

Sensor - Array zur ortsfiler - basierten online Geschwindigkeitsmessung

M. Schaeper, S. Poeggel, N. Damaschke

Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Fakultät für Informatik und
Elektrotechnik, Universität Rostock
Martin.Schaeper@Uni-Rostock.de

Zusammenfassung

Bei der Ortsfiltermesstechnik wird die in ein optisches Messsystem einfallende Intensitätsverteilung mit einem optischen Gitter überlagert. Verändert bzw. bewegt sich diese Verteilung über das Gitter, entsteht eine Wechselkomponente, die der Geschwindigkeit proportional ist. Dies wird genutzt, um Bewegungsgeschwindigkeiten von Oberflächen oder Partikeln in einer Strömung zu bestimmen. Am Institut für Allgemeine Elektrotechnik der Universität Rostock werden seit langem strukturierte Empfänger wie CCD- und CMOS-Chips verwendet, um eine Gitterstruktur durch Wichtung einzelner Pixel zu erzeugen. Die Eignung von strukturierten Empfängern wurde bereits in einer Vielzahl von Veröffentlichungen und Anwendungen bestätigt [1, 2]. Es ist möglich, mit flächigen strukturierten optischen Sensoren beispielsweise die Bewegung einer Oberfläche in einer Ebene zweikomponentig (x- und y-Richtung) zu bestimmen [3]. Der Beitrag befasst sich mit der Verwendung eines CMOS-Sensors, der bereits intern die aufgenommenen Grauwerte in Pixel-Zeilen und -Spalten summiert und ein Zeilenergebnis als 8bit-Wert ausgibt. Dies ermöglicht Ausleseraten von bis zu 3200 Hz. Dennoch bestehen weiterhin die Probleme herkömmlicher Ortsfiltermesssysteme, dass eine Mehrdimensionalität aus den Signalen nicht direkt extrahiert werden kann. Zur Lösung dieses Nachteils wurde ein Sensorsystem entwickelt, welches aus einer 4x4-Sensormatrix besteht. Die 16 Sensoren werden mittels eines FPGA simultan ausgelesen und die Sensordaten nach dem Ortsfiltermessprinzip mit einem vorgegebenen Gitter bewertet und verrechnet. Die berechneten Ortsfiltersignale werden via USB an einen PC übertragen. Hier berechnet ein Benutzer - Interface die Trägerfrequenz jedes einzelnen Signals und stellt die berechneten Geschwindigkeiten in Form von Vektorpfeilen für jeden einzelnen Sensor dar. Das Ergebnis ist ein 4x4-Vektorfeld, welches dem Anwender Informationen über die translatorische Bewegung und der Rotation der Oberfläche eines Objektes liefert.

1 Einleitung

Messsysteme zur Erfassung von Geschwindigkeiten sei es von Oberflächen oder Strömungen sind weit verbreitet. Dabei spielen optische neben taktilen Messverfahren eine wichtige Rolle, da diese berührungslos und schlupffrei agieren. Laserbasierte Verfahren wie die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) oder die Particle-Image-Velocimetry (PIV) sind meist mit hohen Anschaffungskosten und erheblichem Justageaufwand verbunden. Die LDA ist eine Messtechnik zur einkomponentigen Geschwindigkeitsbestimmung in einem Messpunkt. Dagegen kann bei der PIV ein Geschwindigkeitsfeld zweikomponentig und zweidimensional bestimmt werden. Bei den genannten Verfahren ist die Verwendung kohärenter Lichtquellen meist unabdingbar.

Die Ortsfrequenzfilter-Messtechnik ist ebenfalls als Geschwindigkeitsmessverfahren etabliert. Angewendet wird diese Messtechnik in industriellen Fertigungsprozessen. Beispielsweise wird die Geschwindigkeit von Walzgütern erfasst, um damit auf die Änderung der Walzgutdicke während des Prozesses zu schließen oder von Papierbahnen beobachtet, um auf die Länge zu schließen. Weiter Beispiele sind die Messung der Beschleunigung von Webfäden, um den Krafteintrag zu bestimmen oder die Ermittlung der Beschleunigung eines Schmiedehammers zur Berechnung des Krafteintrags.

Vorteile von Ortsfiltermesssystemen sind mäßig bis geringe Anschaffungskosten und die Verwendbarkeit einfacher nicht-kohärenter Lichtquellen. Beschrieben wurde die Ortsfiltermesstechnik unter anderem bereits 1959 von Aroyan [4] bzw. 1963 unter Verwendung rechteckiger Schlitze von Ator [5]. Seitdem wurde die Ortsfiltermesstechnik zunächst unter Verwendung lichtdurchlässiger Gitter weiterentwickelt. Später wurden Linsenarrays [6], Bündel optischer Fasern [7] oder strukturierte Empfänger [1, 2, 8] für Ortsfiltermesssysteme verwendet. Am Institut für Allgemeine Elektrotechnik der Universität Rostock werden vorrangig flächenhafte strukturierte Empfänger benutzt [9-11]. Durch Bewertung einzelner Pixel bzw. Pixelzeilen wird ein virtuelles Gitter erzeugt. Dadurch ist eine Anpassung an den vorliegenden Prozess möglich.

Der Beitrag befasst sich mit der Verwendung eines CMOS-Sensors mit 3200 Bildern pro Sekunde (fps). Dieser wird zu einem 4×4 Array aus 16 Sensoren angeordnet. Vorteil ist die Erfassung eines Geschwindigkeitsfeldes bestehend aus 16 Geschwindigkeitsvektoren, womit auch mehrdimensional Bewegungen beispielsweise einer Oberfläche erfasst werden. Für Testzwecke wurde das Sensor-Array relativ zu einer strukturierten Oberfläche transversal wie auch rotatorisch bewegt.

2 Ortsfiltermessprinzip unter Verwendung strukturierter Empfänger

Grundlegend versteht man unter Ortsfiltermesstechnik die Verwendung gitterartiger Strukturen bzw. gitterartiger Anordnungen zur Messung von Geschwindigkeiten. Bei der Überlagerung einer Gitterstruktur und einer beobachteten Szene kann diese inhärente Korrelation für eine Bewegungsrichtung beschrieben werden als:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} b(x_v(t) - x) a(x) dx \quad (1)$$

Die Bewegung des Bildes $b(x, t)$ der beobachteten Szene wird dabei durch $x_v(t)$ und die feststehende Gitterstruktur durch $a(x)$ repräsentiert. Wird dieser Zusammenhang für die Nutzung eines Array-Sensors benutzt, kann dieser als diskrete Summe der mit einem Gitter gewichteten Pixel-Reihen geschrieben werden.

$$s(t) = \sum_{n_p} B(x_v(t) - n_p) A(n_p) \quad (2)$$

Die bewegte Helligkeitsverteilung wird hierbei durch $B(x_v(t) - n_p)$, aufgenommen durch die einzelnen Pixel an der jeweiligen Position n_p , wiedergegeben. Die Wichtung der Pixel-Reihen $A(n_p)$ ist bei Array basierten Sensoren frei wählbar, was einen erheblichen Vorteil gegenüber der Verwendung eines festen optischen Gitters in sich birgt. So kann nicht nur die Gitterperiode bzw. die Gitterweite der zu messenden maximalen Geschwindigkeit angepasst werden sondern auch die Gitterform als rechteckförmiges, sinusförmiges oder sogar frei moduliertes Gitter generiert werden. Zur Bestimmung der Geschwindigkeit kann der Zusammenhang zwischen der Objektgeschwindigkeit v , der dominierenden Frequenz f_0 des Ortsfiltersignals, der Gitterweite g_p und des verwendeten Vergrößerungsmaßstabes M benutzt werden.

$$v = \frac{f_0 g_p}{M} \quad (3)$$

Das prinzipielle Vorgehen bei der Verwendung eines strukturierten Empfängers als optischen Ortsfiltersensor wird in Abbildung 1 gezeigt. Hierbei werden die Pixel einer Zeile summiert und diese Zeilen-Summen im Wechsel „+1“ und „-1“ bewertet (Differenzgitterbildung). Damit entsteht für jedes ausgelesene Bild jeweils ein Messpunkt für den zeitlichen Verlauf des Ortsfiltersignals $s(t)$. Eine Möglichkeit die dominierende Frequenz f_0 des Ortsfiltersignals zu bestimmen, ist die Berechnung des

Leistungsdichtespektrums (PSD - Power Spectral Density) und die Interpolation des Frequenzpeaks.

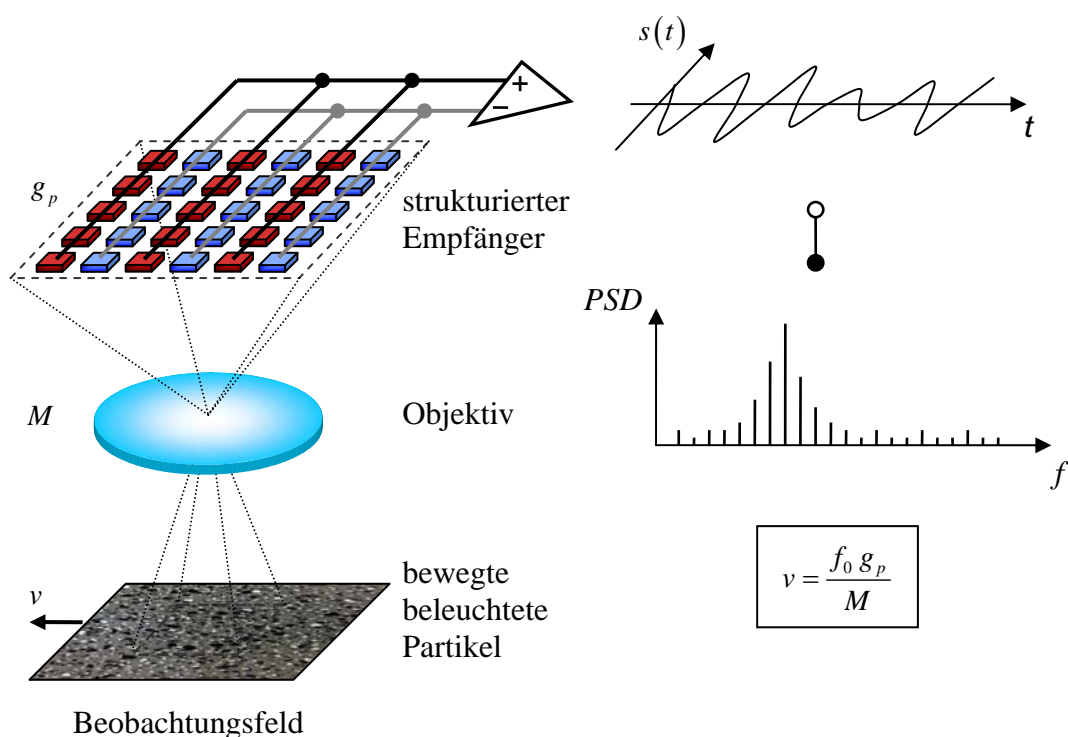


Abbildung 1: Ortsfiltermessprinzip unter der Verwendung strukturierter Empfänger (Differenzgitterbildung: Wichtung der Pixelzeilen mit „+1“, „-1“)

Zur Bestimmung der zweiten Komponente der Geschwindigkeit strömender Partikel ist die Bildung eines orthogonalen Gitters empfehlenswert [11]. Bei der Verwendung von Array-Sensoren ist dies durch die Bildung von Zeilen- und Spalten-Gitter realisierbar. Dadurch ist auch die Berechnung des Geschwindigkeitsvektors mit Betrag und Phase ohne größeren Rechenaufwand möglich.

Der in diesem Beitrag benutzte Array-Sensor ist ein CMOS-Chip mit 256×256 Pixel. Dieser besitzt die Eigenschaft bereits intern jeweils alle Pixel-Zeilen und -Spalten in Zeilen- und Spalten-Summen zusammenzufassen und diese digital auszugeben. Zum einen wird dadurch eine Abtastrate von bis zu 3200 Bilder pro Sekunde erreicht und zum anderen wird ein wichtiger Rechenschritt zur Verwendung als Ortsfilter bereits auf Chip-Ebene vorgenommen. Hierbei wird eine Datenreduktion von 256×256 runter auf 2×256 Datenwerte vorgenommen. Dies entspricht einem Verhältnis des Datenaufkommens von $128/1$. Die Eignung dieses Sensors zur Verwendung in einem Ortsfiltermesssystem wurde bereits in [12] bestätigt. Dabei wurde eine maximale Unsicherheit des Einzelgeschwindigkeitsmesswertes von 2,8% und eine Unsicherheit in der Richtungsbestimmung von $0,426^\circ$ ermittelt.

3 Das entwickelte Ortsfilter - Sensor - Array

Mit dem in Kapitel 2 erwähnten Sensor ist es möglich ein zweikomponentiges Messsystem zu realisieren. Dieses besitzt aber wie die LDA die Eigenschaft einer punktförmigen Messung. Um ein zweikomponentiges und mehrdimensionales Messsystem auf Grundlage der Ortsfiltermesstechnik zu realisieren, wurde der gleiche Sensor in einem Array angeordnet.

Für ein onlinefähiges Messsystem, wurde das in Abbildung 2 dargestellte Schema entwickelt. Dabei bildet ein Spartan 6 FPGA (Field Programmable Gate Array) das Herzstück des Messsystems. Dieser nimmt die parallele Taktung der 16 Sensoren und das Einlesen der Sensordaten vor. Die Daten werden entweder als ‚Rohdaten‘ oder als bereits gewichtete Daten (Ortsfiltersignale) zu einem PC übertragen. Die Kommunikation zu einem PC erfolgt über ein USB 2.0 Interface. Hier werden die Daten mittels einer in LabView™ erstellten Oberfläche dargestellt bzw. die Geschwindigkeitsvektoren berechnet.

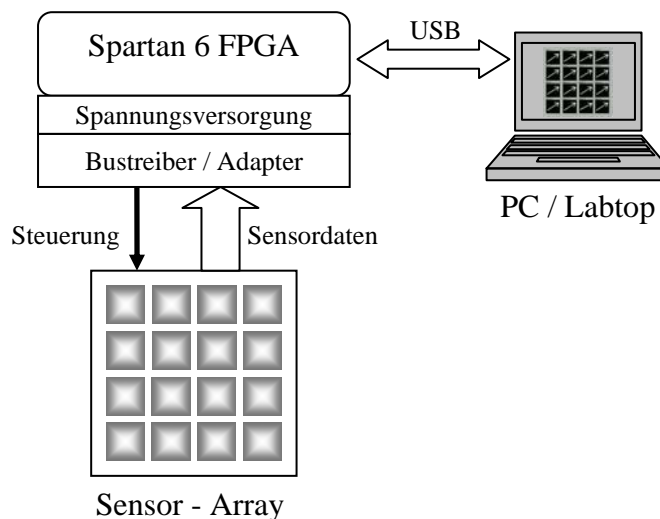


Abbildung 2: Schema des entwickelten Messsystems

In Abbildung 3 ist das Messsystem abgebildet. Die Sensoren des Sensor - Arrays sind in einem Rasterabstand von 12,7mm angeordnet und finden damit auf einer Platine mit 5,5×5,5cm Platz.



Abbildung 3: Messsystem bestehend aus einem Array von 16 Einzel-Sensoren

Mittels Einzellinsen wurde je Sensor ein Areal von $12,7 \times 12,7$ mm abgebildet. Damit ist es möglich, eine Gesamtfläche von $50,8 \times 50,8$ mm abzutasten. Die Linsen sind einzeln justierbar, um Ungenauigkeiten in der Sensoranordnung zu kompensieren. Verdrehungen der Sensoren können im Nachhinein durch eine Kalibrierung ausgeglichen werden. Durch Verstellen des Abstandes des Linsen-Arrays relativ zum Sensor-Array kann der Vergrößerungsmaßstab M eingestellt werden. Zur Abtastung der genannten Gesamtfläche wurde ein Vergrößerungsmaßstab von 0,157 gewählt.

Die Anzeige der Rohdaten ist wegen des Datenaufkommens von $2 \times 256 \times 16 \times 3200$ Werten pro Sekunde online nicht möglich. Jedoch ist eine niedrigere Framerate zur online Anzeige einstellbar. Für erste Testaufnahmen waren 3,2 Hz (jeder 1000ste Frame) ausreichend. Durch eine Gitterbewertung der Rohdaten im FPGA ist es möglich, die Daten von 26214400 Werte runter auf 12800 Werte zu reduzieren.

4 Testmessungen

Für erste Untersuchungen und Funktionstests wurde das Sensor-Array an einer Traversierung befestigt. Hiermit ist es möglich, den Messabstand einzustellen und die Bewegung des Sensor-Arrays (linear und rotatorisch) vorzunehmen. Abbildung 4 zeigt einen Überblick zum Testaufbau im Bild 4a und die Auswertung erster Rohdaten im Bild 4b.

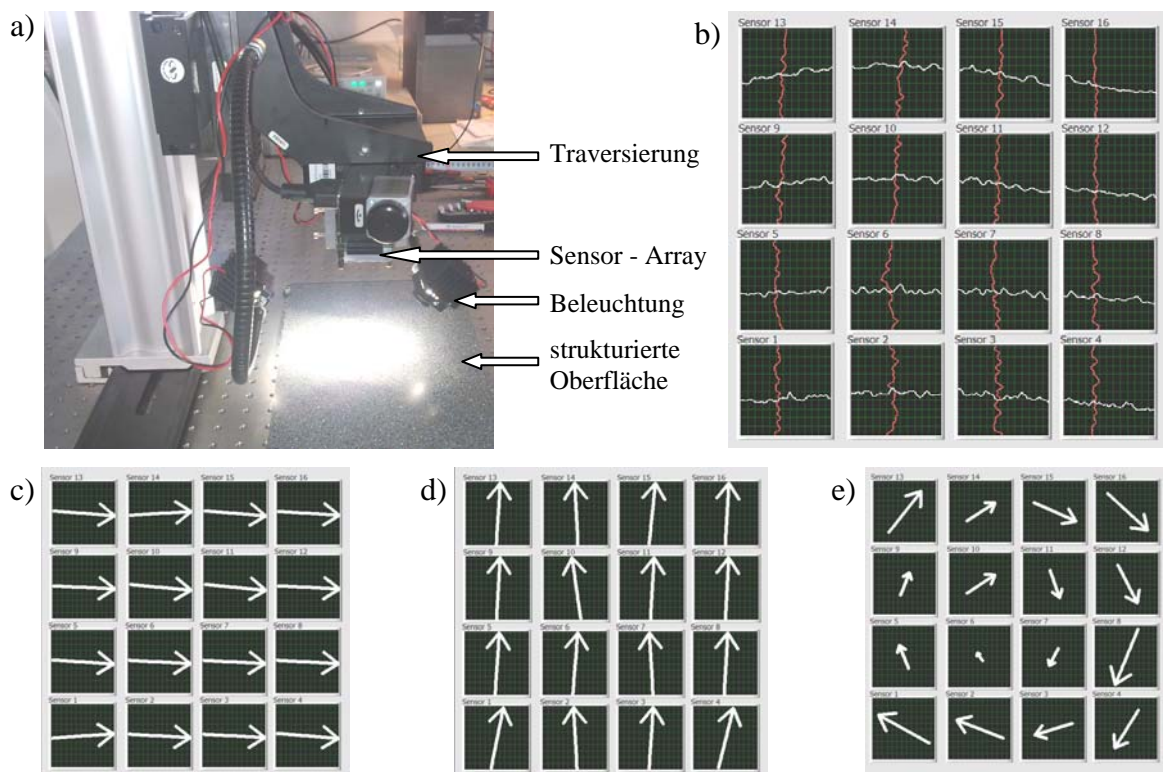


Abbildung 4: Testmessungen mit dem Sensor – Array: a) Messaufbau mit Traversierung (x-Richtung, Höhe und Rotation); b) Aufnahme der Rohdaten (weiß, horizontal = x-Daten; rot, vertikal = y-Daten); c) Bewegung in x-Richtung; d) Bewegung in y-Richtung; e) Rotation des Messsystems

Abbildung 4b zeigt die Rohdaten der Sensoren als Ergebnis der Summation der Grauwerte der Pixelspalten und -zeilen. Im unteren Bereich von Abbildung 4 sind die Ergebnisse in Form von Vektorpfeilen dargestellt. Hieran kann die Funktion des Prinzips bestätigt werden. Die Bilder 4c und 4d zeigen die Bewegung in x- und in y-Richtung bei einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/s. Abweichungen bei der ermittelten Bewegungsrichtung können zum einen durch die Verdrehung jedes einzelnen Sensors hervorgerufen werden aber auch der Auswertalgorithmus (PSD) spielt hier eine große Rolle. Bei diesem Test wurden lediglich 256 Messwerte verwendet. Bei der Rotation des Sensor-Arrays (Bild 4e) sieht man anhand des Geschwindigkeitsbetrags (Vektorlänge), dass das Sensor-Array nicht genau in der Rotationsachse befestigt wurde. Die Rotation fand mit 5°/s statt.

5 Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Sensor-Array ist es möglich, dem Anwender zunächst einen Eindruck über die Bewegung einer Oberfläche bzw. von Strömungen zu vermitteln. Aufgrund der hohen Datenrate bei der Übertragung der Rohdaten zu einem PC wäre eine Onlineverarbeitung durch die verwendete USB-Schnittstelle nicht möglich. Hierfür werden bereits vor der Übertragung die Rohdaten zu Ortsfiltersignalen verarbeitet. Damit können die Signale online mit 3200 Hz übertragen und die Ergebnis-Vektoren angezeigt werden.

Im Vergleich zur PIV, welches ein zweikomponentiges und zweidimensionales Messverfahren darstellt, kann mit diesem Sensor - Array eine kostengünstige onlinefähige Variante aufgezeigt werden.

Literatur

- [1] M. S. Uddin, H. Inaba, Y. Itakura, Y. Yoshida, M. Kasahara: *Adaptive Computer-Based Spatial-Filtering Method for More Accurate Estimation of the Surface Velocity of Debris Flow*, Journal Article, OSA, 1999
- [2] K. C. Michel, O. F. Fiedler, A. Richter, K. Christofori, S. Bergeler: *A novel spatial filtering velocimeter based on a photodetector array*, Journal Article, 1998
- [3] J. Horn: *Zweidimensionale Geschwindigkeitsmessung textuierter Oberflächen mit flächenhaften bildgebenden Sensoren*, Thesis, Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [4] G. F. Aroyan: *The Technique of Spatial Filtering*, Conference Proceedings, IEEE Explore, 1959
- [5] J. T. Ator: *Image-Velocity Sensing with Parallel-Slit Reticles*, Journal Article, 1963

- [6] M. L. Jakobsen, S. G. Hanson: *Micro-lenticular array for spatial-filtering velocimetry on solid surfaces*, Journal Article, 2004
- [7] D. Petrak: *Simultaneous Measurement of Particle Size and Particle Velocity by the Spatial Filtering Technique*, Journal Article, 2002
- [8] S. Bergeler, H. Krambeer: *Novel optical spatial filtering methods based on two-dimensional photodetector arrays*, Journal Article, 2004
- [9] J. Kumpart: *Ortsfilter mit elektronisch bewegtem Gitter für Strömungsmessungen in Mehrphasensystemen*, Thesis, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2000
- [10] K. C. Michel: *Ein Beitrag zur Signalverarbeitung von Ortsfiltersensoren*, Thesis, Universität Rostock, 2000
- [11] S. Bergeler: *Einsatz optoelektronischer Flächensensoren in der ein- und zweidimensionalen Ortsfiltertechnik*, Thesis, Universität Rostock, 2002
- [12] M. Schaeper, N. Damaschke, M. Kamel, F. Karray, W. Gueaieb, A. Khamis: *Velocity Measurement for Moving Surfaces by Using Spatial Filtering Technique Based on Array Detectors*, Book Section, Springer Berlin / Heidelberg, 2011