.
- [22] F Scarano. A super-resolution particle image velocimetry interrogation approach by means of velocity second derivatives correlation. *Meas. Sci. Technol.*, 15:475–486, 2004.
- [23] F F J Schrijer and F Scarano. Effect of predictor-corrector filtering on the stability and spatial resolution of iterative PIV interrogation. *Exp. in Fluids*, 45:927–941, 2008.
- [24] P T Tokumar and P E Dimotakis. Image correlation velocimetry. *Exp. in Fluids*, 19:1–15, 1995.