

Hochauflösender Laser-Doppler-Sensor zur dreikomponentigen ortsverteilten Geschwindigkeitsmessung in Strömungsfeldern

A. Voigt, C. Bayer, K. Shirai, L. Büttner, J. Czarske

Technische Universität Dresden, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik,
Professur für Mess- und Prüftechnik, Helmholtzstraße 18, D-01069 Dresden

E-Mail: voigt@iee.et.tu-dresden.de

Wir stellen einen Sensor zur flächenhaften, dreikomponentigen Strömungsmessung vor. Der Aufbau beruht auf einem erweiterten Laser-Doppler-Verfahren. Da keine Kamera verwendet wird, treten keine Beschränkungen durch Pixelauflösung und Beugung auf. Potentielle Einsatzgebiete sind die Mikrofluidik, Turbulenzforschung und präzise Durchflussmessung.

1 Einführung

Viele Anwendungen der Strömungsforschung erfordern eine hochpräzise orts aufgelöste Messung des Strömungsfeldes in allen drei Geschwindigkeitskomponenten. Bei kamerabasierten Systemen wie Particle Image Velocity (PIV) ist die Messgenauigkeit durch Pixelauflösung und Beugung begrenzt. Außerdem sind die zu verarbeitenden Datenmengen sehr groß, was einen limitierenden Faktor für die Zeitauflösung darstellt.

Der hier vorgestellte Sensor zur flächenhaften (2d), dreikomponentigen (3c) Strömungsmessung umgeht diese Beschränkungen, da er ein Bild von der Strömung erzeugt, ohne eine Kamera zu nutzen. Der Aufbau basiert auf einem weiterentwickelten Laser-Doppler-Prinzip, bei dem die verwendeten Interferenzstreifensysteme nicht parallel, wie bei konventionellen Laser-Doppler-Verfahren, sondern fächerförmig sind.

Die Grundelemente des Feldsensors sind zwei Laser-Doppler-Profilsensoren, deren Funktionsweise im Folgenden zunächst beschrieben wird.

2 Der Laser-Doppler-Profilsensor

Wie beim konventionellen Laser-Doppler-Anemometer (LDA) beruht die Strömungsmessung beim Laser-Doppler-Profil-Sensor auf der Detektion von Streulicht, welches von Streuteilchen, die das Messvolumen durchqueren, ausgesendet wird (*Burst-Signal*). Beim herkömmlichen LDA wird das Messvolumen durch das parallele Interferenzstreifensystem zweier sich kreuzender Laser-Strahlen gebildet. Die Geschwindigkeit v eines passierenden Teilchens berechnet sich aus dem Streifenabstand d und der Frequenz f des Burst-Signals mit $v = f \cdot d$. Die Ortsauflösung ist durch die Größe des Messvolumens vorgegeben.

Der Laser-Doppler-Profilsensor [1] verwendet hingegen zwei unterscheidbare Paare von Laserstrahlen, die im Messvolumen überlagert sind. Die

Strahltaillen sind dabei so positioniert, dass sich ein Interferenzstreifensystem mit konvergierenden Streifen und eines mit divergierenden Streifen ergibt (Abbildung 1).

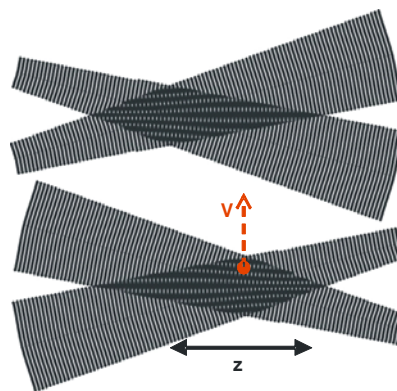


Abbildung 1: Divergierendes und konvergierendes Streifensystem beim Laser-Doppler-Profilsensor. Die Strahlenpaare sind hier getrennt dargestellt.

Zur Kalibrierung des Sensors werden die Streifenabstandsfunktionen $d_1(z)$ und $d_2(z)$ bestimmt. In der Strömungsmessung sendet jedes Teilchen beim Passieren des Messvolumens zwei Bursts mit den Dopplerfrequenzen f_1 und f_2 aus. Mit Hilfe der Ortskalibrationsfunktion

$$q(z) = \frac{d_2(z)}{d_1(z)} = \frac{f_1}{f_2} \quad (1)$$

kann aus den beiden Dopplerfrequenzen die Position z bestimmt werden. Die Teilchengeschwindigkeit v_x ergibt sich zu

$$v_x = f_1 d_1 = f_2 d_2. \quad (2)$$

Somit ist eine gleichzeitige Bestimmung des Ortes z und der Geschwindigkeitskomponente v_x innerhalb des Messvolumens möglich.

Ein Beispielaufbau zur technischen Realisierung des Profilsensors bei Trennung der Streifensysteme mittels Wellenlängenmultiplexing ist in Abbildung 2 gegeben.

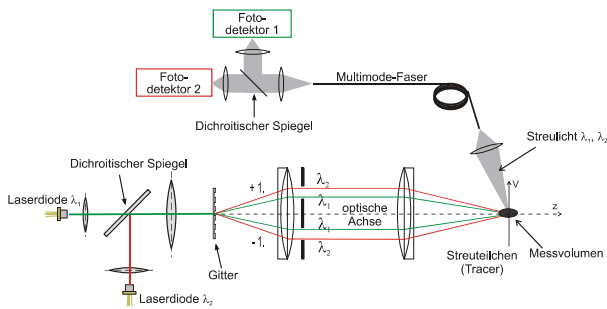


Abbildung 2: Prinzip-Aufbau des Laser-Doppler-Profilsensors mit Wellenlängenmultiplexing

Mit dem Profilsensor lassen sich Ortsauflösungen bis zu $0,6 \mu\text{m}$ und relative Geschwindigkeitsauflösungen bis $1 \cdot 10^{-4}$ erreichen. Die Länge des Messvolumens beträgt üblicherweise zwischen $250 \mu\text{m}$ und $2,5 \text{ mm}$. Der Sensor wurde bisher u.a. zur Messung von laminaren Grenzschichtprofilen [1], turbulenten Kanalströmungen [2] und Mikrokanälen erfolgreich eingesetzt.

3 Bestimmung der axialen Geschwindigkeitskomponente mit dem Laser-Doppler-Profilsensor

Tritt ein Teilchen, das eine axiale Geschwindigkeitskomponente v_z hat, durch das Messvolumen, so haben die ausgesendeten Burst-Signale einen Frequenz-Chirp (Abbildung 3).

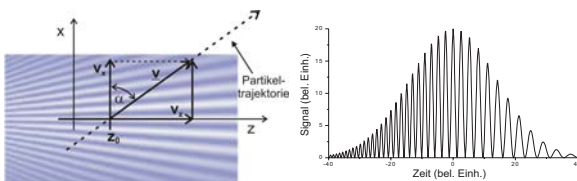


Abbildung 3: Frequenz-Chirp des Burst-Signals bei axialer Geschwindigkeit v_z des Streuteilchens

Die Periodendauer T der Oszillationen im Burstsignal folgt dabei dem Gesetz

$$\frac{dT(t)}{dt} = c \frac{v_z}{v_x} = c \tan \alpha. \quad (3)$$

Die Proportionalitätskonstante c ist charakteristisch für die Geometrie des Streifensystems. Durch Auswertung des Burst-Signals, z.B. mittels einer Kurzzeit-FFT, kann somit der Winkel α bestimmt werden. Die Ermittlung der Position z und der Geschwindigkeitskomponente v_x erfolgt mit den Formeln (1) und (2), wobei für f_1 und f_2 jetzt die Momentanfrequenzen beim Burst-Maximum verwendet werden. Die experimentell erreichte Messunsicherheit beträgt ca. $0,7^\circ$ für den Winkel α , 3% für v_z und $0,09\%$ für v_x [3].

4 Aufbau des Feldsensors

Ein Profilsensor ermöglicht die Strömungsmessung in einer Ortskoordinate und zwei Geschwin-

digkeitskomponenten. Zum Aufbau des 2d-3c-Feldsensors werden die Sendeoptiken von zwei Profilsensoren, wie in Abbildung 4 dargestellt, kombiniert, so dass sich ihre Messvolumina überlagern.

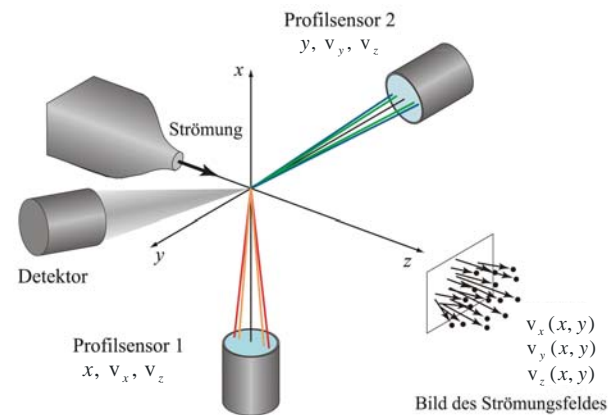


Abbildung 4: Konzept des 2d-3c-Feldsensors

Die Detektion des Lichtes kann über eine einzelne Empfangsoptik erfolgen. Ein Profilsensor liefert die x -Koordinate und die Geschwindigkeitskomponenten v_x und v_z . Der zweite Profilsensor ermöglicht die Bestimmung von y , v_y und v_z . Die Trennung der vier Streifensysteme erfolgt durch Wellenlängenmultiplexing, Frequenzmultiplexing oder eine Mischung beider Methoden.

5 Zusammenfassung

Der hier vorgestellte Feldsensor ermöglicht eine hochaufgelöste flächenhafte Strömungsmessung in drei Geschwindigkeitskomponenten. Potentielle Anwendungsfelder liegen in der Mikrofluidik, Turbulenzforschung und hochpräzisen Durchflussmessung.

6 Danksagung

Die vorgestellte Arbeit wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projektes Cz55/18-1 gefördert.

Literatur

- [1] J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller: "Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution", *Meas. Sci. Techn.* **13**(12): 1979–1989 (2002)
- [2] K. Shirai et al.: "Highly spatially resolved velocity measurements of a turbulent channel flow by a fiber-optic heterodyne laser-Doppler velocity-profile sensor", *Experiments in Fluids* **40**(3): 473 – 481 (2006)
- [3] L. Büttner, J. Czarske: "Determination of the axial velocity component by a laser Doppler velocity profile sensor", *J. Opt. Soc. Am. A* **23**(2): 444-454 (2006)