

Bestimmung der PIV Messunsicherheit aus dem Korrelationssignal

Sven Scharnowski und Christian J. Kähler

Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Schlagworte: PIV, Messunsicherheit

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin die Messunsicherheit bei der Bestimmung der Verschiebung von Partikelbildern mit planarer Particle Image Velocimetry zu quantifizieren. Dazu wurde die Partikelbildgröße, Partikelbilddichte, Bildrauschen, Turbulenz, Geschwindigkeitsgradienten und Partikelbewegung quer zum Laserlichtschnitt mit synthetischen Bildern systematisch variiert und analysiert. Es wird gezeigt, dass alle untersuchten Parameter die Messunsicherheit wesentlich beeinflussen. Die Sensitivität der Messunsicherheit bezüglich der verschiedenen Parameter kann als Grundlage zur Fehlerabschätzung und zur Optimierung eines PIV-Messaufbaus genutzt werden. Um die gewonnenen Erkenntnisse auf experimentelle Daten übertragen zu können, ist es wichtig die Größe der Parameter aus den Rohbildern abzuschätzen. Für die Bestimmung der Querbewegung wurde eine neue Methode entwickelt, mit der der Verlust von Partikelbildpaaren aus der Korrelationsfunktion zuverlässig bestimmt werden kann.

1 Einleitung

Die Particle Image Velocimetry (PIV) ist seit vielen Jahren ein etabliertes Verfahren zur berührungslosen Messung von Geschwindigkeitsfeldern in transparenten Strömungen. Die Ermittlung der Messunsicherheit ist bei dem Verfahren stark abhängig von der Versuchskonfiguration, sowie den Bildaufnahme- und Bildanalyseparametern. Eine Fehlerabschätzung ist oft schwierig, weil der Zusammenhang zwischen Messwerten (Intensitätsverteilung der Partikelbilder) und Ergebnis (Geschwindigkeitsfeld) komplex ist und von vielen Parametern abhängt: Partikelbildgröße, Partikelbilddichte, Turbulenzgrad, Bildrauschen, Geschwindigkeitsgradienten u.a.. Dennoch ist die Bestimmung der Messunsicherheit essentiell für die Beantwortung vieler wissenschaftlicher Fragestellungen und für die Validierung von CFD-Simulationen.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Methoden zur Bestimmung der Messunsicherheit entwickelt und mittels synthetischer PIV-Bilder getestet (Charonko 2013, Sciacchitano 2013, Sciacchitano 2015, Timmins 2012, Wieneke 2015, Wilson 2013, Xue 2015). Dabei haben sich zwei verschiedene Herangehensweisen herausgestellt: Entweder versucht man alle Parameter zu identifizieren, die die Messunsicherheit beeinflussen und bestimmt deren Sensitivität, um hieraus die Gesamtunsicherheit abzuschätzen (Wilson 2013). Oder man reduziert den Parameterraum, indem man die Korrelationsfunktionen analysiert, deren Form sich ja aus allen Parametern ergibt, die zur Messunsicherheit beitragen (Charonko 2013, Wiene-

ke 2015). Beide Herangehensweisen erscheinen vielversprechend und haben demonstriert, dass eine Fehlerabschätzung für PIV möglich ist.

Der nächste logische Schritt ist es, das Wissen über die Messunsicherheit zu nutzen, um sie zu reduzieren und somit die Qualität der Messergebnisse zu steigern. Beispielsweise könnte man die optische Vergrößerung erhöhen oder die Zeit zwischen den Laserpulsen verringern, wenn Geschwindigkeitsgradienten zu groß sind und hohes Messrauschen verursachen. In diesem Beitrag soll die Möglichkeit einer solchen Optimierung diskutiert werden. Hierzu werden im Abschnitt 2 synthetische Bilder erzeugt und analysiert. Abschnitt 3 dient der Bestimmung der Sensitivität der Messunsicherheit bezüglich der wichtigsten Parameter, um das Optimierungspotential abzuschätzen. In Abschnitt 4 wird am Beispiel der Partikelbewegung quer zum Lichtschnitt diskutiert, wie sich die Größe der Parameter aus PIV Bildern bestimmen lässt.

2 Synthetische PIV Bilder

Nur durch Verwendung synthetischer PIV-Bilder ist es möglich, alle relevanten Parameter zu kontrollieren (Kähler 2012). Einzelne Größen können in einen experimentell oft nicht realisierbaren Parameterbereich variiert werden, während alle anderen Bildeigenschaften konstant bleiben. Somit ist es beispielsweise möglich die Partikelbildgröße zu ändern und dabei die Partikelbildanzahl und die Intensität konstant zu halten, was im Experiment schwierig wäre. Außerdem ist es möglich extreme Werte zu simulieren, die im Experiment nicht erreicht werden können.

Alle synthetischen Bilder wurden mit einem MATLAB Programm erzeugt, wobei folgende Parameter kontrolliert wurden: Die Bildgröße betrug 1024×1024 Pixel. Die Intensität $I(x, y)$ der Partikelbilder wurden Gaußförmig simuliert:

$$I(x, y) = I_0 \exp \left[-8 \left[\left(\frac{x-x_0}{D} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{D} \right)^2 \right] \right] \quad (1)$$

Wobei I_0 die maximale Intensität, D der Partikelbilddurchmesser und (x_0, y_0) die Partikelbildposition ist. Von dieser kontinuierlichen Intensitätsverteilung eines Partikelbildes wurden die diskreten Grauwerte eines digitalen PIV-Bildes aus der Integration über den Pixelabstand bestimmt:

$$A(x, y) = \sum_{p=1}^P \left[\int_{x-0.5}^{x+0.5} \int_{y-0.5}^{y+0.5} I_p(x, y) dx dy \right] \quad (2)$$

Durch die Integration über den vollen Pixelabstand wird ein Füllfaktor von 100% des Kamerasensors simuliert. Die Position der P Partikelbilder ist dabei zufällig festgelegt und folgt einer Gleichverteilung innerhalb des Bildes. Die Position der Partikelbilder im zweiten PIV-Bild ergibt sich aus der im Ersten mittel seiner wohl definierten Verschiebungsoperation. Um alle Subpixelwerte bei der Verschiebung zu berücksichtigen, wurde in diesen Untersuchungen ein leichter Gradient simuliert. Dabei variiert die Verschiebung Δx von -10 Pixel am unteren Bildrand bis zu +10 Pixel am oberen Bildrand. Die vertikale Komponente der Verschiebung Δy wurde um den Faktor 10 gegenüber der horizontalen verkleinert. Eine Bewegung quer zum Lichtschnitt Δz ändert nur die Intensität der Partikelbilder. Das Laserstrahlprofil wurde dabei als eine verallgemeinerte Gaußverteilung simuliert:

$$I(z) = I_0 \exp \left[- \left(\frac{2z}{\Delta z_0} \right)^s \right], \quad s \geq 2 \quad (3)$$

Der Formfaktor s ist 2 für ein Gaußförmiges Profil und geht gegen Unendlich für ein Rechteckprofil. Zusätzlich zu der Verschiebung mit konstantem Gradienten wurde eine zufällige Bewegung mit einer Standardabweichung von 0,1 Pixel erzeugt, um (nicht aufgelöste) Turbulenz oder den Effekt der Brownschen Molekularbewegung auf die Tracerpartikel zu simulieren. Vor der Konvertierung der Intensitätsverteilung der PIV-Bildpaare in ganzzahlige 16 Bit Grauwertverteilung wurde noch Bildrauschen mit Gaußförmiger Verteilung addiert, um möglichst realistische PIV-Bilder zu erzeugen. In Tabelle 1 sind alle Simulationsparameter zusammengefasst, die als Standardwerte verwendet wurden. Ausgehend von diesen Standardwerten wurden die verschiedenen Parameter einzeln oder Paarweise variiert, um Ihren Einfluss auf die Messunsicherheit systematisch zu untersuchen.

Tab.1: Zusammenfassung der Simulationsparameter

Parameter	Symbol	Wert
Bildgröße		1024 × 1024 Pixel
Partikelbilddurchmesser	D	3 Pixel
Partikelbilddichte	N_{ppp}	0,1 ppp
Intensität	I_0	1024 counts
Signal/Rausch Verhältnis	SNR	1000
Verschiebungsgradient	$\partial\Delta x/\partial y$	0,02 Pixel/Pixel
Querbewegung	$w/\Delta z$	0 Pixel
Geschwindigkeitsfluktuation	u', v', w'	0,1 Pixel
Lichtschnittformfaktor	s	10

Die erzeugten PIV-Bildpaare wurde mit der Software DaVis 8.2.3 (LaVision GmbH) ausgewertet. Dabei wurde jedes Bildpaar in 32×32 Pixel große Auswertefenster unterteilt und die Verschiebung der Partikelbilder in diesen Fenstern mittels (Gauß-gewichteter) Kreuzkorrelation bestimmt. Die Auswertefenster wurden um 50% überlappt und die Verschiebevektoren wurden durch iterative Bilddeformation bestimmt. In Abb. 1 ist ein Ausschnitt aus einem beispielhaften PIV-Rohbild, sowie das dazugehörige Verschiebevektorfeld, dargestellt.

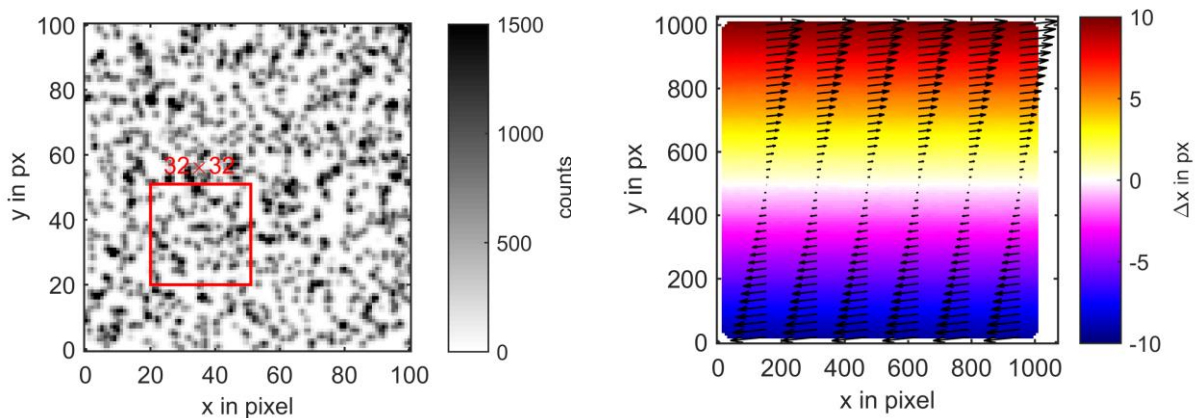


Abb. 1: Ausschnitt aus einem beispielhaften synthetischen PIV-Bild (links) und das dazugehörige Verschiebevektorfeld (rechts).

3 PIV Messunsicherheit

Im Gegenteil zu realen Experimenten kann der Messfehler aus den berechneten Vektorfeldern bestimmt werden, da für die synthetischen Bilder die simulierte Verschiebung der Partikelbilder bekannt ist. Aus der Streuung der Differenz zwischen Sollwerten und Istwerte kann die Standardabweichung des zufälligen Fehlers ermittelt werden:

$$\Delta x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\Delta x_{ist} - \Delta x_{soll} - \langle \Delta x_{ist} - \Delta x_{soll} \rangle)^2} \quad (4)$$

Dabei ist die Anzahl der Messstellen N ca. 4000 bei 32×32 Pixel großen Auswertefenstern mit 50 % Überlappung.

Abbildung 2 fasst den Einfluss von 6 wichtigen Parametern auf die PIV Messunsicherheit zusammen: Der Partikelbilddurchmesser D (oben links in Abb. 2) sollte größer als 2 Pixel sein, um systematische Fehler zu vermeiden (Raffel 2007, Adrian 2010). Der zufällige Fehler weist meistens ein lokales Minimum im Bereich zwischen $D = 2 \dots 10$ Pixel auf (Raffel 2007, Scharnowski 2012). Der Verlauf hängt aber zum Beispiel von der Partikelbilddichte und der Gewichtungsfunktion ab, wie in der Abbildung zu sehen ist. Das Signal/Rausch Verhältnis (Standardabweichung des Bildrauschens bezogen auf I_0 , oben rechts in Abb. 2) zeigt besonders im Bereich $SNR = 1 \dots 5$ starke Änderungen der Messunsicherheit. Für Werte $SNR > 10$ wird eine Sättigung erreicht, die u.a. von der Auswertefenstergröße abhängt. Geschwindigkeitsfluktuationen (Mitte links), die nicht vom Messsystem aufgelöst werden, führen zu einem exponentiellen Anstieg der Messunsicherheit. Der Exponent hängt auch hier von der Größe der Auswertefenster ab. Die Partikelbilddichte (Mitte rechts) zeigt für die untersuchten Fälle starken Einfluss, solange weniger als 10 Partikelbilder im Auswertefenster enthalten sind ($N_{ppp} < 0.04$ bei 32×32 Pixel). Für höhere Dichten ist die Messunsicherheit annähernd konstant.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Bewegung der Partikel quer zur Messebene, wodurch Partikelbilder ihre Intensität ändern oder gar „verschwinden“. Aus der Querbewegung Δz ergibt sich der Verlustfaktor F_o (Kean 1990):

$$F_o(\Delta z) = \frac{\int I_1(z-z_1) \cdot I_2(z-z_2-\Delta z) dz}{\int I_1(z) \cdot I_2(z) dz} \quad (5)$$

Unten links in Abb. 2 ist zu sehen, dass F_o die Messunsicherheit stark beeinflusst. Eine Querbewegung, die zum signifikanten Partikelbildverlust führt, sollte also vermieden werden. Außerdem kann die Messunsicherheit bei PIV minimiert werden, wenn die Laserstrahlüberlappung optimiert wird.

Unten rechts in Abb. 2 ist der Einfluss des Gradienten $\partial \Delta x / \partial y$ dargestellt. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Gradienten - aber auch mit zunehmender Fenstergröße - die Messunsicherheit größer wird.

Bei der Interpretation der Kurvenverläufe in Abb. 2 ist zu berücksichtigen, dass in einem multidimensionalen System von Einflussparametern nur Variationen von einem Punkt aus (Tab. 1) betrachtet wurden. Für diesen Punkt wurden immer nur ein oder zwei Parameter variiert. Sollten zwei oder mehr der betrachteten Parameter von diesem Punkt abweichen, ist eine Fehlerabschätzung fragwürdig. In diesem Fall könnte aber die Messunsicherheit zu den fraglichen Parametern durch entsprechende synthetische PIV-Bilder bestimmt werden.

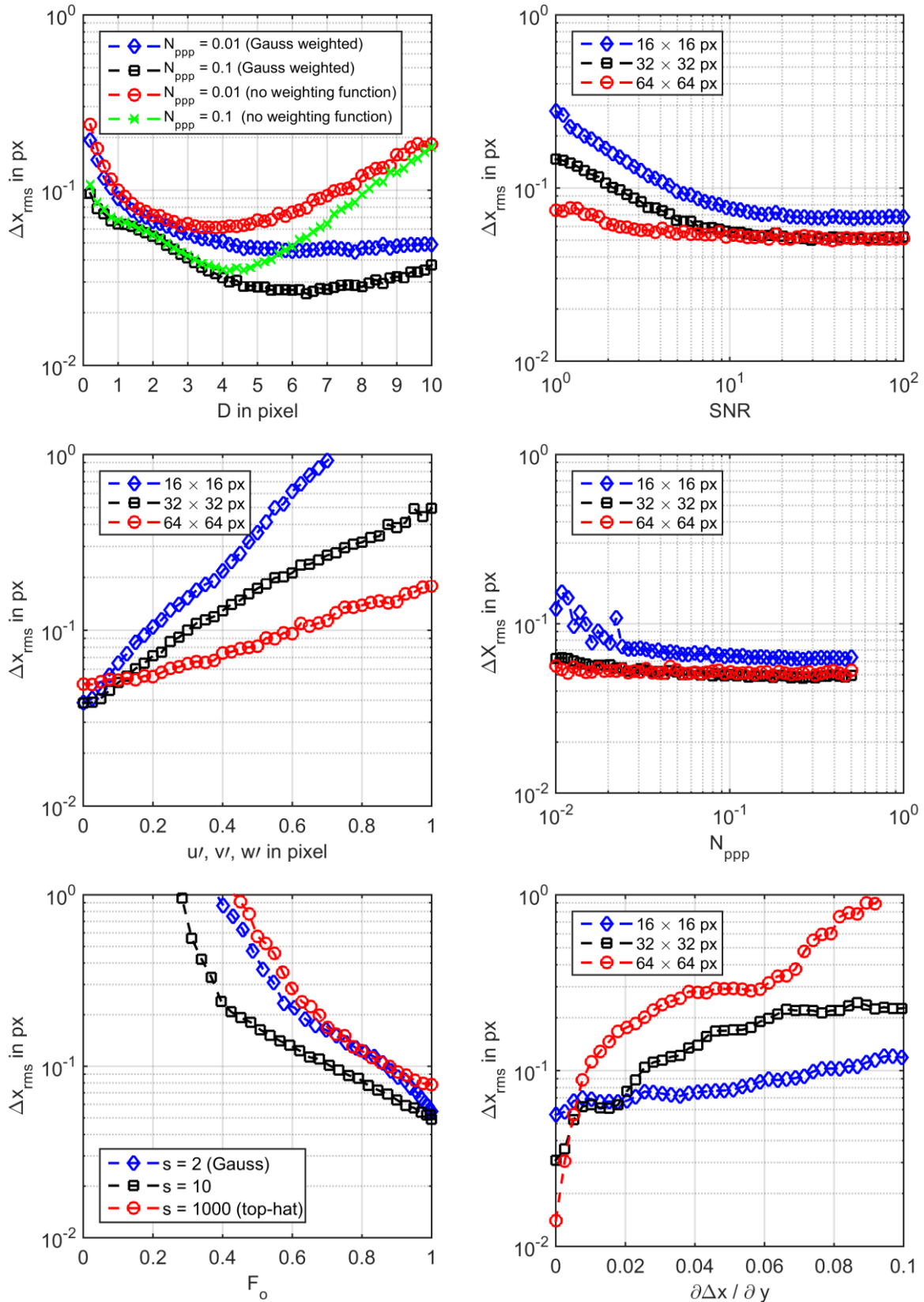


Abb. 2: Einfluss verschiedener Parameter auf die Messunsicherheit der mit PIV bestimmten Partikelbildverschiebung.

4 Bestimmung des Verlustfaktors F_o

Die Kenntnis über den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Messunsicherheit ist hilfreich bei der Abschätzung eines Gesamtmessfehlers. Um allerdings die Messunsicherheit aus experimentellen PIV-Daten bestimmen zu können, ist es erforderlich, die Größe dieser Parameter aus den PIV-Bildern zu bestimmen. Ein schwierig zu bestimmender Parameter ist insbesondere die Bewegung der Partikel quer zur Messebene. Dieser Effekt kann zwar mittels synthetischer Bilder systematisch untersucht werden, bisher gibt es aber noch keine Möglichkeit, den Verlust der Partikelbilder durch die Querbewegung zuverlässig aus den PIV-Bildern selbst abzuschätzen.

Wenn aufgrund von Querbewegung zu einem Partikelbild kein Partner gefunden wird, oder zusammengehörige Partikelbilder deutliche Intensitätsunterschiede aufweisen, hat dies einen geringeren Korrelationswert der Kreuzkorrelation zur Folge. In der Autokorrelation der Einzelbilder hingegen bleibt der Korrelationswert unverändert. Das Verhältnis der beiden Korrelationsmaxima gibt also Aufschluss über den Verlustfaktor F_o .

Allerdings beeinflussen auch Geschwindigkeitsfluktuationen und Gradienten des Verschiebungsfeldes die Höhe der Korrelationsfunktion. Durch diese beiden Parameter wird allerdings nicht nur die Höhe sondern auch die Ausdehnung der Korrelationsfunktion verändert: Der Peak wird flacher aber verteilt sich über eine größere Fläche und sein Volumen bleibt erhalten bzw. hängt nur noch von der Querbewegung ab. Das Verhältnis vom Volumen der Korrelationsfunktion V_C zum Volumen der Autokorrelationsfunktion (Mittelwert beider Bilder) V_R liefert also den gesuchten Verlustfaktor. Abbildung 3 zeigt im linken Teil für drei verschiedene Lichtschnittformfaktoren, dass das so normierte Volumen tatsächlich proportional zu F_o ist. Somit ist es gelungen die nicht direkt messbare Größe - Querbewegung - auf leicht zu bestimmende Größen zurückzuführen. Aus dem Verhältnis V_C/V_R kann aus den synthetischen Daten auch direkt die Messunsicherheit bestimmt werden, die sich aus F_o ergibt. Dieser Zusammenhang ist rechts in Abb. 3 dargestellt.

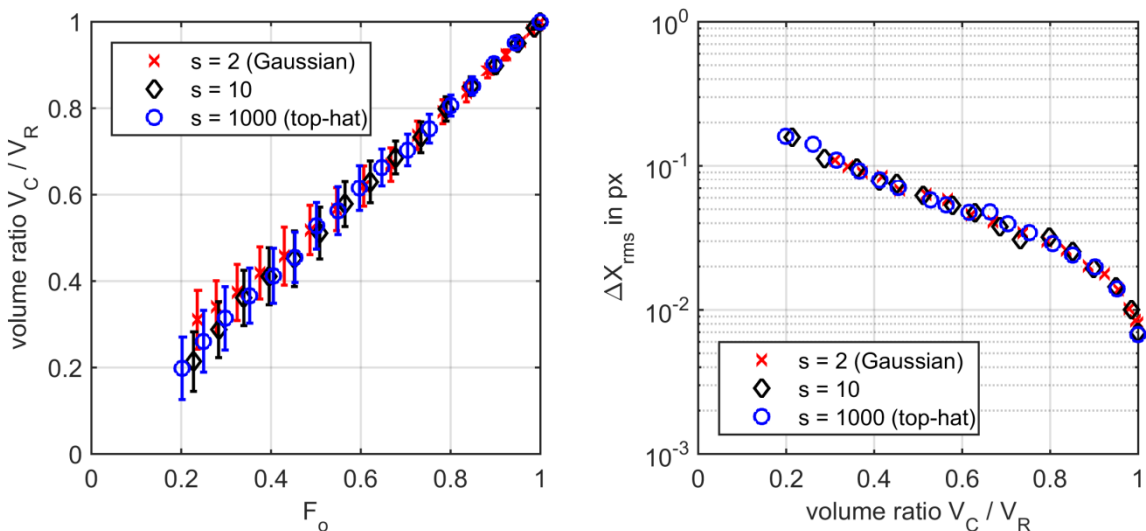


Abb. 3: Verlustfaktor F_o (links) und Standardabweichung (rechts) in Abhängigkeit vom normierten Volumen der Korrelationsfunktion V_C/V_R .

Abbildung 4 zeigt im linken Teil, dass die Bestimmung von F_o aus dem normierten Korrelationsvolumen unabhängig von Geschwindigkeitsfluktuationen möglich ist, also das Volumen der Korrelationsfunktion auch bei (nicht aufgelöster) Turbulenz erhalten bleibt. Im rechten Teil der Abb. 4 ist das normierte Korrelationsvolumen als Funktion des Verlustfaktors für ver-

schiedenen Rauschlevel dargestellt. Durch das Bildrauschen wird die Intensität von Korrelationsfunktion und Autokorrelationsfunktion unterschiedlich beeinflusst, da das Rauschen mit sich selbst korreliert und im Zentrum der Autokorrelation zu einem hohen Korrelationswert führt. Nur für $SNR \geq 10$ und $F_o \geq 0.8$ kann der Verlust von Partikelbildpaaren zuverlässig abgeschätzt werden.

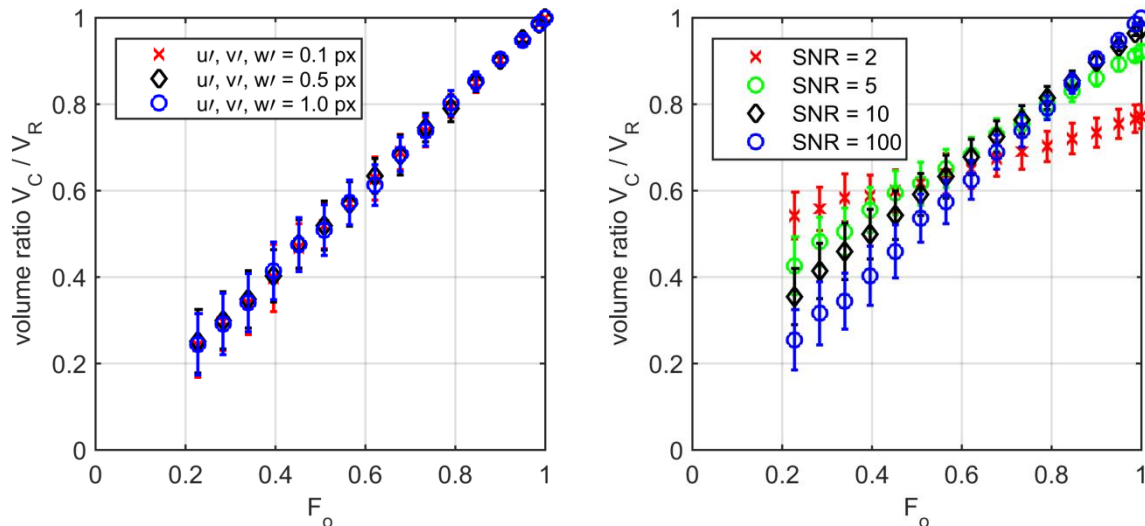


Abb. 4: Verlustfaktor F_o in Abhängigkeit vom normierten Volumen der Korrelationsfunktion V_C/V_R bei Variation der Geschwindigkeitsfluktuation (links) und des Signal/Rausch-Verhältnisses (rechts).

4 Zusammenfassung

Durch die Analyse von synthetischen PIV-Bildern, bei denen Partikelbilddurchmesser, Partikelbilddichte, Bildrauschen, Geschwindigkeitsfluktuationen, Querbewegungen und Gradienten variiert wurden, war es möglich die Sensitivität der Messunsicherheit von den Parametern zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Genauigkeit von PIV-Messungen von allen getesteten Parametern abhängt. Die gewonnenen Abhängigkeiten können somit genutzt werden, um ein PIV-Messsystem für möglichst geringe Messunsicherheit zu optimieren. Dabei sollte idealerweise der Partikeldurchmesser zwischen 2 und 5 Pixel liegen, das Signal/Rausch Verhältnis größer als 10 sein, nicht aufgelöste Turbulenz möglichst gering sein, mindestens 10 Partikelbilder je Auswertefenster enthalten sein, keine Partikelbildverluste durch Querbewegung auftreten und die Gradienten im Bild gering sein.

Mit einem sehr kleinen Zeitabstand zwischen den Doppelbildern lassen sich Turbulenz, Querbewegung und Gradienten reduzieren, jedoch steigt dadurch auch der relative Fehler der Verschiebevektoren, da deren Länge reduziert wird. Für den optimalen Zeitabstand müssen also alle Fehlerquellen berücksichtigt werden.

Ob die vorliegenden Untersuchungen ausreichen, um den Gesamtfehler von PIV-Messungen abzuschätzen, bleibt fragwürdig. Schließlich gibt es wesentlich mehr mögliche Fehlerquellen als die hier untersuchten Parameter. Nicht betrachtet wurden beispielsweise komplexe Geschwindigkeitsprofile, Variationen im Partikelbilddurchmesser und in der Partikelbildintensität, der Sensorfüllfaktor und die Bittiefe des Kamerasensors u.a..

Unter den betrachteten Parametern zeigte der Verlust von Partikelbildpaaren (durch Querbewegung oder unzureichende Lichtschnittüberlappung) besonders großen Einfluss auf die Messunsicherheit. Durch die vorgestellte Methode zur Bestimmung von F_o aus der Korrelationsfunktion, kann nun auch dieser Parameter gemessen und optimiert werden. Das Verfah-

ren ist auch auf gemittelte Korrelationsfunktionen berechnet mit Fensterkorrelation (Meinhart 2000) oder single-Pixel Ensemble-Korrelation (Westerweel 2004, Kähler 2006) übertragbar.

Danksagung

Das Programm zur Erzeugung der synthetischen Bilder wurden im Rahmen des DFG Projektes SFB – TR40 (Technologische Grundlagen für den Entwurf thermisch und mechanisch hochbelasteter Komponenten zukünftiger Raumtransportsysteme) entwickelt. Die Autoren möchten sich ferner bei Donald McEligot, Barton Smith und John Charonko für anregende Diskussionen zur Fehlerabschätzung bedanken.

Literatur

- Adrian, R.J., Westerweel, J., 2010: „Particle Image Velocimetry“, Cambridge University Press
- Charonko, J.J., Vlachos, P.P., 2013: „Estimation of uncertainty bounds for individual particle image velocimetry measurements from cross-correlation peak ratio“, *Meas Sci Tech*, 24, pp. 065301
- Kähler, C.J., Scharnowski, S., Cierpka, C., 2012: „On the uncertainty of digital PIV and PTV near walls“, *Exp Fluids*, 52, pp. 1641–1656
- Kähler, C.J., Scholz, U., Ortmanns, J., 2006: „Wall-shear-stress and near-wall turbulence measurements up to single pixel resolution by means of long-distance micro-PIV“, *Exp Fluids* 41, pp. 327–341
- Keane, R.D., Adrian, R.J., 1990: „Optimization of particle image velocimeters. Part I: double pulsed systems“, *Meas Sci Tech*, 1, pp.1202–1215
- Meinhart, C.D., Wereley, S.T., Santiago, J.G., 2000: „A PIV algorithm for estimating timeaveraged velocity fields“, *J Fluids Eng*, 122, pp. 285–289
- Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T., Kompenhans, J., 2007: „Particle image velocimetry: a practical guide“, Springer Verlag
- Scharnowski, S., Hain, R., Kähler, C.J., 2012: „Reynolds stress estimation up to single-pixel resolution using PIV-measurements“, *Exp Fluids*, 52, pp. 985–1002
- Sciacchitano, A., Wieneke, B., Scarano, F., 2013: „PIV uncertainty quantification by image matching“, *Meas Sci Tech*, 24, pp. 045302
- Sciacchitano, A., Neal, D., Smith, B.L., Warner, S., Vlachos, P.P., Wieneke, B. and Scarano, F., 2015: „Collaborative framework for PIV uncertainty quantification: comparative assessment of methods“, *Meas Sci Tech*, 26, pp. 074004
- Timmins, B.H. Wilson, B.W. Smith, B.L., Vlachos P.P., 2012: „A method for automatic estimation of instantaneous local uncertainty in particle image velocimetry measurements“, *Exp Fluids*, 53, pp. 1133–1147
- Westerweel, J., Geelhoed, P.F., Lindken, R., 2004: „Single-pixel resolution ensemble correlation for micro-PIV applications“ *Exp Fluids*, 37, pp. 375–384
- Wieneke, B., 2015: „PIV uncertainty quantification from correlation statistics“, *Meas Sci Tech*, 26, pp. 074002
- Wilson, B.M., Smith, B.L., 2013: „Uncertainty on PIV mean and fluctuating velocity due to bias and random errors“, *Meas Sci Tech*, 24, pp. 035302
- Xue, Z., Charonko, J.J., Vlachos, P.P., 2015: „Particle image pattern mutual information and uncertainty estimation for particle image velocimetry“, *Meas Sci Tech*, 26, pp. 074001