

OPTISCHE LOW-COST SENSOREN FÜR STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITSMESSUNGEN

OPTICAL LOW-COST SENSORS FOR FLOW VELOCITY MEASUREMENT

M. Schaeper, M. Degner, Y. Haba, J. Stuczynski, N. Damaschke

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

(Martin.Schaeper@uni-rostock.de)

Strömungsmessung, Geschwindigkeitsmessung, Low-cost-Sensor, Ortsfiltermesstechnik
Flow velocity measurement, low-cost sensor, Spatial filtering

Zusammenfassung

Die Arbeit vergleicht drei neue Konzepte, die optische low-cost Sensoren zur punktuellen, in-situ und on-line Messung der Strömungsgeschwindigkeit nutzen. Zwei der Konzepte basieren auf der Nutzung von kommerzieller integrierter Maussensoren. Der erste Maussensor ist ein Standard-Maussensor mit einem 19x19 Pixel großem CMOS-chip und interner Signalverarbeitung mittels optischem Fluss. Der Zweite Maussensor ist ein zweikomponentiger Referenzstrahl Laser-Doppler-Sensor mit integrierter Optik. Beide Sensoren liefern als Ausgangswerte 2D-Weginkremente. Durch ein äquidistantes Ausleseintervall kann daraus die Geschwindigkeit ermittelt werden. Das dritte Konzept nutzt die Ortsfiltermesstechnik in Verbindung mit einem optischen Positionssensor. Anwendungsbereich ist die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von bis zu 1m/s zur Prozessüberwachung und in Grenzschichten. Die Verwendung des Positionssensors in Verbindung mit der Ortsfiltertechnik ist im Vergleich zu den Maussensoren aufwändiger, ermöglicht jedoch eine bessere Anpassung an den Geschwindigkeitsbereich und kann aufgrund der externen Signalverarbeitung besser für die Problemstellung adaptiert werden. Alle drei Konzepte sind dabei im Vergleich zur Laser-Doppler Technik oder Particle Image Velocimetry extrem kostengünstig.

Einleitung

Optische Strömungsmesstechniken werden im Allgemeinen mittels komplexer optischer Systeme und häufig mit Laserlicht realisiert, z.B. Particle Image Velocimetry und Laser-Doppler Technik. Beides bedingt, zusammen mit den Detektoren und der spezifisch angepassten externen Signal- und Datenverarbeitung, aufwendige und kostenintensive Lösungen. Für prozessnahe Überwachungs- und Steuerungsaufgaben sind aber preisgünstige, robuste und kleine integrierte Messsysteme notwendig.

Vorgestellt werden drei low-cost Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien. Die ersten zwei sind handelsübliche optische Sensoren wie sie in PC-Mäusen zu finden sind. Wobei der erste ein Korrelations- und der zweite ein Laser-Doppler-Sensor ist. Der dritte Sensor ist ein optischer Positionssensor und wird hier in Verbindung mit der Ortsfiltertechnik benutzt.

Verwendung von optischen Maussensoren

Die meisten handelsüblichen optischen Maussensoren bestehen aus einem CCD- oder CMOS-Matrixsensor mit 10x10 bis 32x32 Pixel. Aufgrund der begrenzten Pixelzahl ist ein vollständiges Auslesen des Sensors bis zu Frameraten von einigen kHz möglich. Die ausgelesenen Pixelwerte werden anschließend mit einem Digitalen Signalprozessor (DSP), der oft zusammen mit dem Sensorchip integriert ist, ausgelesen und verarbeitet. Der DSP berechnet, ähnlich wie für eine intergration area in der PIV-Technik, den Versatz von zwei aufeinander folgenden Bildern. Die Bestimmung des Versatzes erfolgt in Maussensoren aufgrund der begrenzten Rechenkapazität nicht über die Korrelation wie bei der PIV-Technik sondern über den optischen Fluss (Abbildung 1).

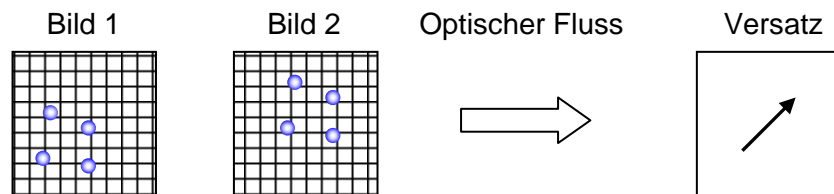


Abb. 1: Prinzip des Korrelationssensors

Das erste Konzept zur Strömungsgeschwindigkeitsmessung verwendet einen derartigen kommerziellen Maussensor, den Sensor ADNS-5050 der Firma Avago. Mit einem CMOS-array werden zwei aufeinander folgende Bilder aufgenommen und der Versatz zwischen beiden ermittelt. Die Daten des 2D-Versatzes werden mittels der Schnittstellen eines externen DSPs in Form von Inkrementen ausgelesen und in Geschwindigkeitsdaten konvertiert. Mit dem Sensor ADNS-5050 sind bei einer Vergrößerung der Abbildungsoptik von 1,25 Geschwindigkeiten von bis zu 30ips (Inch Per Second) möglich (Avago, 2008). Dies entspricht ca. 0,7 m/s womit Grenzschichtmessungen mit moderaten Geschwindigkeiten möglich werden. Um höhere Geschwindigkeiten messen zu können muss die Abbildungsoptik entsprechend angepasst werden.

Das zweite Maussensor-Konzept basiert auf der Laser Doppler Technik und self mixing. Seit 2006 bietet Philips einen optoelektronischen Maussensor an, der zwei VCSEL (vertical cavity surface emitting laser) mit einer Wellenlänge von $\lambda = 850\text{nm}$, zwei integrierte Monitor-Photodioden sowie Optik, Signal- und Datenverarbeitung in einem Gehäuse integriert (Abbildung 2, Philips 2006).

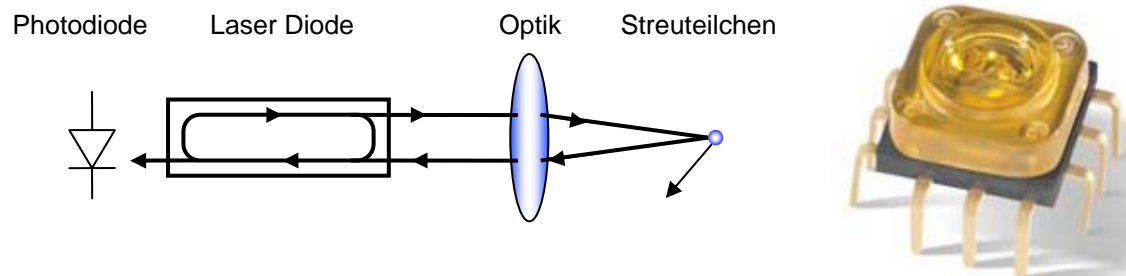


Abb. 2: Prinzip self mixing effect (nach Gagnon et al, 1999), Twin-Eye Sensor (Philips Lighting B.V.)

Die beiden Laserstrahlen werden mittels der integrierten Optik unter zwei Winkeln auf die Oberfläche fokussiert. Das gestreute, bei Bewegung der Oberfläche Doppler verschobene Licht wird in die Laserdioden zurückgekoppelt. Die dabei auftretende charakteristische Mo-

dulation kann mittels der Photodioden erfasst werden. In den Sensor integriert sind zusätzlich die Signalerfassung, Signalverarbeitung und Datenverarbeitung auf einem ASIC. Als Ausgabe kann, wie bei den herkömmlichen Maussensoren, der Versatz zwischen zwei Abtastungen in Form von Inkrementen ausgelesen werden. Mit der derzeitig verfügbaren integrierten Optik kann der Sensor Geschwindigkeiten von bis zu 1m/s bei einer Auflösung von 800 CPI (Counts Per Inch) bestimmen (Philips, 2006). Somit eignet sich auch dieser Sensor zur Erfassung von Strömungsgeschwindigkeiten in Grenzschichten. Für das Auslesen der Daten und die on-line Verarbeitung wurde ebenfalls ein externes DSP-Board verwendet.

Verwendung eines optischen Positionssensors mit der Ortsfiltermesstechnik

Das dritte Konzept zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten nutzt die Ortsfiltermesstechnik und einen speziellen CMOS-Arraysensor mit on-chip Vorverarbeitung. Die Ortsfiltermesstechnik bedient sich der Filterwirkung gitterartiger Strukturen. Das Ausgangssignal eines Ortsfilters kann als Überlagerung des bewegten Bildes mit einer Gitterfunktion beschrieben nach (1) werden.

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

Wobei $b(x_v(t) - x)$ die bewegte Abbildung auf dem Empfänger ist und $a(x)$ als die überlagerte Gitterfunktion angesehen wird. Im Spektrum des Ausgangssignals $s(t)$ entsteht ein Frequenzpeak der die Geschwindigkeitsinformation eines abgebildeten bewegten Objektes enthält

$$f_0 = \frac{v_b}{g} \quad (2)$$

Hierbei ist g die Gitterkonstante der Wichtungsfunktion $a(x)$. Nach Aizu et al (2006) kann unter Verwendung der Vergrößerung M der Abbildungsoptik, die Geschwindigkeit eines Objektes nach (3) bestimmt werden.

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

Die Gitterfunktion kann beispielsweise mittels eines periodisch modulierten Amplitudengitters erzeugt werden. Durch anschließende Fokussierung auf einen einzelnen Detektor können sehr schnelle Abtastraten erreicht werden. Nachteil ist, dass das resultierende Signal nicht mittelwertfrei ist.

Ein mittelwertfreies Signal kann nur über ein Differenzgitter mit positiven und negative Wichtungen realisiert werden. Zur Umsetzung eines solchen Differenzgitters bieten sich CCD-Zeilen an, bei denen die Pixel im Auslesezyklus alternierend mit z.B. -1 und +1 gewichtet werden und anschließend eine Summation erfolgt (z.B. Bergeler 2002). Abbildung 3 zeigt die Realisierung eines Differenzgitters mit einem zweidimensional strukturierten Empfänger. Derartige Systeme zur 1C Geschwindigkeitsbestimmung sind bereits kommerziell verfügbar. Nach Bergeler 2002 ist für eine zweikomponentige Geschwindigkeitsbestimmung die Realisierung eines zweiten um 90 Grad versetzten Gitters notwendig. Für eine zweikomponentige Bestimmung der Geschwindigkeit müssen somit die Pixelreihen auf einem Arraysensor sowohl in x- als auch in y-Richtung alternierend gewichtet werden. Dies erfor-

dert den mehrfachen Zugriff auf einen Pixelwert, was im Falle von CCD-Sensoren nur nach dem Auslesezyklus extern realisiert werden kann. Eine Alternative bietet der CMOS-Positionssensor S9132 der Firma Hamamatsu (Hamamatsu 2004). Ähnlich wie in Abbildung 3 addiert er on-chip sowohl die Pixelwerte aller Zeilen als auch aller Spalten auf. Im Ergebnis müssen statt der 256x256 Pixel lediglich 2x256 Werte ausgelesen und mit der Gitterfunktion gewichtet werden. Die so komprimierten frames können mit einer Maximalfrequenz von 3,2kHz ausgelesen werden. Die Summation der Grauwerte jeder Zeile in x und y Richtung realisiert damit eine wichtige Vorverarbeitung der Pixelwerte zur Verwendung in der Ortsfiltermesstechnik.

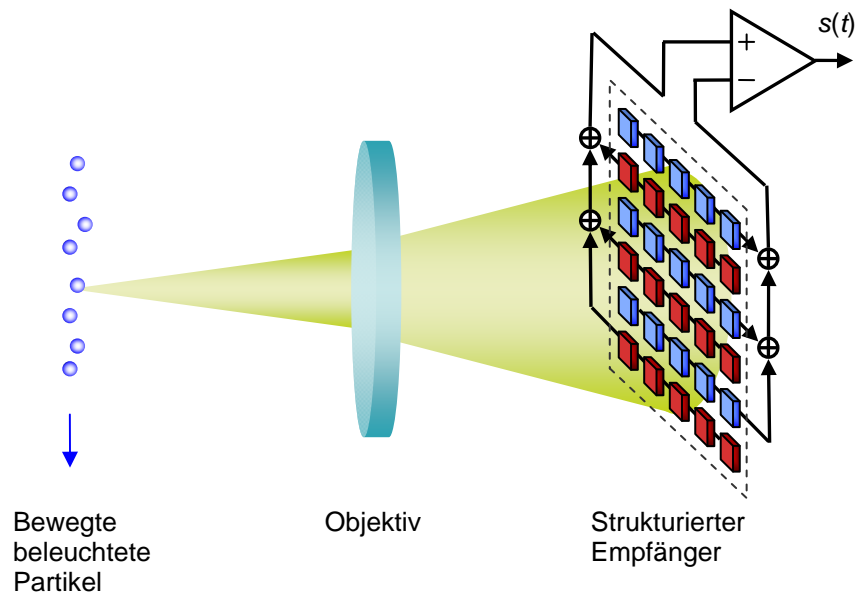


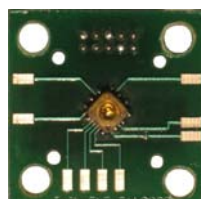
Abb. 3: Differenzgitterbildung mit strukturiertem Empfänger

Optischer Aufbau zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten

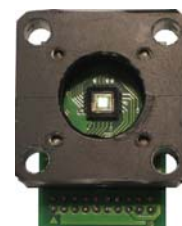
Für Testzwecke wurden Platinen entwickelt die es ermöglichen die Sensoren in einem optischen Banksystem zu applizieren. Bilder der Sensoren sind in Abbildung 4 gezeigt.



Maussensor



Laser-Doppler-Sensor



Positionssensor

Abb. 4: Bilder der applizierten Sensoren

Die Verarbeitung der ausgelesenen Daten erfolgt mittels eines DSPs (Digital Signal Prozessor). Abbildung 5 zeigt einen schematischen Überblick des Messsystem, wobei für den Laser-Doppler-Sensor keine Abbildungsoptik benötigt wird, da dieser bereits über eine integrierte Optik verfügt. Bei der Verwendung der Maussensoren werden lediglich die Inkremente des Versatzes ausgelesen und in die Bewegungsgeschwindigkeit umgerechnet. Für die Geschwindigkeitsbestimmung mittels Positionssensor unter Anwendung des Ortsfilterprinzips

müssen durch den DSP die summierten Reihen- und Spaltenwerte ausgelesen werden. Während des Einlesens des nächsten Bildes werden die Daten mit einer Wichtungsfunktion bewertet und aufsummiert. Des Weiteren wird durch den DSP eine Fast Fourier Transformation (FFT) durchgeführt und der Peak im Spektrum bestimmt. Abhängig vom Abbildungsmaßstab der Optik wird dann die Geschwindigkeit für die x- und y-Komponente ermittelt. Bei jedem der drei Konzepte werden die Geschwindigkeitskomponenten über eine USB Verbindung für weitere Analysen an einen PC gesendet.

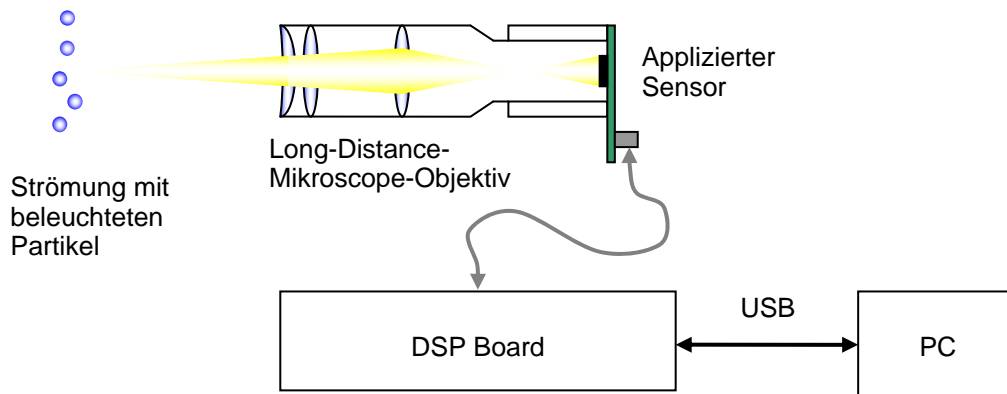


Abb. 5: Schematischer Überblick zum Messsystem

Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag stellt drei mögliche low-cost Sensoren für die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten vor. Anwendungsbereich ist dabei die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von 1m/s zur Prozessüberwachung und in Grenzschichten. Zwei Konzepte basieren auf handelsübliche Sensoren aus PC-Mäusen. Die Verwendung des Positionssensors in Verbindung mit der Ortsfiltertechnik ist im Vergleich zu den Maussensoren aufwändiger, ermöglicht jedoch eine bessere Anpassung an den Geschwindigkeitsbereich und kann aufgrund der externen Signalverarbeitung besser an die Problemstellung angepasst werden. Alle drei Konzepte sind dabei im Vergleich zur Laser-Doppler Technik oder Particle Image Velocimetry extrem kostengünstig.

Literatur

Aizu, Y., Asakura, T., 2006: "Spatial Filtering Velocimetry, Fundamentals and Applications", Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Avago Technologies, 2008: "ADNS-5050, Optical Mouse Sensor", Datenblatt

Bergeler, S., 2002: "Einsatz optoelektronischer Flächensensoren in der ein- und zweidimensionalen Ortsfiltertechnik", Rostock, Universität Rostock

Gagnon, E., Rivest J.-F., 1999: "Laser Range Imaging Using the Self-Mixing Effect in a Laser Diode", IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 48, No. 3, pp. 693-699

Hamamatsu Photonics K.K., 2004: "Profile Sensor S9132, High-speed frame rate sensor capable of acquiring two-dimensional projection data", Datenblatt

Philips Lighting B.V., 2006: "twin-eye Laser Sensor PLN2020", Datenblatt