

Analyse von Algorithmen zur verbesserten Versatzschätzung in der Ortsfiltertechnik

Analysis of algorithms for improved displacement estimation in spatial filtering technique

M. Schaeper, R. Kostbade, W. Kröger, N. Damaschke

Universität Rostock, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

Ortsfiltertechnik, Versatzschätzung, PIV
spatial filtering technique, displacement estimation, PIV

Zusammenfassung

Für die Versatzschätzung zwischen aufeinander folgenden Bildern wird vorrangig die Kreuzkorrelation (KKF) herangezogen. Vergleiche bezüglich der Berechnung der KKF mit Hilfe der konjugiert komplexen Spektren der Bilder und der Berechnung eines Ortsfiltersignals zeigen, dass bei der KKF alle Koeffizienten in die Berechnung eines Korrelationspeaks eingehen, während die Ortsfiltertechnik vorrangig einen einzelnen Koeffizienten nutzt. Die damit einhergehende Datenreduktion wirkt sich vorteilhaft auf die benötigte Berechnungszeit zur Schätzung des Versatzes aus.

Mit der Verwendung eines einzelnen Koeffizienten erhöht sich die Unsicherheit der Versatzschätzung. Der Beitrag zeigt Untersuchungen, die eine Verringerung der Schwankungsbreite bewirken. Dies sind einerseits die Einführung einer Mindesthöhe der Signalamplitude und andererseits die Detektion von Phasensprüngen bzw. die Vermeidung dieser. Dadurch ist es möglich, die Genauigkeit der Schätzung um fast eine Größenordnung zu verbessern.

Einleitung

Für die Schätzung des Versatzes von Bildinformationen, bspw. in der Particle Image Velocimetry (PIV), werden vorrangig die Kreuzkorrelation und eine anschließende Peakdetektion angewendet. Neben der Kreuzkorrelation können auch andere Verfahren, wie verallgemeinerte Korrelation (generalized correlation), Phasenkorrelation (phase correlation) oder Phasendifferenzbestimmung eingesetzt werden. Die Ortsfiltertechnik, die die Bildinformation mit einer Gitterfunktion überlagert und diese gewichteten Werte zu einem Signalwert summiert, ist ein Spezialfall der verallgemeinerten Korrelation mit Phasendifferenzbestimmung. Bei komplexwertigen harmonischen Gittern gleicht die Signalerzeugung der Berechnung eines einzelnen Fourier-Koeffizienten. Vorteil gegenüber der Kreuzkorrelation ist, dass die zu verarbeitende Datenmenge erheblich reduziert wird und echtzeitfähige, kontinuierlich arbeitende Systeme realisierbar sind. Jedoch ist die Genauigkeit der Versatzbestimmung aufgrund von Phasensprüngen im Signal um ca. eine Größenordnung geringer als bei Korrelationsverfahren.

Die Ortsfiltermesstechnik wurde bereits in verschiedenen Anwendungen zur Strömungsmessung herangezogen (Menn 2010, Schaeper, Kühn et al. 2011, Hosokawa, Matsumoto et al.

2012). Vorteil der Ortsfiltertechnik gegenüber der Verarbeitung von Bilddaten ist die erhebliche Datenreduktion, die durch das Summieren von Pixelzeilen und -spalten entsteht. Hierdurch gelingt beispielsweise eine Reduktion bei 1024x1024 Pixel herunter auf 2x1024 Pixel (für x- und y-Richtung). Auf diese Weise wird eine schnellere Datenverarbeitung gegenüber der Kreuzkorrelation erreicht.

Theorie zur Versatzschätzung mittels Ortsfiltertechnik

Die Signalbildung in der Ortsfiltertechnik (hier die Verwendung von strukturierten Empfängern wie CCD oder CMOS Chips) erfolgt zunächst durch die Bewertung der Pixelwerte mittels je einer Gitterfunktion für x- und y-Richtung mit

$$\underline{S}_n = \int i_n(x, y) [\cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}) + j \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{p})] d\mathbf{p} \quad (1)$$

und

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} l \\ m \end{pmatrix} = 2\pi \begin{pmatrix} \mu \\ \nu \end{pmatrix}; \quad \sqrt{l^2 + m^2} = 1; \quad \mathbf{p} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2)$$

mit Ortskreisfrequenzvektor \mathbf{k} und \mathbf{p} als Ortsvektor (Schaeper and Damaschke 2012). Der Index n steht für das aktuell verarbeitete Bild (Frame).

Vergleichend kann die Signalbildung auch mit Hilfe der Bildung von Fourier-Koeffizienten aufgefasst werden.

$$\underline{S}_n = \int i_n(x, y) \exp(j \mathbf{k} \cdot \mathbf{p}) d\mathbf{p} = \mathfrak{S}\{i_n\}_{\mu, \nu} \quad (3)$$

In Anlehnung an (Aizu and Asakura 2006) steht jeder Koeffizient der Ortsfrequenz μ bzw. ν für eine andere Periode g_p eines harmonischen Gitters.

$$g_{p,x} = \frac{1}{\mu} = \frac{2\pi}{k_x}; \quad g_{p,y} = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{k_y} \quad (4)$$

Der eigentliche Versatz von einem Bild ($n-1$) zum nächsten Bild (n) kann aufgrund des Phasenversatzes für den jeweiligen Koeffizienten ermittelt werden,

$$\Delta \mathbf{p} = \frac{1}{\mathbf{k}} \Delta \varphi_{\mu, \nu} \quad (5)$$

wobei die Phasendifferenz aus der konjugiert komplexen Multiplikation erhalten werden kann.

$$\Delta \varphi_{\mu, \nu} = \arg(\underline{S}_{n-1}^* \underline{S}_n)_{\mu, \nu} \quad (6)$$

Die gleiche konjugiert komplexe Multiplikation im Spektralbereich kann für die Berechnung der Kreuzkorrelation, die vorrangig in der PIV verwendet wird, angewandt werden. Hierbei werden jedoch alle Koeffizienten verwendet. Wird die konjugiert komplexe Multiplikation der Spektren aufeinander folgender Bilder wieder zurücktransformiert, erhält man den Peak der Kreuzkorrelationsfunktion. Der Versatz dieses Peaks spiegelt den Versatz der verwendeten Bilder zueinander wider und dessen Position wird entsprechend geschätzt bzw. interpoliert.

Vergleich anhand simulierter Bildfolgen

Für die Vergleichbarkeit von Auswertalgorithmen ist eine referenzierte Bewegung mit Subpixelaufösung, bspw. von Partikeln (in Form von Streuzentren), notwendig. Zu diesem Zweck wurde ein Simulationsprogramm umgesetzt, welches zufällig verteilte Streuzentren in einer Szene generiert und deren Position nach vorgegebenen Bewegungsmustern schrittweise editiert. Hierbei werden zeitlich hochaufgelöste 3D/3C-Partikelszenen subpixelgenau und unter Berücksichtigung optischer Übertragungs- und Filterfunktionen errechnet. Bei der folgenden Abtastung der Szene durch den virtuellen Sensor werden zudem eine Pixelapertur der Sensorpixel sowie Rauscheinflüsse (Schrot- und Quantisierungsrauschen) berücksichtigt. Zum Vergleich wurden drei Szenen mit verschiedenen Partikeldichten simuliert. Diese sind in Abbildung 1 dargestellt. Es wurde ein Gaußfilter eingesetzt, um die Punktverwachsung nachzubilden.

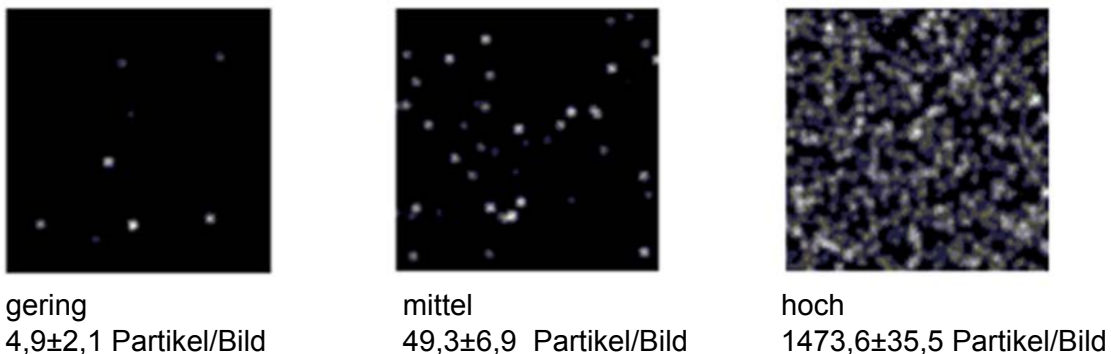


Abb. 1: Beispielbilder der simulierten Bildfolgen mit verschiedenen Partikeldichten

Die Bewegung der Partikel erfolgt vereinfachend in horizontaler Richtung. Weitere Parameter und Eigenschaften der Simulationen sind:

- 1 Pixel = 16 x 16 Subpixel
- Sensorimage: 128 x 128 Pixel (≈ 1 Interrogation-Area)
- Anzahl aufeinander folgender Bilder: $N = 40960$
- $v_x = 0,125$ Pixel/Frame = 2 Subpixel/Frame
- aktuelle Partikelpositionen je Bild verfügbar (Referenz zur Versatzschätzung)

Zunächst werden die simulierten Bildfolgen mittels einer kommerziellen PIV-Software (DynamicStudio der Firma Dantec Dynamics) und der Ortsfiltertechnik ausgewertet. Hierbei musste die Schrittweite zur Nutzung der Kreuzkorrelation auf jedes zehnte Bild erhöht werden. Eine Auswertung von Bewegungen im Subpixelbereich bewirken, speziell bei der PIV Technik, stark abweichende Ergebnisse vom Vorgabewert. In Abbildung 2 sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Auswertung ohne jegliche Filterung dargestellt. Die Ergebnisse sind zur Vergleichbarkeit auf den eigentlichen Vorgabewert des Versatzes normiert. Die Standardabweichung der Versatzschätzung aus der Kreuzkorrelation wird mit zunehmender Partikelanzahl erwartungsgemäß geringer. Für die Auswertung der Phasendifferenz eines Ortsfiltersignals (hier der 8. Koeffizient mit einer Gitterperiode $g_p = 16$ Pixel) ist allgemein eine wesentlich höhere Schwankungsbreite zu beobachten. Die bekannte größere Unsicherheit der Ortsfiltertechnik ist primär auf Phasensprünge im Signal zurückzuführen. Diese entstehen wenn Bildinformationen in das Abfragefenster hinein oder aus diesem her-

auslaufen. Dadurch ändert sich die Phasenlage des genutzten Koeffizienten kontinuierlich (Fleet, Jepson et al. 1991), was einer Frequenzabweichung entspricht (Schaeper 2013).

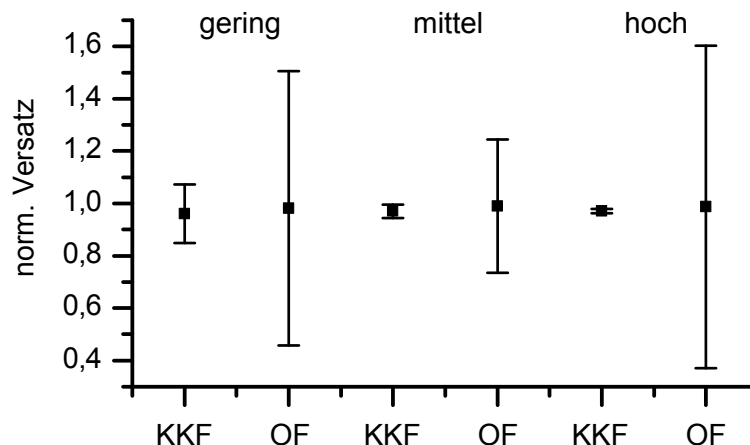


Abb. 2: Auswertung der Simulierten Daten ohne Filterung (Ortsfilter: 8. Koeffizient - $g_p=16$ Pixel)

Ansatz zur verbesserten Versatzschätzung

Bei Analyse von Ortsfiltersignalen ergeben sich zwei signifikante Eigenschaften, die die Genauigkeit der Versatzschätzung negativ beeinflussen. Einerseits ist die Amplitude des Ortsfiltersignals ein wichtiger Indikator für die Dominanz eines Fourierkoeffizienten und damit für Verlässlichkeit des nutzbaren Schätzwertes. Andererseits ergibt sich, dass die Änderung der Signalamplitude und die absolute Phasenlage durch die Änderung der spektralen Eigenschaft hervorgerufen werden, welches mit einem „Herauslaufen“ einzelner Partikel aus der beobachteten Szene bzw. ein „Hereinlaufen“ dieser zusammenhängt. Angegeben wurde dies bereits von (Fleet, Jepson et al. 1991) als Singularitäten in den Amplitude der Koeffizienten. In der Literatur zu Ortsfiltermesssystemen ist die Eigenschaft als Phasensprung im Signal bekannt (Bergmann 2010, Menn 2010, Schaeper 2013) und wird bei kommerziellen Systemen beispielsweise mittels Plausibilitätsprüfung (Albrecht and Kröger 1981) unterdrückt.

Amplitudeninformation

Allgemein ist bekannt, dass die Amplitude nicht in die Frequenzschätzung eingeht (vgl. Cramer Rao Lower Bound in der Frequenzschätzung (Albrecht, Borys et al. 2003)). Dennoch ist für Ortsfiltersignale zu beobachten, dass bei Amplituden nahe „0“ auch gute (SNR) nicht ausreichen, um verlässliche Geschwindigkeitsinformationen im Signal zu detektieren. Vorzugsweise ist die Amplitude im Bereich der Phasensprünge gering, da das Ortsfiltersignal kontinuierlich von einem in einen anderen Phasenzustand übergeht. Dies führt zu erheblichen Phasen- und damit Frequenzunsicherheiten im Ortsfiltersignal. In Abbildung 3 ist dies anhand der simulierten Daten (hohe Dichte) exemplarisch dargestellt.

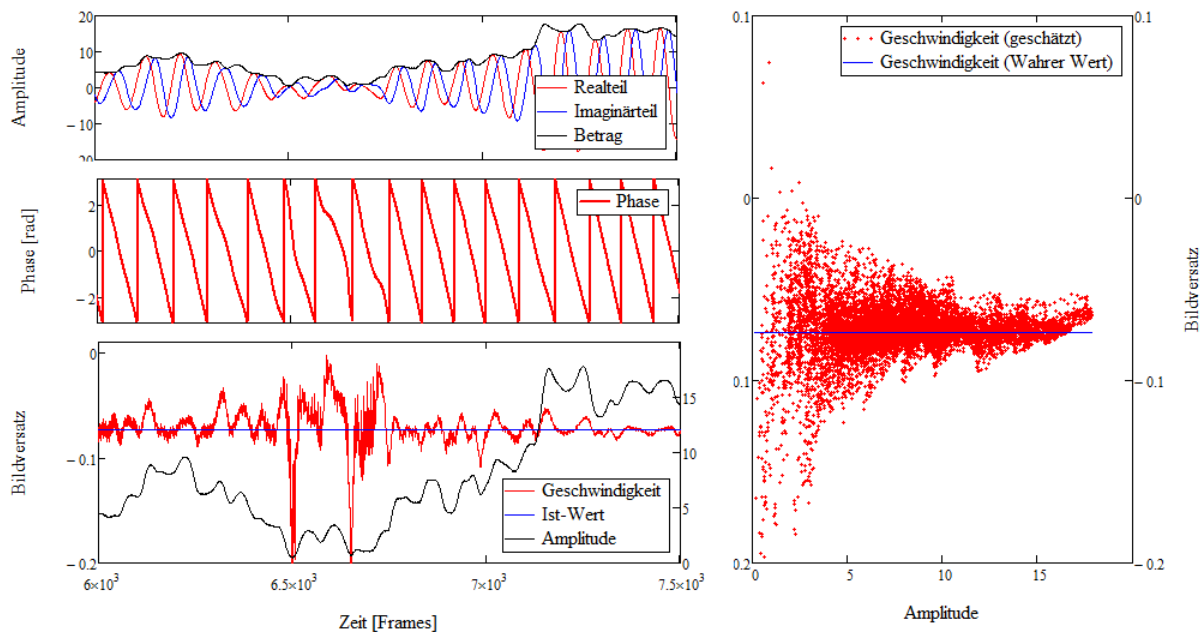


Abb. 3: Simuliertes komplexes OF-Signal mit Amplitude bei hoher Partikeldichte (links oben), Signalphase (links Mitte), Versatzschätzung aus der Phasendifferenz ohne Filterung und Amplitudenfunktion (links unten), Geschätzter Versatz aufgetragen über die Signalamplitude (rechts)

Zu erkennen ist, dass bei Einbruch der Signalamplitude in der Phasendifferenz zwischen zwei Messwerten (links unten) erhebliche Schwankungen auftreten. Die Abhängigkeit von der Signalamplitude ist auf der rechten Seite in Abbildung 3 dargestellt und zeigt, dass neben der oben genannten Plausibilitätsprüfung das Einführen einer Amplitudenschwelle eine Möglichkeit ist, um fehlerbehaftete Schätzungen effizient zu unterdrücken. Dennoch ändert sich die Phasenlage des Ortsfiltersignals bei Phasenänderungen kontinuierlich über viele Messwerte hinweg, so dass in einem weiten Signalbereich keine zuverlässige Schätzung möglich ist. Weiterhin ist in Abb. 3 rechts zu erkennen, dass auch bei hohen Amplituden (z.B. >15) systematische Fehler in der Versatzschätzung auftreten können

Detektion von Phasensprüngen (Vorverarbeitung)

Günstig wäre es, Phasenänderungen im Signal auf einen Messwert zu reduzieren und gleichzeitig zu detektieren. Phasensprünge in der Ortsfiltertechnik entstehen aufgrund der Änderung der spektralen Eigenschaften (Amplitude und Phase) der Bildinformationen. Folglich sollten diese zeitweise stabilisiert werden. Eine Möglichkeit ist, den zu wichtenden Bildausschnitt mitzuführen. Dies kann erreicht werden, wenn die Pixelwerte von den Seiten des Bildes her bis zu Signifikanzpunkten (Schwellwerte, Nullstellen, Maximalwerte) auf einen konstanten Wert gesetzt werden. Sobald sich ein Signifikanzpunkt aus dem Bildbereich herausbewegt hat wird ein neuer Signifikanzpunkt ermittelt. Dies bedingt zwar die Änderung der spektralen Eigenschaft der Abbildung, jedoch nur zu einem Zeitpunkt. Gleichzeitig kann die Änderung detektiert und der Ortsfiltermesswert als unsicherer Wert verworfen werden.

Als Beispiel dient der Verlauf eines Ortsfiltersignals aus der geringen Partikeldichte (Abb. 4). Das Hinein- bzw. Herauslaufen von Einzelpartikeln kann anhand einer entsprechenden Schwelle detektiert werden. Sind die Zeitpunkte der Sprünge bekannt (Senkrechte Linien in Abb.4 rechts), können die Ergebnisse zu diesen Zeitpunkten verworfen oder durch andere valide Messwert ersetzt werden.

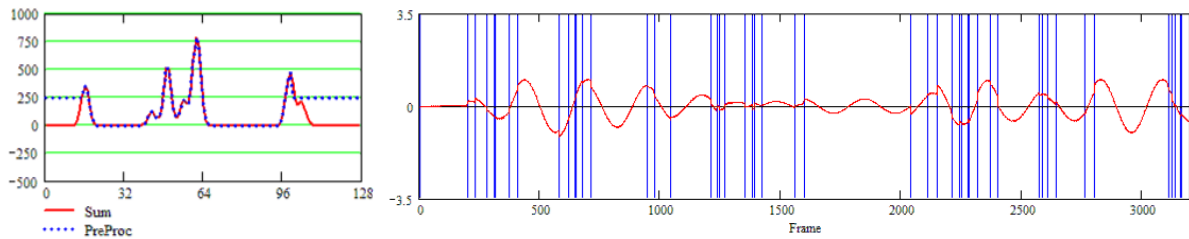


Abb. 4: Detektion der Änderung der spektralen Eigenschaft anhand einer Schwelle (links), Beispielsignal nach Detektieren von Phasensprüngen und Ausblenden der Randbereiche (rechts)

Wird nun nach jedem Sprung versucht, die spektrale Eigenschaft nahezu konstant zu halten, entsteht ein abschnittsweise harmonisches Signal mit konstanter Amplitude (Signal in Abb. 4 rechts).

Ergebnisse und Diskussion

Die Auswertung wurde unter Zuhilfenahme der beschriebenen Methoden auf die simulierten Daten angewendet. In Abbildung 5 sind die gleichen Daten wie in Abbildung 3, jedoch mit der Stabilisierung der Fourierkoeffizienten dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Amplitudenfunktion, und damit der Fourierkoeffizient, abschnittsweise zwischen den Sprüngen konstant ist (Abb. 5 links oben und links unten). Die Signalphase ist ebenfalls abschnittsweise linear (links Mitte). Die Unsicherheit der Versatzzschätzung ist weiterhin von der Amplitude abhängig, jedoch sind die Schwankungen wesentlich geringer. Die Unsicherheiten in Abb. 5 sind auf die Diskretisierung der simulieren Bilder zurückzuführen, die in Abb. 3 von den Unsicherheiten durch Phasensprünge überdeckt werden. Sehr deutlich wird die Verbesserung in Abb. 5 rechts. Die Genauigkeit ist zwar weiterhin Amplitudenabhängig, jedoch in wesentlich geringerem Maße und es treten keine systematischen Fehler für hohe Amplituden auf.

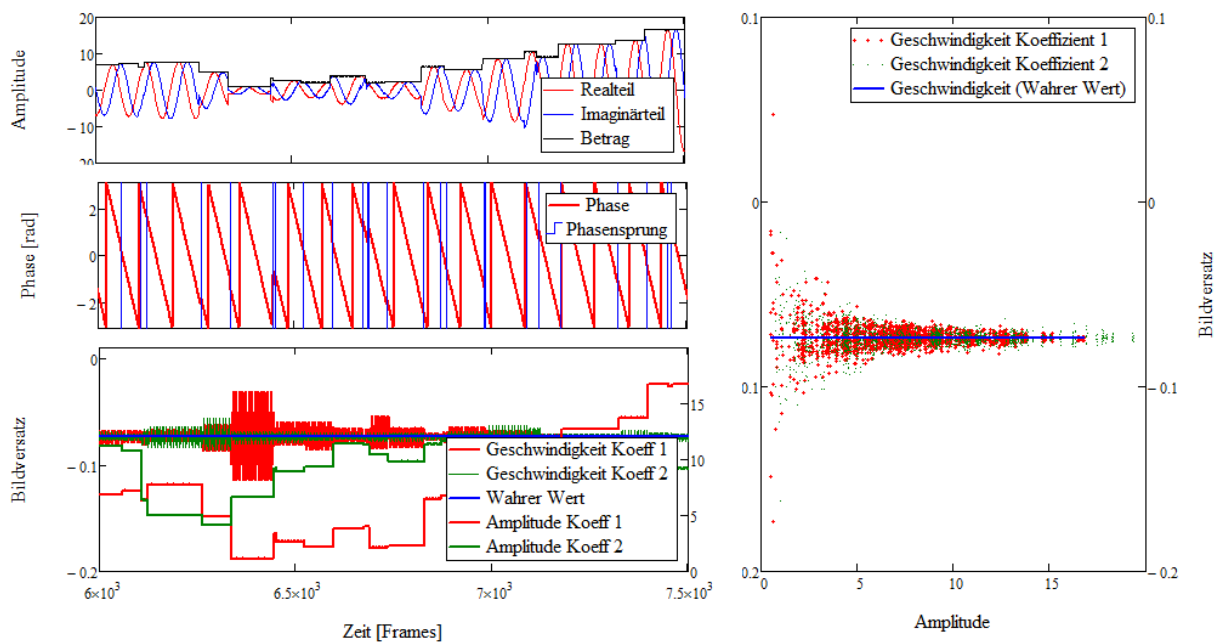


Abb. 5: Simuliertes komplexes OF-Signal mit Amplitude bei hoher Partikeldichte (links oben) und Stabilisierung des verwendeten Fourierkoeffizienten, Signalphase (links Mitte), Versatzzschätzung aus der Phasendifferenz ohne Filterung und Amplitudenfunktion (links unten), Geschätzter Versatz aufgetragen über die Signalamplitude (rechts)

Im Vergleich zur Korrelation sind die Ergebnisse nochmals in Abbildung 6 für unterschiedliche Partikeldichten dargestellt.

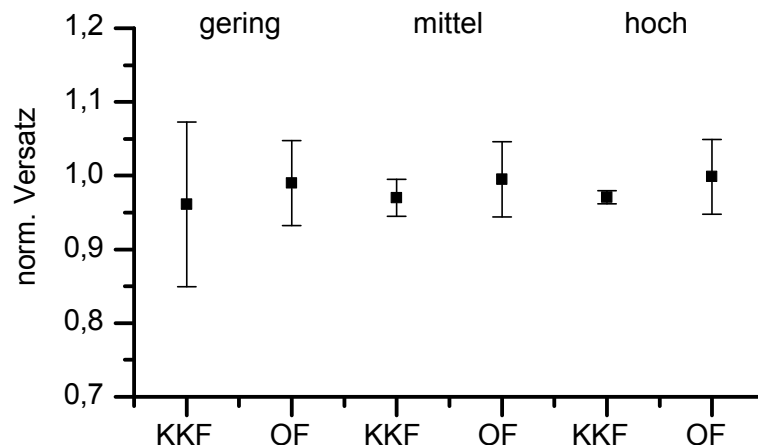


Abb. 6: Auswertung der Simulierten Daten mit Filterung (Ortsfilter: 8. Koeffizient - $g_p=16$ Pixel)

Vergleichend zu den ungefilterten Ergebnissen (Abbildung 2) sind die Schwankungsbreiten der Ortsfilterergebnisse, basierend auf einem Fourierkoeffizienten, deutlich reduziert und unabhängig von der Partikeldichte. Für die mittlere Dichte ergibt sich beispielsweise eine Verringerung der einfachen Standardabweichung von $\sigma_s / s = 0,25$ zu $\sigma_s / s = 0,05$. Damit ist eine Verringerung der Schwankungsbreite um fast eine Größenordnung möglich.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre Förderung des DFG-Projektes DA600/4-1 und KU1221/17-1: „Geschwindigkeitsschätzung für dünn besetzte Bildsequenzen“.

Literatur

- Aizu, Y. and T. Asakura (2006). Spatial Filtering Velocimetry Fundamentals and Applications. Berlin Heidelberg, Springer Science & Business.
- Albrecht, H.-E., M. Borys, N. Damaschke and C. Tropea (2003). Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Berlin Heidelberg New York, Springer-Verlag.
- Albrecht, H.-E. and W. Kröger (1981). Verfahren zur Auswertung von Signalen bei Doppler-Anemometern.
- Bergmann, A. (2010). Verbesserung des Ortsfrequenzfilterverfahrens zur kamerabasierten Messung der translatorischen Geschwindigkeit bewegter Objekte Doctoral, Ruhr Universität Bochum.
- Fleet, D. J., A. D. Jepson and M. R. M. Jenkin (1991). "Phase-based disparity measurement." CVGIP: Image Understanding **53**(2): 198-210.
- Hosokawa, S., T. Matsumoto and A. Tomiyama (2012). Tomographic Spatial Filter Velocimetry for Three-Dimensional Measurement of Fluid Velocity. 16th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal.
- Menn, I. (2010). Optische Messung der Fließgeschwindigkeit von Erythrozyten zur Erfassung der Mikrozirkulation, Universität Rostock.
- Schaeper, M. (2013). Mehrdimensionale Ortsfiltertechnik. Dissertation, University of Rostock.
- Schaeper, M. and N. Damaschke (2012). Systemtheoretische Betrachtung der Bewegungsschätzung in PIV Bildfolgen. 20. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Rostock.
- Schaeper, M., V. Kühn and N. Damaschke (2011). Particle image velocimetry by using optical spatial filtering method. 9th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Kobe, Japan.