

Experimentelle Untersuchung zur Versatzbestimmung mittels der spektralen Analyse unterabgetasteter optisch gefilterter Bilder

Experimental investigation about the estimation of displacement by aims of spectral analysis of undersampled and optically filtered images

M. Schaeper*, **D. Franz[†]**, **V. Kühn[†]**, **N. Damaschke***

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

[†]Institut für Nachrichtentechnik, Richard-Wagner-Str. 31, 18119 Rostock (Warnemünde)

Spektrale Analyse, Partikel Position, optische beugungsbasierte Filterung

Spectral analysis, particle position, optical diffraction based filtering

Zusammenfassung

Bei der optischen Erfassung von Strömungen und der Untersuchung von Strömungsprozessen ist die bildhafte Aufnahme von in der Strömung mitgetragenen Partikeln und der Auswertung ihres Versatzes je Bild-Paar eine standardmäßige Anwendung. Zeitlich beschränkt sind diese Untersuchungen durch den notwendigen minimalen zeitlichen Abstand der aufgenommenen Bilder und des dazu verfügbaren Speichers der verwendeten High-Speed-Kamera. Die Bildaufnahmen bestehen aus spärlich verteilten Partikeln und einer Vielzahl dunkler Bereiche ohne Informationsgehalt. Daher besteht ein Ansatz in der spektralen Analyse dieser Bilder, um nur so viele Daten abspeichern zu müssen, wie für eine Rekonstruktion der Partikelpositionen erforderlich sind. Dies wurde beispielsweise durch Kostbade, Angierski et al. (2014) angeregt. Darauf folgend wurde die theoretische Möglichkeit einer optischen Tiefpassfilterung durch Angierski, Schaeper et al. (2015) beschrieben.

Aus diesen Erkenntnissen wurde ein Experimentalsystem entwickelt, womit eine beugungsbasierte Szene mittels einer Traversierung bewegt und der durch eine optische Blende im Fernfeld gefilterte Informationsgehalt aufgenommen wurde. Aus diesen optisch tiefpassgefilterten Bildern wurden die Partikelpositionen geschätzt. Der daraus ermittelte Bild-zu-Bild-Versatz wurde dann mit der Bewegungsreferenz verglichen.

Ergebnis ist die prinzipielle Anwendbarkeit einer optischen Tiefpassfilterung zur Verringerung des Datenaufkommens und damit der Ausdehnung des Aufnahmezeitraumes für die Untersuchung von Strömungen bei gleichem begrenztem Speicherbedarf einer High-Speed-Kamera. Bei den geschätzten Positionen wurde das aufgenommene Bild mit 41x41 Werten unterabgetastet, dies sind lediglich 2,6 % der eigentlichen Pixel-Informations-Menge des Bildes mit 256 x 256 Pixel.

Einleitung

Die Analyse von Bilddaten bei denen lichtstreuende Partikel verfolgt und aus deren geschätzten Versatz auf die vorliegende Strömung zurückgeschlossen wird, ist weit verbreitet (Raffel et al. 2018). Besonders bei beobachteten Szenen in denen nur verhältnismäßig we-

nige Tracer verwendet werden, liegt dann Bildmaterial in Form von Datenmenge vor, welches pro Bild nur eine geringe Informationsdichte aufweist. Die meisten Pixelwerte des digitalen Bildes tragen hierbei keine Information der beobachteten Streuzentren. An dieser Stelle lässt sich eine hohe „Komprimierbarkeit“ der Datenmenge vermuten, da die Information über den zu schätzenden Versatz nur aus den Positionen der in einer Strömung mitgetragenen Partikel erhalten wird.

Im DFG geförderten Projekt „Geschwindigkeitsschätzung dünn besetzter Bildsequenzen“ wurde hierbei auf die Anwendung der spektralen Analyse gesetzt (Kostbade, Angierski et al. 2014). Hierbei werden die aufgenommenen Bilder spektral unterabgetastet und durch geeignete Algorithmen auf die Position der Streuzentren zurückgeschlossen. Da dies in rein digitaler Form als Post-Processing realisiert wurde, stellte sich die grundlegende Frage, ob eine spektrale Filterung auch optisch realisiert werden kann. Eine theoretische Untersuchung anhand von beugungsbasierten Simulationen wurde von Angierski, Schaeper et al. (2015) vorgestellt.

Der folgende Beitrag zeigt die daran angeschlossene experimentelle Untersuchung einer optischen Tiefpassfilterung, die dabei erreichte Datenreduktion und die erreichte Genauigkeit der Versatzschätzung.

Spektrale Analyse zur Partikel-Positions-Schätzung

Bei der spektralen Analyse werden die aufgenommenen Bilddaten Fourier-transformiert und hier spektral tiefpassgefiltert. Dadurch wird die Information eines Partikels auf mehrere Pixel verteilt. Dadurch kann das Bild ohne Informationsverlust bezüglich der Partikelposition abgetastet werden. Durch die geeignete Wahl von Sinc-Funktionen zur Filterung (Mishali und Eldar 2011, Tur, Eldar et al. 2011, Angierski, Richter et al. 2012)

$$G(f_x, f_y) = \sum_{l_x} \alpha_{l_x} \text{sinc}(f_x \tau_x - l_x) \sum_{l_y} \beta_{l_y} \text{sinc}(f_y \tau_y - l_y) \quad (1)$$

kann so bei suffizienter Positionsschätzung eine enorme Reduktion der Datenmenge erreicht werden. Hierbei stellen τ_x und τ_y die Ausdehnung der Sensorfläche dar. Die Variablen l_x und l_y , der Mengen \mathbb{L}_x und \mathbb{L}_y , sind ganzzahlige Werte und stellen die Verschiebung der einzelnen sinc-Funktionen zueinander dar. Die Mindestanzahl an Abtastwerten hängt hierbei von der Anzahl der Partikel K innerhalb der beobachteten Szene ab und kann mittels

$$|\mathbb{L}_x| \geq 2K+1 \quad \text{und} \quad |\mathbb{L}_y| \geq 2K+1 \quad (2)$$

festgelegt werden.

Die spektrale Analyse kann beispielsweise genutzt werden, um die zu übertragende Datenmenge aus einer High-Speed-Kamera zu einem Auswerte-PC zu reduzieren. Der ermittelten Partikel-Positionen werden im Folgenden zu Bild-zu-Bild-Versätzen verrechnet. Dies erfolgt durch das Suchen eines im folgenden Bild am nächsten liegenden Punktes.

Experimentalsystem zur Untersuchung der optischen Filterung

Theoretische Vorbetrachtungen

Theoretisch kann eine einzelne punktförmige Lichtquelle mittels

$$\underline{E} = E_0 \exp(-j \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \quad (3)$$

beschrieben werden. Hierbei sind \mathbf{k} der Wellenzahlvektor und \mathbf{r} der Ortsvektor.

Die Überlagerung viele einzelner Lichtquellen ergibt dann

$$\underline{E}(x_0, y_0, 0) = \sum_{N_p} E_{0, n_p} \exp(-j \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_{n_p}) \quad (4)$$

Durch Anwendung des Huygens'schen Prinzips kann die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle beschrieben werden mit

$$\underline{E}(x, y, z) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} \underline{E}(x_0, y_0, 0) \underline{h}(x - x_0, y - y_0, z) dx_0 dy_0. \quad (5)$$

Die Übertragungsfunktion \underline{h} nach Kirchhoff im freien Raum ist (Goodman 2005)

$$\underline{h}(x, y, z) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{z}{\Delta r} \right) \frac{\exp(j k \Delta r)}{\Delta r} \quad \text{mit: } \Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + z^2}. \quad (6)$$

Hierbei geht aus jeder Lichtquelle E eine elektromagnetische Welle aus, die in den freien Raum divergiert. Ist das Verhältnis aus beleuchteter Struktur und hinreichender Entfernung ausreichend, befindet man sich im Fernfeld dieser Struktur (Hecht 2005) und eine Filterung im spektralen Bereich offeriert sich.

Aus optischen Simulationen heraus (Angierski, Schaeper et al. 2015) wurde das in Abbildung 1 dargestellte Schema zur Tiefpassfilterung im optischen Pfad mittels eines Transmissionsgitters entwickelt.

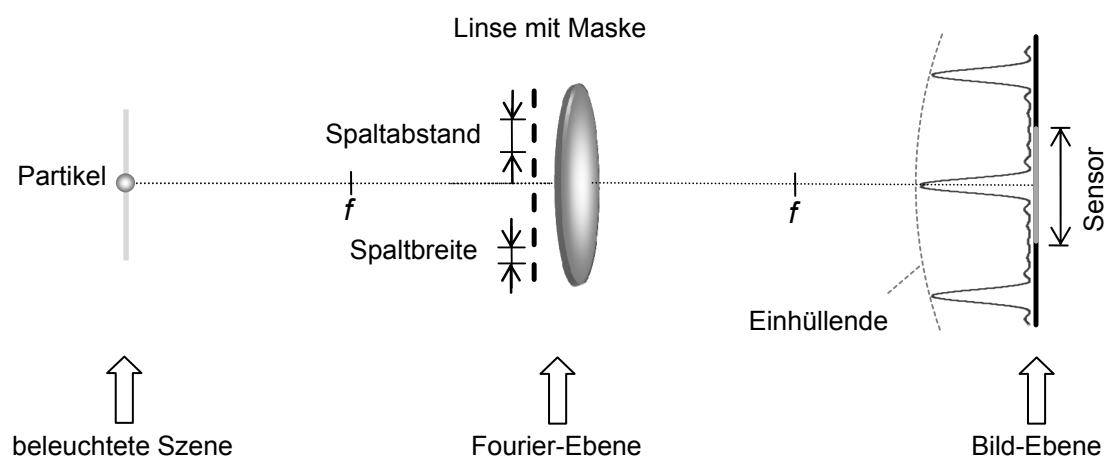


Abbildung 1: Schema zur optischen Tiefpassfilterung im optischen Pfad mittels eines Transmissionsgitters

Das von einem beleuchteten Partikel ausgehende Licht divergiert im freien Raum. Durch die Öffnung einer Transmissionsmaske wird das einfallende Licht gebeugt und es entsteht eine si-ähnliche Verteilung. Durch eine geeignete Anordnung mehrerer Öffnungen der Transmissionsmaske entsteht die von der spektralen Analyse geforderte Wiederholung der si-ähnlichen Verteilung (Hecht 2005). Eine tiefer gehende Beschreibung der simulierten Daten ist von Angierski, Schaeper et al. (2015) gegeben.

Praktische Umsetzung

Um die Idee der optischen Filterung und anschließender Unterabtastung praktisch zu realisieren, sind die Kriterien der phasengleich kohärenten angeregten Punktlichtquellen der beobachteten Szene, der referenzierten Bewegung dieser Szene, der Filterung der Verteilung der elektromagnetischen Wellen im Fernfeld, der Abbildung der zurücktransformierten Verteilung auf einen Sensor und die Abtastung der Intensitätsverteilung zu erfüllen. Das umgesetzte Experimentalsystem ist in Abbildung 2 dargestellt.

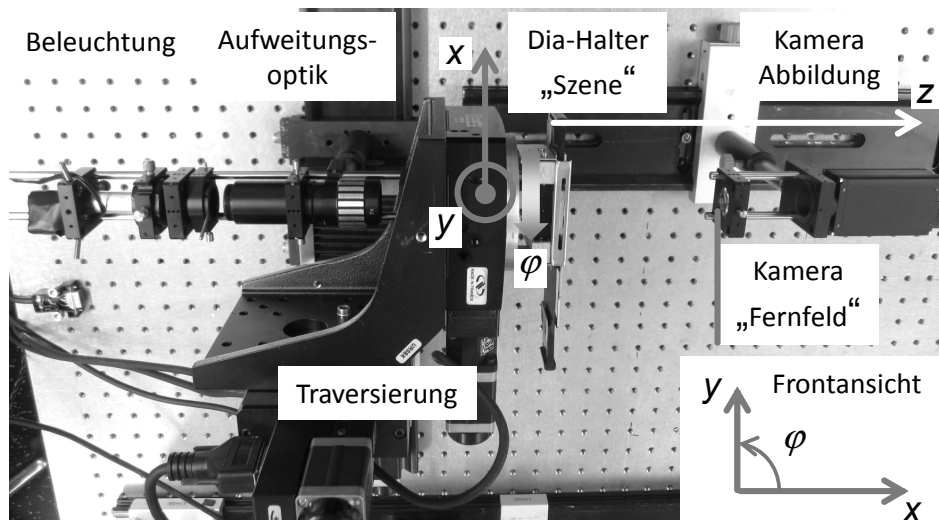


Abbildung 2: Experimentalsystem zur Aufnahme der Testbilder

Die Beleuchtung der Szene wurde mittels eines aufgeweiteten Lasers ($P_{\text{optisch}} = 1 \text{ mW}$, $\lambda = 532 \text{ nm}$) vorgenommen. Damit ist die phasengleiche kohärente Anregung einzelner Punktquellen der Szene gewährleistet.

Die Szene muss so gestaltet sein, dass eine stabile Phase der Lichtquellen gewährleistet werden kann. Naheliegend ist die Realisierung einer Szene in einer Ebene. Dies gelingt durch die Erstellung einer stochastischen „Punktwolke“ auf einem Dia-Film. Dieses Dia wurde in einen Halter geklemmt und mittels einer Traversierung (Wiederholgenauigkeit $1 \mu\text{m}$) örtlich versetzt, um eine geradlinige Bewegung der Partikel zu simulieren.

Die optische Filterung muss durch Strukturen im μm -Bereich erfolgen (Angierski, Schaeper et al. 2015, Hecht 2005). Dabei stellt sich die Fertigung solcher Filter beispielsweise aus metallischen Materialien als äußerst kostenintensiv dar. Somit wurde eine kostengünstige Variante zur Realisierung eines optischen Filters ebenfalls in Form von Dias verfolgt.

Zur Erzeugung der optischen Abbildung wurde eine asphärische Linse mit einer Brennweite von $f = 50 \text{ mm}$ verwendet. Hierbei wurde ein Ausschnitt der Szene auf 256×256 Pixel des Kamerasensors (Basler Scout sca1400-30fm) abgebildet, Vergrößerung $M \approx 1$.

Ergebnisse und Diskussion

Die Einzelbilder wurden mit einem örtlichen Versatz von $20 \mu\text{m}$ aufgenommen. Damit wurden je Test 1000 Bilder erzeugt. In Abbildung 3 ist die optische Tiefpassfilterung der beobachteten Szene mittels eines Rechteckgitters gezeigt. Hierbei hat die Filtermaske 11×11 Öffnungen, wobei die Vorgabe aus den Simulationen (Angierski, Schaeper et al. 2015) mit einer Größe der Öffnungen von $10 \mu\text{m}$ und einem Abstand der Öffnungen zueinander von $53,2 \mu\text{m}$ aufgrund der Auflösung der verwendeten Dias nicht eingehalten werden konnte. Die Öffnungen mussten größer gewählt werden, damit messbare Intensitäten auf dem Kamerasensor

abgebildet werden. Die Vergrößerung der Öffnungen auf $35\ \mu\text{m}$ verringert die eigentliche Filterwirkung, führt aber zu messbaren Intensitäten, die in Abbildung 3 b) und c) dargestellt sind.

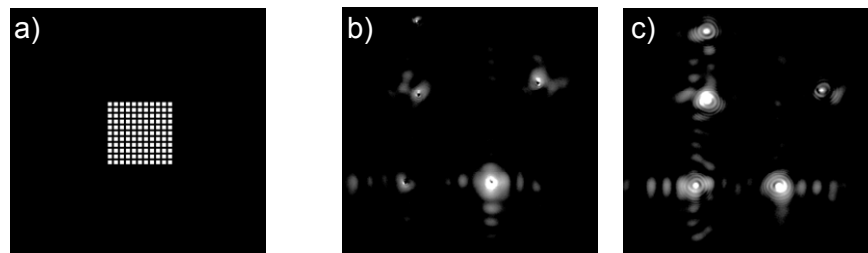


Abbildung 3: Experimentelle Aufnahmen: a) das verwendete Amplitudengitter zur optischen Tiefpassfilterung (Rechteckgitter), b) Aufnahme in Bildebene, c) leicht defokussierte Abbildung

Durch die Filterung in Abbildung 3 sind kreisförmige Strukturen in der tiefpassgefilterten Abbildung zu erkennen. Dadurch ist auf eine eher kreisförmige Form der Öffnungen im Filter-Dia zu schlussfolgern, die durch die beschränkte „Auflösung“ des Dias entsteht. Die optische Filterung (Abbildung 3 b)) ergab, dass in den Zentren der abgebildeten Partikel Auslöschungen entstehen. Diese konnten durch leichtes Defokussieren (Abbildung 3 c)) verringert werden.

Mittels der spektralen Analyse wurden die Aufnahmen der drei folgenden Tests vorgenommen:

- Digitale Filterung der abgebildeten Szene
- Tiefpassgefilterte Szene mittels Rechteckgitter
- Tiefpassgefilterte Szene mittels Rechteckgitter (leicht defokussiert)

Beispielbilder der Auswertung durch die spektrale Analyse sind in Abbildung 4 gegeben. Bei der digitalen Filterung werden die ungefilterten Bilder digital verarbeitet und dienen dem Vergleich zu den gefilterten Abbildungen.

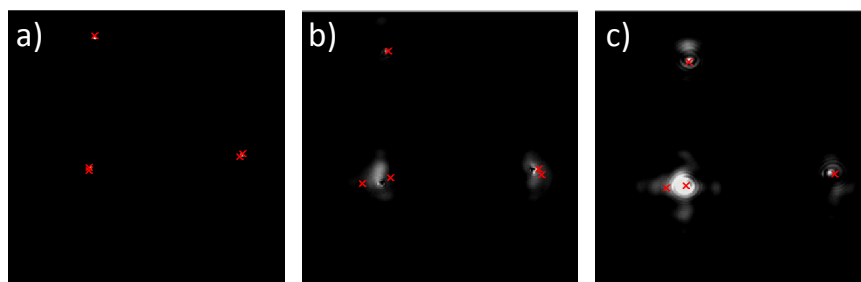


Abbildung 4: Mittels der spektralen Analyse geschätzte Partikelpositionen: aus der digitalen Filterung (a), im Vergleich zur optischen Filterung in der Bildebene (b) und leicht defokussiert (c)

Bei der Auswertung werden durch die spektrale Analyse für ein Streuzentrum mehrere Positionen (x) ermittelt. Dies ist darin begründet, dass für den verwendeten Algorithmus die Anzahl an vorhandenen Partikeln vorgegeben werden muss. Befinden sich weniger Partikel im Bild, werden zusätzliche Positionen meist mit geringeren Amplituden ermittelt. Zudem wurden ideale punktförmige Streuzentren und eine ideale Filterung angenommen.

Um die ermittelten Positionen zur eigentlichen Versatzzschätzung verwenden zu können, müssen diese Positionen lokal zu einer Partikelposition zusammengefasst werden. Hierzu wurde aus mehreren lokalen Positionen, in einem Umkreis von 50 Pixel, ein amplitudengewichteter Mittelwert gebildet. Die Ergebnisse aus den jeweils 1000 aufgenommenen Bildern

sind in Abbildung 5 dargestellt. Die linke Skala gibt den Versatz in μm und die rechte Skala den entsprechenden auf $20\ \mu\text{m}$ normierten Versatz. Dargestellt sind jeweils der Mittelwert und die einfache Standardabweichung. Für die mit dem Wort „ohne“ bezeichneten Messwerte wurde eine relativ offene Auswertung mit maximal 15 Pixeln zulässigen Versatz vorgenommen. Die Ergebnisse mit dem Wort „mit“ wurden durch Einschränkung der zu detektierenden Bewegungsrichtung (hier positive x - Richtung) und einem maximal zulässigen Versatz von 5 Pixeln erreicht. Annehmbare Ergebnisse werden demnach nur erzielt, wenn wie in diesem Fall die Bewegungsrichtung, in die Auswertung mit eingeht.

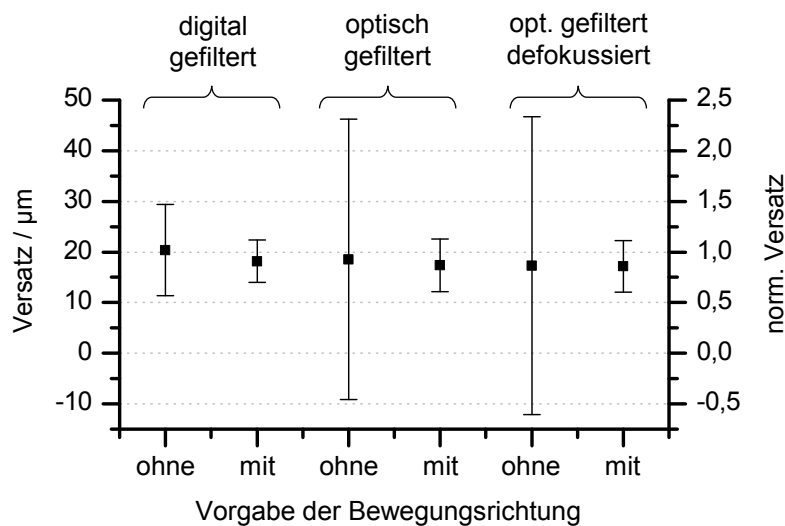


Abbildung 5: Ermittelter Versatz aus den Positionsschätzungen der spektralen Analyse.

Mit der Vorgabe des Versatzes um $20\ \mu\text{m}$ und bei der Pixelgröße von $6,45\ \mu\text{m}$, ergibt sich ein Bild-zu-Bild-Versatz der Abbildung von ca. 3,1 Pixel. Diese Vorgabe wird zwar mittels der digitalen Filterung erreicht aber mit den optisch gefilterten Bildern nicht, wobei aber eine Abweichung von beispielsweise 10 % lediglich eine Abweichung von $2\ \mu\text{m}$ bedeutet.

Zusammenfassung und Ausblick

Die spektrale Analyse ist ein gutes Werkzeug zur Datenreduktion bei dünn besetzten Bildszenen. Durch die Tiefpassfilterung wird die Bildinformation auf mehrere Pixel verteilt, womit nur noch wenige Pixel ausgelesen werden müssen. Im vorliegenden Fall wurden die Bilder mit 256×256 Pixeln lediglich mit 41×41 Werten unterabgetastet. Dies sind ca. 2,6 % der eigentlichen Datenmenge eines Bildes. Die Versatzschätzung anhand der durch die spektrale Analyse ermittelten Positionsdaten wurde experimentell bestätigt. Nachteilig wirkt sich die scheinbar hohe Unsicherheit der Versatzschätzung aus. Dies liegt zum einen an der naturgemäßen nicht idealen Abbildung der Punkte der Szene auf den Kamerasensor (digitale Filterung) und zum anderen an den nicht idealen Eigenschaften der Filter in Form von Dias. Hierbei mussten die Öffnungen des Filters vergrößert werden, dazu ist das Filmmaterial nicht 100 % Lichtundurchlässig. Hinzu kommen die Größenverhältnisse der experimentellen Untersuchung, diese befinden sich im μm -Bereich.

Neben den beschriebenen Amplitudenfiltern könnten auch optische Phasenfilter verwendet werden. Letzteres ist momentan industriell nicht lieferbar, da vorrangig eine punktförmige Lichtquelle auf mehrere Punkte verteilt werden soll und nicht wie im vorliegenden Fall die Intensität „verwaschen“ werden soll. Eine Einzelentwicklung solcher Phasenfilter würde erhebliche Kosten bedeuten.

Die Schätzung der eigentlichen Partikelpositionen ist im vorliegenden Fall gar nicht essenziell. Es geht eher um die Bild-zu-Bild-Versatzschätzung die auch mit gleichbleibenden Positionsschätzung mit gleichem statischem Fehler erfolgen kann. Das Potential für die Positionsschätzung ist bei weitem nicht ausgeschöpft. Zum einen kann die tatsächliche Filterfunktion in das Model zur Berechnung der Positionsdaten eingebunden werden. Zum anderen wurden ideale punktförmige Streuzentren als Partikel angenommen. Die Einberechnung der tatsächlichen Form der Partikel verbessert ebenfalls die Positionsschätzung und damit die Bild-zu-Bild-Versatzschätzung.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre Förderung des DFG-Projektes DA600/4-2 und KU1221/17-2: „Geschwindigkeitsschätzung für dünn besetzte Bildsequenzen“.

Literatur

Angierski A., Richter H., Kühn V., Damaschke N., 2012: "Extension of SoS Sampling Kernels for 2-D FRI Problem", Electronics Letters, 48, pp. 527-528

Angierski A., Schaeper M., Kostbade R., Kühn V., Damaschke N., 2015: "Untersuchung zur optischen Tiefpassfilterung für die Partikelpositionsschätzung bei Unterabtastung des Sensors und mittels spektraler Analyse, Fachtagung ‚Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik‘, Dresden

Goodman J. W. 2005: "Introduction to Fourier Optics", Roberts & Company

Hecht E., 2005: "Optik, 4. überarbeitete Auflage", München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH

Kostbade R., Angierski A., Schaeper M., Kühn V., Damaschke N., 2014: "Schätzung der Partikelposition mittels spektraler Analyse aus reduzierten Datenmengen", Fachtagung ‚Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik‘, Karlsruhe

Mishali M. und Eldar Y. C. 2011: "Sub-Nyquist Sampling: Bridging Theory and Practice", IEEE Signal Processing Magazine, 28, pp. 98-124

Raffel M., Willert C.E., Scarano F., Kähler C.J., Wereley S.T., Kompenhans J., 2018: "Particle Image Velocimetry, A Practical Guide, Third Edition", Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, ISBN: 978-3-319-68851-0

Tur R., Eldar Y. C., Friedman Z. 2011: "Innovation Rate Sampling of Pulse Streams With Application to Ultrasound Imaging", IEEE Transactions on Signal Processing, 59, pp. 1827-1842

