

SYSTEMTHEORETISCHE BETRACHTUNG DER BEWEGUNGSSCHÄTZUNG IN PIV BILDFOLGEN

SYSTEMTHEORETICAL STUDY OF MOTION ESTIMATION IN PIV IMAGE SEQUENCES

Schaeper, M., Damaschke, N.

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

PIV, Ortsfiltervelocimetrie, Korrelation

PIV, Spatial filtering velocimetry, Correlation

Zusammenfassung

In der abbildenden optischen Strömungsmesstechnik wird die Bewegung der in einer Strömung mitgeführten Partikel (Tracer) mittels der Particle Image Velocimetry (PIV) oder Particle Tracking Velocimetry (PTV) bestimmt. Zur Schätzung des Versatzes bzw. der Bewegung in aufgenommenen Bildfolgen wird vorwiegend die Kreuzkorrelation zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern verwendet. Neben der rechenaufwändigen direkten Berechnung der Kreuzkorrelation besteht die Möglichkeit der konjugiert komplexen Multiplikation mittels der FFT bestimmten Bildspektren. Die anschließende Rücktransformation ergibt den Peak, der die Information über den Versatz wiedergibt. Eine zweite Möglichkeit ist, die aufeinanderfolgenden Bilder zunächst zu überlagern und dann in den Bildbereich zu transformieren. Damit erhält man eine Streifenstruktur anhand derer ebenfalls die Bewegung geschätzt werden kann. Die Rücktransformation ergibt die Autokorrelationsfunktion der überlagerten Bilder. Zur weiteren Reduktion des Rechenaufwandes und der Komplexität wird die Anwendung der Ortsfiltervelocimetrie diskutiert. Die Gewichtung bzw. Multiplikation und Summation von Pixelgrauwerten ist mit der Verwendung eines einzelnen Fourierkoeffizienten vergleichbar. Aus der Frequenz des daraus entstehenden Ortsfiltersignals kann ebenfalls die Bewegung geschätzt werden. Der Artikel vergleicht die theoretischen Zusammenhänge der drei genannten Prinzipien.

Einleitung

In der optischen Strömungs- und Geschwindigkeitsmesstechnik spielt die möglichst präzise Schätzung des Versatzes von Partikeln innerhalb eines Bildausschnitts eine zentrale Rolle. Gewichtet mit der Framerate oder bezogen auf den zeitlichen Aufnahmeabstand wird daraus die Bewegungsgeschwindigkeit ermittelt. Die Schätzung der Partikelbewegung kann über verschiedene Verfahren erfolgen. Für mehrdimensionale Bewegungsanalysen wird die mittlerweile etablierte Particle Image Velocimetry (PIV) verwendet, die in den letzten Jahren durch die Particle Tracking Velocimetry (PTV) kommerziell erweitert wurde (Raffel et al. 2007). Daneben existieren weitere Verfahren zur Bewegungsschätzung, wie der optische Fluss (Horn et. al. 1981), Youngs fringes (Dudderar et. al. 1977) und die Ortsfiltermesstechnik (Aizu et. al. 2006).

Der vorliegende Beitrag soll drei Vorgehensweisen zur Bewegungsbestimmung aus zeitlich hochaufgelösten Bildfolgen (PIV-Technik, Bildüberlagerung und Ortsfiltertechnik) systemtheoretisch gegenüberstellen und vergleichen. Die drei Messtechniken basieren alle auf dem Verschiebungssatz der Systemtheorie im Frequenzbereich, unterscheiden sich jedoch erheblich in Komplexität und Rechenaufwand für die Geschwindigkeitsschätzung. Gerade im Bereich der zeitaufgelösten Messungen von 100Hz bis mehreren kHz Framerate ist der Aufwand für die Geschwindigkeitsschätzung aus den Bildern von zentraler Bedeutung. Bei derzeitigen PIV und PTV Systemen ist die Bildübertragung und Auswertung um Größenordnungen langsamer als die Bildaufnahme. Bei verfügbaren kommerziellen Geräten stehen Mess- und Auswertzeit für zeitaufgelöste Messungen teilweise im Verhältnis 1:10⁵. Grund hierfür sind die relativ komplexen Analysemethoden, wie zweidimensionale Fouriertransformation, Korrelationsanalyse oder Feature Tracking. Mit Hilfe der Systemtheorie bieten sich hier Ansätze, die Bewegungsschätzung zu vereinfachen bzw. bereits in die Signalgenerierung zu integrieren.

Bewegungsschätzung in Bildfolgen

Im Folgenden wird eine zeitlich hochaufgelöste Bildfolge mit Bildern der Größe $P \times P$ Pixel betrachtet. Die Anzahl P der Pixel bezieht sich dabei auf die Größe der Abfragefenster (interrogation areas) in die das Gesamtbild eingeteilt wird. Die Bildfolge besteht dabei aus N Bildern i_n mit dem Bildindex n . Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der drei verwandten Algorithmen zur Schätzung der Bewegung innerhalb von Bildfolgen.

Kreuzkorrelation

In der Partikel Image Velocimetrie (PIV) wird vorwiegend die Kreuzkorrelation mit nachfolgender Peak-Detektion zur Versatzbestimmung und anschließender Geschwindigkeitsschätzung verwendet.

Auf der linken Seite in Abbildung 1 ist das Vorgehen der, klassischerweise bei der PIV-Technik, verwendeten Kreuzkorrelation veranschaulicht. Hierzu wird jedes einzelne Bild i_n mittels der Fouriertransformation

$$\mathfrak{F}\{i_n\} = \underline{I}_n = \iint i_n(x,y) \exp(-jk(lx + my)) dx dy = \iint i_n(x,y) \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}) d\mathbf{p} \quad (1)$$

in den Bildbereich überführt. Die Ortskreisfrequenz k ist über die Richtungen l und m mit dem Ortskreisfrequenzvektor \mathbf{k} mit

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

verknüpft. Die Parameter μ und ν sind die Ortsfrequenzen und können als Indexwerte des Spektrums von $\nu, \mu = 0, 1, \dots, P-1$ genutzt werden.

Durch die konjugiert komplexe Multiplikation der Spektren zweier aufeinander folgender Bilder i_{n-1} und i_n ergibt sich das komplexe Kreuzleistungsdichtespektrum \underline{S}

$$\underline{S} = \underline{I}_{n-1}^* \underline{I}_n = I_{n-1} I_n \exp\left[j(\varphi_n(k_x, k_y) - \varphi_{n-1}(k_x, k_y))\right] \quad (3)$$

in welchem die spektral abhängige Phasendifferenz $\Delta\varphi(k_x, k_y) = \varphi_n(k_x, k_y) - \varphi_{n-1}(k_x, k_y)$ im Argument enthalten ist. Nach dem Verschiebungssatz gibt eine frequenzproportionale Phasendifferenz $\Delta\varphi = k\Delta x$ die Information über den Versatz wieder. Interpretiert werden kann dies als ein gleichmäßiges Verschieben der Phasen aller Frequenzen was in der Rücktransformation einer Translation entspricht. Für einen zweidimensionalen Bildversatz ergibt sich

$$I_n = \mathfrak{T}\{i_n\} = \mathfrak{T}\{i_{n-1}\} \exp(-j\mathbf{k} \cdot \Delta\mathbf{p}) = I_{n-1} \exp(-j\mathbf{k} \cdot \Delta\mathbf{p}) \quad ; \quad \Delta\mathbf{p} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (4)$$

wobei $\Delta\mathbf{p}$ der Verschiebungsvektor zwischen den Bildern ist.

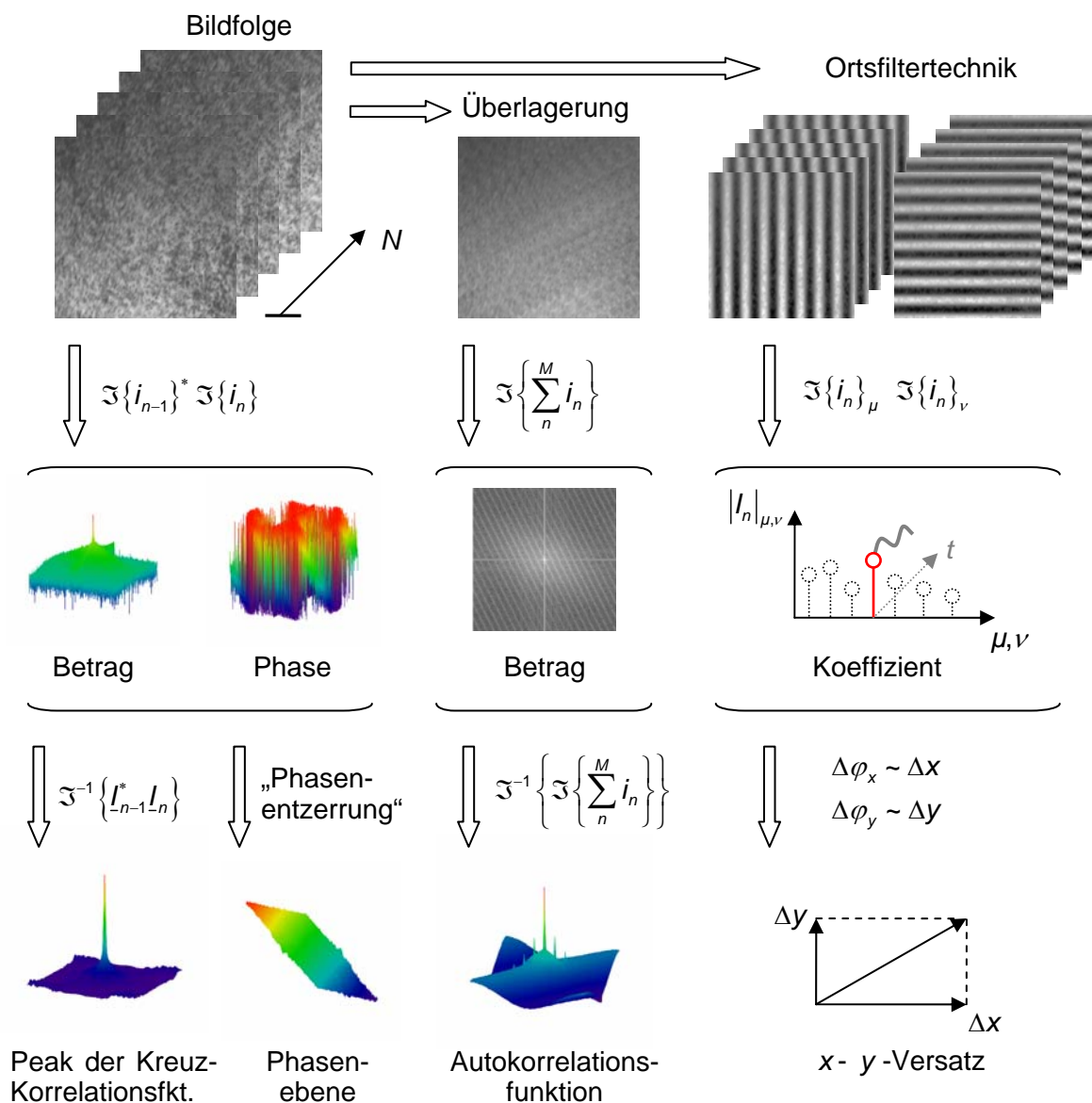


Abb. 1: Gegenüberstellung zur Schätzung des Versatzes innerhalb einer Bildfolge

Zu Beginn der Entwicklung der PIV-Technik wurde die Bedeutung dieses Phasenversatzes für die Geschwindigkeitsschätzung erkannt (Gorecki 1994) und mittlerweile wieder in einigen Algorithmen genutzt (Charonko et al. 2011). Bei Entzerrung, bzw. zweidimensionaler Korrektur der 360° Phasensprünge, erhält man eine Ebene die in die Bildversatzrichtung geneigt ist und je nach Gradient die Größe der zweidimensionalen Verschiebung wiedergibt

$$\Delta \mathbf{p} = \text{grad}(\Delta \varphi(k_x, k_y)) = \text{konst} \quad . \quad (5)$$

Die Rücktransformation der konjugiert komplexen Multiplikation aus Gleichung (3) ergibt den Peak der eigentlichen Kreuzkorrelationsfunktion. Auch die Verschiebung dieses Peaks der Kreuzkorrelationspeaks kann bekanntermaßen mittels des Verschiebungssatzes interpretiert werden. Ersetzt man in Gleichung (3) I_n durch Gleichung (4) ergibt sich, unter der Bedingung versetzter aber sonst gleicher Bildinhalte, die um $\Delta \mathbf{p}$ verschobene Autokorrelationsfunktion des Bildes I_{n-1} .

Bei der zeitaufgelösten PIV - Technik mit hohen Frameraten ist die aufwendige Kreuzkorrelation oder Gradientenschätzung der Phaseebene nicht mehr echtzeitfähig. Im Wesentlichen ist dies durch die Fouriertransformationen der Bilder i_{n-1} und i_n bedingt. Die Komplexität kann dabei mit $O(NP^4)$ für die klassische DFT und mit $O(NP^2 \log_2 P)$ für FFT-Algorithmen angegeben werden (Jähne 2005).

Bildüberlagerung

Eine Möglichkeit, den hohen rechentechnischen Aufwand für die Auswertung von zeitaufgelösten Bildern zu reduzieren, ist die überlagerte Aufnahme von mehreren zeitlich versetzten Bildern $i = 1, 2, \dots, M < N$ (Horn 2006). Die mittlere Spalte in Abbildung 1 zeigt diese Überlagerung aufeinander folgender Bilder. Diese Superposition kann entweder durch mehrfaches Belichten des Sensorchips oder durch Summation der Pixelgrauwerte während des Postprozessings erreicht werden (Raffel et al. 2007).

Bei gradlinig gleichförmigen Bewegungen innerhalb des Abfragefensters entstehen periodische Muster. Voraussetzung hierfür ist, dass sich die Struktur mindestens um das integrale Längenmaß zwischen den Belichtungen bewegt. Im Betragsspektrum entstehen hohe spektrale Anteile senkrecht zur Bewegungsrichtung (siehe Abbildung 1). Bei konstant bleibender spektraler Charakteristik des bewegten Bildes kann die Überlagerung wiederum mittels des Verschiebungssatzes und den einzelnen Verschiebungen $\Delta \mathbf{p}, 2\Delta \mathbf{p}, \dots$ ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} \mathfrak{F} \left\{ \sum_n i_n \right\} &= \sum_n \mathfrak{F} \{ i_n \} \\ &= \mathfrak{F} \{ i_n \} + \mathfrak{F} \{ i_n \} \exp(-j \mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{p}) + \dots + \mathfrak{F} \{ i_n \} \exp(-j M \mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{p}) \quad . \quad (6) \\ &= \mathfrak{F} \{ i_n \} (1 + \exp(-j \mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{p}) + \exp(-j 2 \mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{p}) + \dots + \exp(-j M \mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{p})) \end{aligned}$$

Die Fouriertransformation des ersten Bildes wird mit der Reihe der Exponentialfunktionen gewichtet. Diese ergibt in Bewegungsrichtung eine periodische Peak-Funktion wobei die Schärfe der Peaks mit ansteigender Zahl der Bilder M zunimmt und die Peakabstände direkt proportional dem Versatz sind. Das Spektrum der Exponentialfunktionen ist senkrecht zur Bewegungsrichtung konstant, da die spektrale Charakteristik zeitunabhängig ist. Zu erkennen ist dies aus dem Skalarprodukt zwischen \mathbf{k} und $\Delta \mathbf{p}$ in Gleichung (6).

Für sehr viele überlagerte Bilder kann die Mehrfachbelichtung als äquidistante Abtastung des kontinuierlichen Prozesses der Bildverschiebung aufgefasst werden. Diese diskrete periodi-

sche zeitliche Abtastung bedingt ein diskretes Spektrum in Bewegungsrichtung. Die Periodizität des Spektrums ist durch die örtliche Abtastfrequenz des ersten Bildes $\Delta \mathbf{p} = \mathbf{v} \Delta t$ gegeben, und somit bei konstantem Δt ein Maß für den Geschwindigkeitsvektor dieses Bildes. Eine mögliche Auswertung ist die Lokalisierung der Streifen, welche in (Horn 2006) mittels der Radontransformation erfolgte. Eine zweite Möglichkeit ist die Rücktransformation des Leistungsdichtespektrums zur Bestimmung der Autokorrelationsfunktion der überlagerten Bilder. Hier kann der Betrag des Versatzes aus dem Abstand der Peaks geschätzt werden. Vorteil der Bildüberlagerung ist die Reduzierung der Komplexität und des Rechenaufwandes bei hohen Frameraten der Ordnung $O(NP^2 \log_2(P)/M + P^2)$. Die Summation der Pixel zur Erzeugung des Überlagerungsbildes kann durch Mehrfachbelichtung direkt auf dem Sensor erfolgen ($O(NP^2 \log_2(P)/M)$). Allerdings liefert die Bildüberlagerung dann wieder einen integralen Wert des mittleren Versatzes zwischen den Einzelbildern, was nahezu der klassischen PIV Doppelbildtechnik zwischen dem ersten und letzten Bild entspricht. Weiterhin basiert die Bildüberlagerung auf gradlinig gleichförmigen Bewegungen während der Mehrfachbelichtungen. Örtliche und zeitliche Geschwindigkeitsgradienten gehen systembedingt mit einer Reduzierung der Schätzgenauigkeit ein. Dementsprechend kann die Bildüberlagerung nur sehr bedingt für die zeitaufgelöste Messungen dynamischer Prozesse mit hohen Frameraten eingesetzt werden.

Ortsfiltertechnik

Die Ortsfiltermesstechnik als drittes Verfahren kann ebenfalls zur kontinuierlichen Bestimmung des Versatzes innerhalb einer aufgenommenen Bildreihe verwendet werden. Hierzu wird jedes Abfragefenster mit einer gitterförmigen Struktur überlagert und das Ergebnis zu einem Signalwert summiert.

Auf der rechten Seite in Abbildung 1 ist das Vorgehen nach dem Ortsfiltermessprinzip dargestellt. Dabei wird die vorliegende Intensitätsverteilung i_n mittels einer oder mehrerer Gitterfunktionen g nach

$$s_n = \iint i_n(x, y) g(x, y) dx dy \quad (7)$$

gewichtet und anschließend zu einem Signalwert s_n des Ortsfiltersignals summiert. Wird dieses Vorgehen mit der Fouriertransformation aus Gleichung (1) verglichen, ist durch die Fouriertransformation eine Wichtung der Intensitätsverteilung mittels Kosinus- und Sinustermen gegeben.

$$\underline{I}_n = \iint i_n(x, y) \exp(-j \mathbf{k} \cdot \mathbf{p}) dx dy = \iint i_n(x, y) [\cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}) - j \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{p})] dx dy \quad (8)$$

Bei festem Ortskreisfrequenzvektor $\mathbf{k} = konst$, ergibt sich für einen einzelnen spektralen Koeffizienten mit festgelegtem Ortsfrequenzindexpaar (μ, ν)

$$(\underline{I}_n)_{\mu, \nu} = \iint i_n(x, y) [\cos(2\pi(\mu x + \nu y)) - j \sin(2\pi(\mu x + \nu y))] dx dy \quad (9)$$

Real- und Imaginärteil dieses einzelnen spektralen Anteils bzw. komplexen Fourierkoeffizienten enthalten die zeitlich orthogonalen Signalwerte des orthogonalen Ortsfilterspaares

$$\begin{aligned}
s_{n,\cos} &= \operatorname{Re}\{(L_n)_{\mu,\nu}\} = \iint i_n(x,y) \cos(\mathbf{k}_{\mu,\nu} \cdot \mathbf{p}) \, dx \, dy \\
s_{n,\sin} &= \operatorname{Im}\{(L_n)_{\mu,\nu}\} = \iint i_n(x,y) \sin(\mathbf{k}_{\mu,\nu} \cdot \mathbf{p}) \, dx \, dy
\end{aligned} \tag{10}$$

Die Orientierung \mathbf{e}_{OF} und die Periode G dieses Ortsfilterpaars ergeben sich aus dem festgelegten Ortskreisfrequenzvektor zu

$$G = \frac{2\pi}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu^2 + \nu^2}} ; \quad \mathbf{e}_{OF} = \begin{pmatrix} l \\ m \end{pmatrix} ; \quad \mathbf{k} = k \begin{pmatrix} l \\ m \end{pmatrix} = 2\pi \begin{pmatrix} \mu \\ \nu \end{pmatrix} \tag{11}$$

Der Term $\sqrt{\mu^2 + \nu^2}$ kann als Gitterfrequenz des Ortsfilters verstanden werden.

Damit kann die Ortsfiltersignalbildung unter Verwendung harmonischer Gitterformen als Berechnung eines Fourierkoeffizienten mit den Indizes (μ, ν) des Bildes aufgefasst werden. Bei Bewegung des Bildes entsteht ein Ortsfiltersignal $s(t) = (s_1, s_2, \dots, s_n, \dots, s_M)$ welches der zeitlichen Änderung dieses Fourierkoeffizienten der Bilder entspricht. Bei Nutzung zweier orthogonaler Gitterfunktionen kann so von Abtastung zu Abtastung der Phasenversatz des Fourierkoeffizienten, bzw. die Phasendifferenz des Verschiebungssatzes bestimmt werden. Die Verschiebung in Gitterrichtung ergibt sich zu

$$\begin{aligned}
\Delta p &= \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu^2 + \nu^2}} \arg(\underline{s}_{n-1}^* \underline{s}_n) \\
&= \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu^2 + \nu^2}} \arg((L_{n-1})_{\mu,\nu}^* (L_n)_{\mu,\nu}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu^2 + \nu^2}} \arg(\underline{S}_{\mu,\nu})
\end{aligned} \tag{12}$$

wobei diese auch direkt aus einem Koeffizienten des Kreuzleistungsdichtespektrums nach Gleichung (3) berechnet werden kann.

Für den Spezialfall, von in x und y Richtung ausgerichteten Kosinus-Ortsfiltergittern (siehe Abbildung 1) ergeben sich die zeitabhängigen Signalwerte

$$s_{n,\cos,x} = \iint i_n(x,y) \cos\left(2\pi \frac{x}{G_x}\right) \, dx \, dy ; \quad s_{n,\cos,y} = \iint i_n(x,y) \cos\left(2\pi \frac{y}{G_y}\right) \, dx \, dy \tag{13}$$

Dabei werden zwei spektrale Koeffizienten jeweils auf den Achsen ($\mu_x > 0, \nu = 0$ und $\mu = 0, \nu_y > 0$) genutzt, die mit den Gitterperioden G_x und G_y korrespondieren. Werden zusätzlich zwei orthogonale Sinusgitter realisiert ergeben sich zwei Quadratursignale \underline{s}_x und \underline{s}_y die identisch zu den beiden zeitabhängigen Koeffizienten der Fouriertransformierten sind. Aus der Phasenänderung der Quadratursignale kann dann der Versatz zwischen zwei Bildern geschätzt werden.

$$\Delta \mathbf{p} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi} \begin{pmatrix} G_x \arg(\underline{s}_{x,n-1}^* \underline{s}_{x,n}) \\ G_y \arg(\underline{s}_{y,n-1}^* \underline{s}_{y,n}) \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi} \begin{pmatrix} \frac{1}{\mu} \arg(\underline{S}_{\mu,\nu=0}) \\ \frac{1}{\nu} \arg(\underline{S}_{\mu=0,\nu}) \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi} \begin{pmatrix} G_x \Delta \varphi_x \\ G_y \Delta \varphi_y \end{pmatrix} \tag{14}$$

Durch die Nutzung nur eines Fourierkoeffizienten zur Versatz- bzw. Geschwindigkeitsschätzung können die Rechenoperationen im Vergleich zur Fouriertransformation des Gesamtbildes erheblich reduziert werden.

Eine erste Möglichkeit ist, jeden Pixel des Bildes nach Gleichung (7) mit der Gitterfunktion zu wichten (Bilder rechts oben in Abbildung 1) und anschließend über alle Pixel zu summieren. Die Komplexität ist hierfür $O(NP^2)$. Als zweite Möglichkeit lassen sich die für die Wichtung notwendigen Multiplikationen bei Gittern in x - oder y - Richtung noch weiter reduzieren, indem alle Pixel einer Zeile (x) bzw. Spalte (y) zunächst aufsummiert, anschließend die Zeilen und Spaltensummen gewichtet und diese Werte dann wiederum aufsummiert werden. Die Komplexität des Algorithmus reduziert sich zwar nicht, aber $(P-1)^2$ Multiplikationen werden eingespart. Bei Pixel-Array-basierten zweidimensionalen Ortsfiltern ist dies das klassische Vorgehen zur unabhängigen Bestimmung der zwei Geschwindigkeitskomponenten. Eine dritte Möglichkeit wurde in Schaeper et. al. 2011 aufgezeigt. Mittels eines smart-pixel Sensors können die Zeilen- und Spaltensummen bereits auf dem Sensorchip gebildet werden. Es bleibt die Wichtung der integrierten Spalten und Zeilen und die Summation über die Zeilensummen und Spaltensummen. Dabei reduziert sich der Aufwand um den Faktor P und die Komplexität ist nur noch $O(NP)$. Bei großen Abfragefenstern oder Vollbildern kann die Rechenzeit so im Vergleich zur klassischen PIV Auswertung drastisch um mehrere Größenordnungen reduziert werden.

Der vorgestellte Zusammenhang zwischen Kreuzleistungsdichtespektrum und Ortsfiltertechnik basiert zunächst auf einem einfachen harmonischen Gitter $g_{\sin,\cos}(x, y)$. Reale Gitter, beispielsweise Rechteckgitter oder Gitter aufgrund der Pixelapertur, enthalten zusätzlich weitere Harmonische. In allen Fällen werden im Ortsfiltersignal diese weiteren Harmonischen erzeugt, wobei die Amplituden über die spektrale Charakteristik des beobachteten Prozesses gewichtet mit der spektralen Charakteristik des Gitters gegeben sind.

Für jedes Gitter ergibt sich ein anderer frequenzproportionaler Phasenversatz, der wiederum wie in der PIV Technik als Phasenebene des Kreuzleistungsdichtespektrums interpretiert werden kann.

Wichtig ist hervorzuheben, dass das Spektrum des Bildes im allgemeinen nicht konstant bleibt, da aufgrund der Bewegung Bildteile hinein- und hinauslaufen. Diese spektralen Änderungen bedingen die Unsicherheit bei der Versatzbestimmung, sowohl in der PIV (Unschärfe des Korrelationspeaks) als auch in der Ortsfiltertechnik (Phasensprünge im Zeitsignal)

Im Prinzip enthält jeder Koeffizient des Kreuzleistungsdichtespektrums die Information über den Bildversatz. Allerdings ist die Unsicherheit des Phasenversatzes aufgrund von Rauschen direkt abhängig von der Amplitude des jeweiligen spektralen Koeffizienten. Da die Ortsfiltertechnik im Idealfall nur einen Koeffizienten des Kreuzleistungsdichtespektrums nutzt ist die Wahl der Gitterkonstanten von entscheidender Bedeutung für die Schätzgenauigkeit. Idealerweise sollte eine Gitterkonstante gewählt werden, bei der der Fourierkoeffizient des Bildes vom Betrag her sehr groß ist und zeitlich möglichst stabil bleibt. Letzteres ist jedoch für Bilder mit stochastischen Grauwertverteilungen im Allgemeinen nicht zu realisieren, da es eine kohärente harmonische Struktur in der Bildfolge voraussetzt.

Zusammenfassung

Die vorgestellten unterschiedlichen Verfahren zur Versatz- und schließlich Geschwindigkeitsbestimmung in Bildfolgen (Kreuzkorrelation, Bildüberlagerung, Ortsfiltertechnik) sind systemtheoretisch sehr eng miteinander verwandt. Während die PIV-Technik die Gesamtkorrelation der Bilder über die Fouriertransformation ermittelt, wählt die Ortsfiltertechnik nur einen spektralen Anteil aus. Dies geht einerseits einher mit einer drastischen Reduzierung der

Komplexität und damit schließlich der Rechenzeit, andererseits ist die richtige Wahl des Koeffizienten entscheidend für die Genauigkeit der Geschwindigkeitsschätzung. Für die echtzeitfähige Verarbeitung von zeitaufgelösten Bildfolgen im kHz-Bereich ist eine weitere Vorverarbeitung durch z.B. smart-pixel Sensoren möglich.

Literatur

- Aizu, Y., Asakura, T., 2006: "Spatial Filtering Velocimetry (Fundamentals and Applications)", Springer-Verlag
- Charonko, J., Drew, B., Vlachos, P., 2011: „Spectral Phase Correlation for Particle Image Velocimetry (PIV)" PIV'11 - 9th International Symposium on Particle Image Velocimetry
- Duddera, T. D., Simpkins, P. G., 1977: „Laser speckle photography in a fluid medium", Nature, 270, pp. 45-47
- Gorecki, C., 1994: „Phase-correlation techniques for quasi real-time measurement of deformations with digital speckle interferometry", Applied Optics, 33, pp. 2933-2938
- Horn, B. K. P., Schunck, B. G., 1981: „Determining optical flow", Artificial Intelligence, 17, pp. 185-203
- Horn, J., 2006: „Zweidimensionale Geschwindigkeitsmessung textuierter Oberflächen mit flächenhaften bildgebenden Sensoren", Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)
- Jähne, B., 2005: „Digital Image Processing", Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Raffel M., Willert C. E., Wereley S.T., Kompenhans, J., 2007: „Particle Image Velocimetry, A practical Guide", Springer-Verlag
- Schaeper, M., Damaschke, N., Kühn, V., 2011: „Particle image velocimetry by using optical spatial filtering method" PIV'11 - 9th International Symposium on Particle Image Velocimetry