

## OPTISCHES 2C-ORTSFILTERMESSSYSTEM ZUR STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITSMESSUNG

### OPTICAL 2C-SPATIAL-FILTERING-SYSTEM FOR FLOW VELOCITY MEASUREMENTS

**M. Schaeper, N. Damaschke**

Universität Rostock, Fakultät für Informatik und Elektrotechnik, Institut für Allgemeine Elektrotechnik,  
Justus-von-Liebig-Weg 2, 18059 Rostock

Optischer Ortsfilter, Geschwindigkeitsmessung, CMOS Sensor

Optical spatial filter, velocity measurements, CMOS sensor

#### Zusammenfassung

Als Alternative zu Lasermessverfahren wird eine einfache und kostengünstige Lösung zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit vorgestellt. Das Messverfahren basiert auf der Ortsfiltermesstechnik in Verbindung mit einem speziellen CMOS-Sensor. Der Sensor besitzt den Vorteil der internen Vorverarbeitung der Pixeldaten von 256x256 Pixel auf 2x256 Pixeldaten. Dies wird durch die Summation der Pixel-Zeilen und Spalten realisiert. Erreicht werden damit Bild-Wiederholraten von bis zu 3200 Bildern pro Sekunde. Die Ansteuerung, das Auslesen und die Verarbeitung der Pixeldaten werden durch ein DSP-basiertes System realisiert. Weiterhin werden Testdaten von Messungen an einer Glaskapillaren vorgestellt.

#### Einleitung

Allgemein verbreitete optische Messtechniken zur Geschwindigkeitsbestimmung strömender Partikel sind beispielsweise die Partikel-Image-Velocimetrie (PIV) wie auch die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) (Albrecht, Borys et al. 2003). Diese besitzen meist einen komplexen Aufbau und benötigen einen hohen Justageaufwand. Hinzu kommen die aufwändige Datenverarbeitung und die Verwendung von Lasern. Somit ist die Suche nach kostengünstigen und besonders flexiblen Lösungen begründet. Als eine Alternative zur optischen Bestimmung der Geschwindigkeit strömender Fluide bietet sich die Ortsfiltermesstechnik an. Die damit verbundene Verwendung gitterartiger Strukturen bzw. die Nutzung deren Filterwirkung wurde erstmals als Geschwindigkeitsmessverfahren in der Photographie aus einem Flugzeug heraus beschrieben und angewendet (Hancock and Meinema 1946). Hierbei muss die Fluggeschwindigkeit durch die Mitführung des Photofilmes kompensiert werden. Die Verwendung der Ortsfiltermesstechnik zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten werden unter anderem beschrieben von (Kumpart 2000), (Petraik and Rauh 2009), (Aizu and Asakura 2006).

Zur Realisierung eines 2C-Ortsfiltermesssystems wird in diesem Beitrag ein Array-Sensor verwendet.

## Ortsfiltermesstechnik unter der Verwendung eines Array-Sensors

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:

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

Dabei sind  $b(x_v(t) - x)$  die Bildbewegung der beobachteten Szene und  $a(x)$  die feststehende Gitterstruktur. Wird dieser Zusammenhang für die Nutzung eines Array-Sensors herangezogen, kann dieser als diskrete Summe der mit einem Gitter gewichteten Pixel-Reihen  $A(n)$  geschrieben werden.

$$s(t) = \sum_n B(x_v(t) - n) A(n) \quad (2)$$

Der Ausdruck  $B(x_v(t) - n)$  ist dabei die Helligkeitsverteilung, gemessen bzw. aufgenommen durch die einzelnen Pixel an der jeweiligen Position  $n$ . Die Wichtung der Pixel-Reihen  $A(n)$  ist dabei frei wählbar, was einen erheblichen Vorteil gegenüber der Verwendung eines festen optischen Gitters  $a(x)$  ausmacht. 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  $g$  und des verwendeten Vergrößerungsmaßstabes  $M$  benutzt werden.

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

Abbildung 1 zeigt das prinzipielle Vorgehen bei der Verwendung eines Array-Sensors als optischen Ortsfiltersensor für eine Dimension. Hierbei werden die Pixel einer Zeile summiert und diese Zeilen-Summen im Wechsel „+“ und „-“ 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 und die Interpolation des Frequenzpeaks.

Zur Bestimmung der zweiten Komponente der Geschwindigkeit strömender Partikel ist die Bildung eines orthogonalen Gitters empfehlenswert (Bergeler 2002). 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.

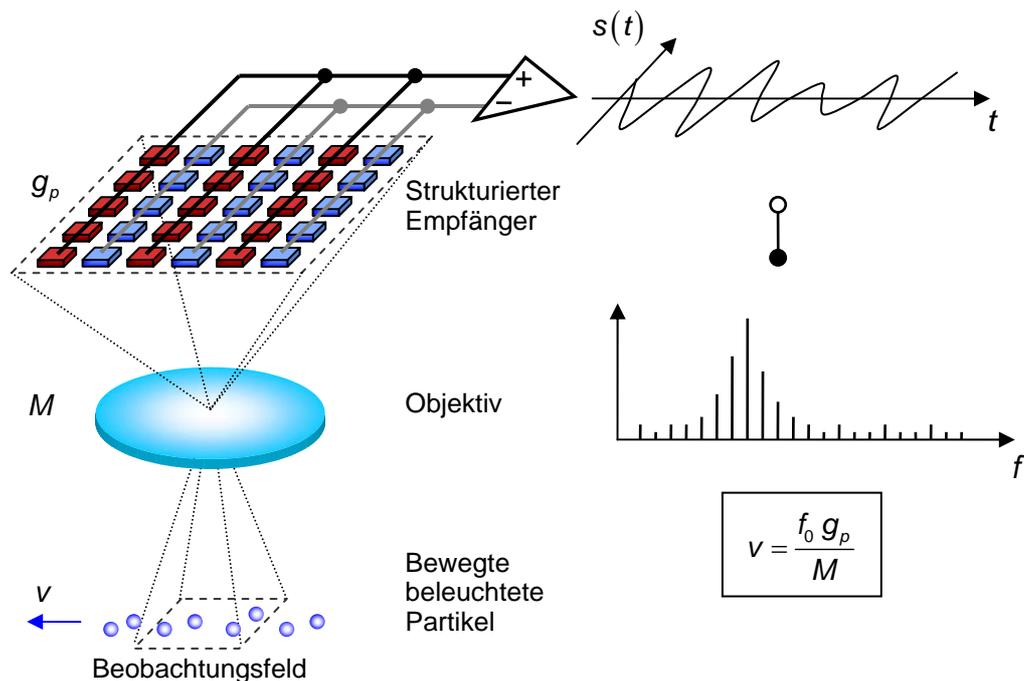


Abb. 1: Ortsfiltermessprinzip unter Verwendung strukturierter Empfänger (Differenzgitterbildung)

Der in diesem Beitrag benutzte Array-Sensor ist ein CMOS-Chip mit 256x256 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.

### Das Ortsfiltermesssystem und der Messaufbau

Als Objektiv wurde ein motorisiertes 12x-Zoom-Objektiv von Navitar verwendet, welches zusätzlich in ein Traversierungssystem integriert wurde.

Herzstück des Ortsfiltermesssystems ist ein Digital-Signal-Prozessor von (TexasInstruments 2007). Dieser nimmt die Taktung des Sensors vor und nimmt die Sensordaten via Direct-Memory-Access (DMA) auf. Die Daten werden online in Form von Datenpaketen nach dem Ortsfiltermessprinzip weiter verarbeitet. Das bedeutet, die Zeilen- und Spalten-Daten werden mit einer Gitterfunktion  $A(n)$  gewichtet und danach für jede Richtung aufsummiert. Nach einer vorgegebenen Länge des Ortsfiltersignals  $s(t)$  wird dann das Leistungsdichtespektrum errechnet, daraus der Frequenzpeak ermittelt und die Geschwindigkeit  $v$  berechnet. Diese Daten werden via einer USB-Verbindung an eine PC gesendet und können dort ausgewertet werden. Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau des Messsystems.

Die Kapillare hat eine Länge von 3,15cm und einen Innendurchmesser von ca. 1,4mm. Für Durchflüsse von maximal  $q_v = 49,9$  ml/h ergibt ergeben sich Reynoldszahlen im laminaren Bereich.

Die Beleuchtung wurde über einen Umlenkspiegel mittels Durchlichtverfahren realisiert, wobei der Spiegel lediglich aus Platzgründen verwendet wurde. Ein klarer Vorteil gegenüber

Laser-Doppler-Verfahren oder der Partikel-Image-Velocimetry ist der Einsatz einer konstanten 20 W Halogen-Lichtquelle.

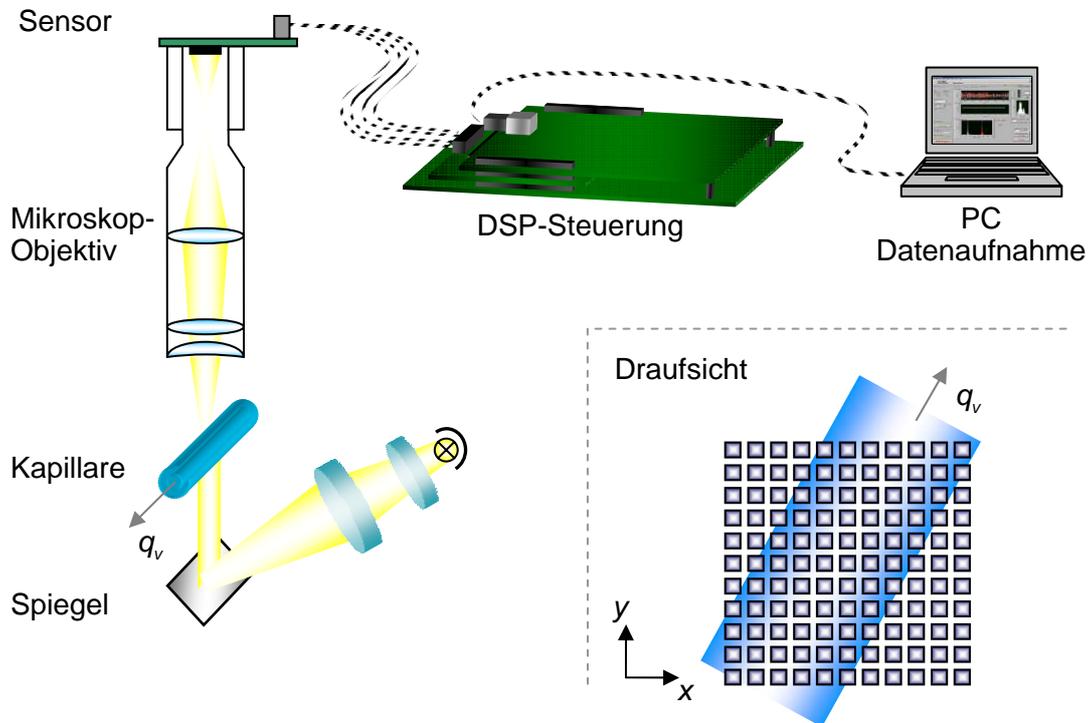


Abb. 2: Aufbau des Ortsfiltermesssystems / Messung an einer Kapillare

Die Draufsicht in Abbildung 2 zeigt die „Schrägstellung“ des Sensors gegenüber der Strömungsrichtung. Dies ist zum einen dadurch begründet, dass gerade eine 2-komponentige Messung realisiert werden sollte. Anwendungshintergrund ist hier, dass zweikomponentige Strömungsgeschwindigkeiten mit dem System erfasst werden sollen bzw. der so realisierte Sensor nicht auf eine genaue Winkellage wie ein 1C-Sensor angewiesen ist.

### Ergebnis einer Testmessung

Als strömendes Medium wurde Wasser mit Titanium-Dioxid als Tracer-Partikel benutzt. Der Volumenstrom wurde mittels einer programmierbaren Spritzenpumpe (Becton/Dikinson Program 1) erzeugt und von 2 ml/h bis 49,9 ml/h variiert. Mittels des Mikroskopobjektivs wurde eine Vergrößerung von  $M \approx 3,9$  eingestellt und in die Kapillare „hineingezoomt“.

Abbildung 3 zeigt die Messergebnisse, wobei jeder Messpunkt den Mittelwert einer 15 s langen Messung mit 3200 Bildern pro Sekunde darstellt. Die Fehlerindikatoren zeigen die einfache Standardabweichung der Geschwindigkeitsmessungen an. Zur Eliminierung des systematischen Fehlers der Messkurve, aufgrund der Integration über ein Teil des Strömungsprofils, wurde eine Korrektur um einen Faktor  $k = 1,22$  vorgenommen.

Bei den Ergebnissen ist im Bereich geringer Strömung (2 ml/h bis 7 ml/h) eine Abweichung vom linearen Verlauf zu erkennen. Dies ist aber im Auswertalgorithmus zur Bestimmung der Geschwindigkeit begründet. Da durch die verwendete Gitterweite der Frequenzpeak im

Leistungsdichtespektrum bei geringen Geschwindigkeiten sehr eng an der Frequenz  $f = 0\text{Hz}$  liegt, wird dadurch der Wert der Interpolation des Peaks verfälscht.

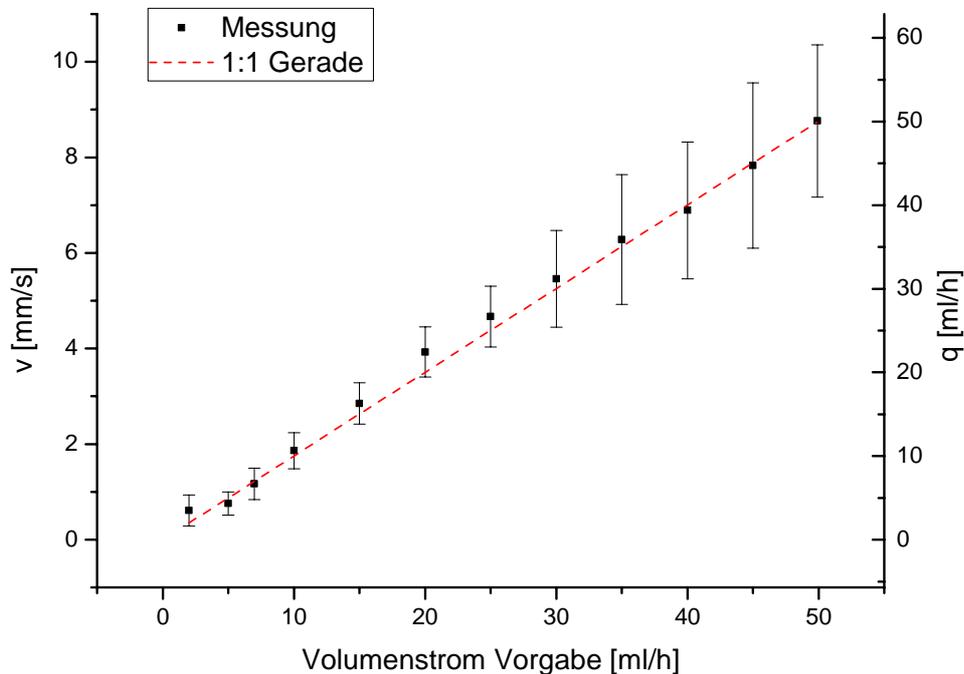


Abb. 3: Messergebnisse der Testmessung bei verschiedenen Volumenströmen

Anhand der 1:1 Gerade in Abbildung 3 ist eine gute Annäherung der Messwerte an die Gerade zu erkennen. Die Proportionalität zwischen vorgegebenem und ermitteltem Volumenstrom konnte für ein Messsystem mit dem verwendeten CMOS-Sensor als 2C-Ortsfilter messtechnisch nachgewiesen werden. Die relative Standardabweichung bewegt sich ab 10ml/h im Bereich von 20% für den Einzelmesswert. Die hohe Standardabweichung ist Ausdruck dafür, dass der Sensor den gesamten Querschnitt der Kapillaren abdeckt und damit je nach Streuzentrenposition unterschiedliche Geschwindigkeiten detektiert. Die Mittelwerte sind somit kleiner als die maximale Geschwindigkeit im Zentrum der Kapillaren. Der ermittelte Korrekturfaktor trägt dem Rechnung.

Da es sich um einen Funktionsnachweis des 2C-Ortsfiltermesssystems handelt, werden weitere Messungen mit einer Abtastung verschiedener Tiefenpunkte innerhalb der Kapillare folgen.

## Literatur

- Aizu, Y. and T. Asakura (2006). Spatial Filtering Velocimetry Fundamentals and Applications, Springer Science & Business.
- Albrecht, H.-E., M. Borys, et al. (2003). Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Berlin Heidelberg New York, Springer-Verlag.
- Bergeler, S. (2002). Einsatz optoelektronischer Flächensensoren in der ein- und zweidimensionalen Ortsfiltertechnik. Rostock, Universität Rostock.

Hancock, J. D. and H. E. Meinema (1946). Camera for aerial photography. United States, Hancock Jr., David, Meinema, Herbert E.

Kumpart, J. (2000). Ortsfilter mit elektronisch bewegtem Gitter für Strömungsmessungen in Mehrphasensystemen. Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg.

Petrak, D. and H. Rauh (2009). "Micro-flow metering and viscosity measurement of low viscosity Newtonian fluids using a fibreoptical spatial filter technique." Flow Measurement and Instrumentation **20**(2): 49-56.

TexasInstruments (2007). TMS320C6455, Fixed-Point Digital Signal Prozessor, Texas Instruments Inc., Dallas, Texas 75265.