

Vermessung schräger Teilchentrajektorien mit dem Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor

Lars Büttner und Jürgen Czarske

Technische Universität Dresden
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Professur für Meß- und Prüftechnik
Helmholtzstraße 18, D-01062 Dresden
E-Mail: Buettner@iee.et.tu-dresden.de, Internet: www.lasermetrology.de

Kurzfassung

Es wird ein neuartiges Verfahren zur Messung der axialen Geschwindigkeitskomponente mit einem Laser-Doppler-Sensor vorgestellt. Der Sensor ist eine Erweiterung eines konventionellen Laser-Doppler-Anemometers und erlaubt durch die Erzeugung zweier fächerförmiger Interferenzstreifensysteme mit unterschiedlichen Wellenlängen die laterale Geschwindigkeitskomponente und die axiale Position für ein Streuteilchen gleichzeitig zu bestimmen. Es wird demonstriert, daß bei Teilchenbewegungen mit signifikanter Axialkomponente eine Frequenzänderung innerhalb der Burstsignale auftritt. Durch Auswertung dieser Frequenzänderung kann die Axialkomponente richtungssinnerkennend bestimmt werden. Experimentell konnte eine relative Meßunsicherheit von 3% erreicht werden.

1.) Einleitung

Die Geschwindigkeitsmessung nach dem Prinzip der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) basiert auf Lichtstreuung von in einer Strömung mitgeführten Teilchen an einem Interferenzstreifensystem, das sich im Schnittvolumen zweier sich kreuzender, kohärenter Laserstrahlen ausbildet. Dabei wird zunächst nur eine Lateralkomponente der Geschwindigkeit, v_x , registriert, die senkrecht zur optischen Achse (z-Achse), d.h. der Winkelhalbierenden der beiden Teilstrahlen, liegt. In dieser einfachen Form ist ein LDA auf eindimensionale Strömungen, d.h. laminare Strömungen oder schwach turbulente Strömungen mit einer Hauptströmungsrichtung, beschränkt. In komplizierteren Strömungsfeldern, z.B. mit ausgeprägten Wirbelstrukturen, müssen zusätzlich die beiden anderen Geschwindigkeitskomponenten mit erfaßt werden. Die zweite Lateralkomponente v_y kann durch Überlagerung eines zweiten, um 90° gedrehten Interferenzstreifensystems gemessen werden. Die Messung der Axialkomponente v_z ist dagegen mit einem weitaus höheren experimentellen Aufwand verbunden: Kommerziell geschieht dieses durch Überlagerung eines dritten Interferenzstreifensystems, wobei dessen optische Achse einen (möglichst großen) Winkel mit den anderen opt. Achsen bildet [1]. Dieses erfordert jedoch einen weiteren optischen Zugang zur Meßstelle sowie eine entsprechende Koordinatentransformation. Die meisten kommerziellen Anbieter verwenden diese Methode [2]. Alternativ können interferometrische Verfahren ausgenutzt werden wie (Referenz-LDA, Selfmixing-Effekt), bei denen das dopplerverschobene Streulicht in axialer Richtung meistens mit einer Faser detektiert und mit einem Anteil nicht-dopplerverschobenen Lichts, das direkt von der Strahlungsquelle abgekoppelt wurde, überlagert wird [3-5].

In diesem Beitrag wird ein neuartiges Verfahren zur Messung der axialen Geschwindigkeitskomponente präsentiert, das auf dem im Rahmen dieser Tagung bereits mehrfach vorgestellten

Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor [6-9] basiert. Bei diesem Sensor werden zwei fächerförmige Interferenzstreifensysteme, eines mit konvergierenden, eines mit divergierenden Interferenzstreifen, überlagert. Durch Auswertung der einzelnen Dopplerfrequenzen für jedes Streifensystem und ihres Verhältnisses läßt sich nicht nur die laterale Geschwindigkeitskomponente v_x , sondern hier zusätzlich die axiale Position z im Meßvolumen bestimmen. Da sich der Streifenabstand ebenfalls mit z ändert, erhält man im Fall von schrägen Teilchentrajektorien mit signifikanter v_z -Komponente eine Frequenzänderung innerhalb des Burstsignals (Chirp). In diesem Beitrag wird demonstriert, daß diese Frequenzänderung direkt proportional zur v_z -Komponente ist und daher für deren Bestimmung verwendet werden kann. Es wird dargelegt, daß für ein einzelnes Streuteilchen a) die laterale Geschwindigkeitskomponente v_x , b) die axiale Geschwindigkeitskomponente v_z und c) die Durchtrittsposition durch die optische Achse z_0 bestimmt werden können. Von der axialen Geschwindigkeitskomponente kann zudem der Richtungssinn erkannt werden.

2.) Prinzip der Bestimmung der Axialkomponente

Der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor basiert auf dem bekannten Laser-Doppler-Differenzverfahren [6-9]. Jedoch wird hier nicht ein Interferenzstreifensystem mit möglichst parallelen Interferenzstreifen, sondern es werden statt dessen zwei fächerförmige Streifensysteme verwendet, die entgegengesetzt ausgerichtet sind, siehe Abb. 1)a). Die Dopplerfrequenz eines jeden Streifensystems ist damit nicht mehr konstant, sondern wird eine Funktion der Position z entlang der optischen Achse $f_{1,2}=f_{1,2}(z)$. Durch die Zweifachmessung an beiden Streifensystem kann jetzt jedoch zusätzlich die z -Position eines Streuteilchens anhand einer Kalibrationsfunktion bestimmt werden, die aus den Quotienten der beiden Streifenabstände gebildet wird:

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

Mit der bekannten Position z können für die Berechnung der Geschwindigkeit die lokalen Streifenabstände, die vorher durch eine Kalibration bestimmt wurden, herangezogen werden. Damit ergibt sich für die Geschwindigkeitskomponente v_x :

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

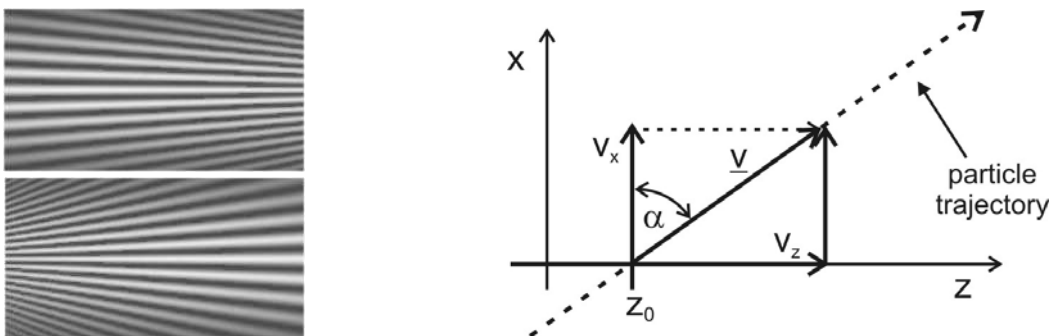


Abb. (1): Entgegengesetzt fächerförmige Interferenzstreifensysteme des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors und Kenngrößen der Streuteilchenbewegung.

Im folgenden wird der verallgemeinerte Fall betrachtet, daß zusätzlich eine signifikante Axialkomponente v_z der Geschwindigkeit auftritt. Die Geschwindigkeitskomponenten sind dann mit dem Betrag des Geschwindigkeitsvektors $v=|\underline{v}|$ und dem Winkel α der Trajektorie zur optischen Achse folgendermaßen verknüpft:

$$v_x = v \cos \alpha \quad , \quad v_z = v \sin \alpha \quad , \quad \tan \alpha = \frac{v_z}{v_x} \quad (3 \text{ a,b,c})$$

Für die weiteren Betrachtungen wird von der Annahme ausgegangen, daß sich die Streifenabstände linear mit dem Ort ändern:

$$\begin{aligned} d_1(z) &= d_{01} + c_1 \cdot z \\ d_2(z) &= d_{02} + c_2 \cdot z \end{aligned} \quad (4 \text{ a,b})$$

mit $c_{1,2}$ und $d_{01,02}$ als konstanten Parametern.

Ferner wird davon ausgegangen, daß die Teilchenbewegung in der x-z-Ebene verläuft ohne signifikante v_y -Komponente. Dann läßt sich die Trajektorie $\underline{r}(t)=[x(t),z(t)]^T$ bei gleichförmiger Bewegung folgendermaßen beschreiben:

$$\begin{aligned} x(t) &= v_x \cdot t \\ z(t) &= v_z \cdot t + z_0 \end{aligned} \quad (5 \text{ a,b})$$

wobei z_0 die z-Position zur Zeit $t=0$ angibt, die im folgenden als "Offset-Position" bezeichnet wird. Als ein markanter, ausgezeichneter Zeitpunkt kann der Durchtritt durch die optische Achse gewählt werden, da zu diesem Zeitpunkt die höchste Streulichtintensität, d.h. die größte Signalamplitude auftritt. Die Offset-Position wird daher im folgenden als der Ort festgelegt, bei dem das Teilchen die optische Achse überquert.

Setzt man nun Gleichung (5b) in die Gleichungen (4 a,b) ein und berücksichtigt man $f=v_x/d$, so erhält man für die Dopplerfrequenz folgenden Ausdruck:

$$f_{1,2}(v_x, v_z, z_0, t) = \frac{v_x}{d_{1,2}(z(t))} = \frac{v_x}{d_{01,2} + c_{1,2} v_z t + c_{1,2} z_0} \quad (8)$$

Die Dopplerfrequenz wird offenbar zeitabhängig, sobald eine nennenswerte Axialkomponente v_z auftritt. Dieser Umstand bildet die Grundlage für das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren. Die Zeitabhängigkeit der Dopplerfrequenz („Chirp“) läßt sich einfach auswerten, indem die nach der Zeit abgeleitete Periodendauer $T=1/f$ betrachtet wird:

$$\frac{dT_{1,2}(t)}{dt} = c_{1,2} \frac{v_z}{v_x} \quad (9)$$

Dieser Ausdruck ist zeitlich konstant und direkt proportional zur Axialkomponente v_z , weshalb er zu deren Bestimmung herangezogen werden kann.

Aus dieser Ableitung werden folgende Eigenschaften ersichtlich:

- Die Axialkomponente kann direkt über die zeitliche Änderung der Periodendauer-Zeitfunktion bestimmt werden. Genauer gesagt, ist der Chirp ein Maß für das Verhältnis der lateralen und der axialen Geschwindigkeitskomponente, sprich dem Winkel α .
- Da die Dopplerfrequenz sowohl ansteigen als auch abfallen kann, kann zwischen einer positiven und einer negativen Geschwindigkeit unterschieden werden. Die Bestimmung der Axialkomponente nach diesem Prinzip ist also a priori richtungssinnerkennend.
- Von einem einzelnen Streuteilchen können daher folgende Bahngrößen bestimmt werden:
 - Die laterale Geschwindigkeitskomponente $|v_x|$
 - Die axiale Geschwindigkeitskomponente v_z einschließlich des Vorzeichens
 - Die Durchtrittsposition durch die optische Achse z_0

3.) Experimenteller Aufbau und Kalibrierung

Der Aufbau des Profilsensors ist in Abb. (2) dargestellt. Die kollimierten Strahlen zweier single-mode Laserdioden (Wellenlängen 660 nm und 785 nm) wurden mit einem dichroitischen Spiegel kollinear überlagert. Ein Phasenbeugungsgitter wurde zusammen mit einem Kepler-Teleskop zur Erzeugung der Streifenysteme im Meßvolumen eingesetzt [6-9]. Das Streulicht wurde über eine Multimodefaser zur Empfangseinheit geführt, dort mit einem dichroitischen Spiegel in die zwei Wellenlängen separiert und mit zwei Photodioden detektiert. Deren Signale wurden mittels einer 12 Bit Analog/Digitalwandlerkarte in einen Standard-PC eingelesen und dort mit einem LabVIEW-Programm weiterverarbeitet.

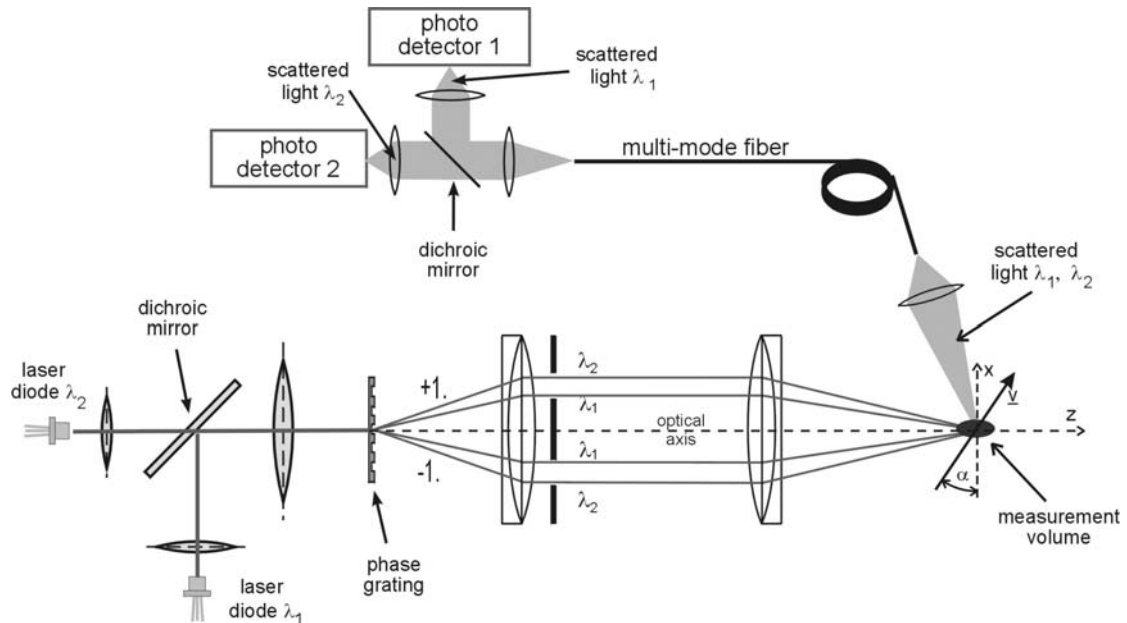


Abb. (2): Experimenteller Aufbau des LDA-Profilsensors.

Für die Kalibrierung des Sensors wurde ein dünner Wolfram-Draht verwendet, der an einem Chopper befestigt, mit definierter Geschwindigkeit und Position senkrecht zur optischen Achse durch das Meßvolumen rotierte. Durch Messung der Dopplerfrequenzen für beide Kanäle und Verfahren des Choppers entlang der optischen Achse wurden die beiden Streifenabstandsfunktionen (Abb. (3a)) und die Quotientenkurve (Abb. 3b) ermittelt. Die Forderung nach einem linearen Verlauf wird offenbar in sehr guter Näherung erfüllt.

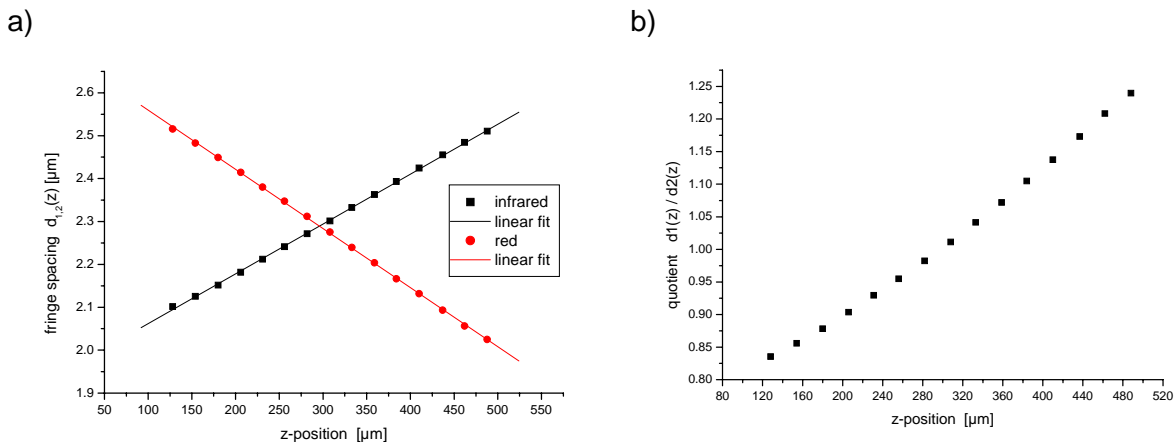


Abb. (3): Kalibrierung des LDA-Profilsensors. a) Streifenabstandsfunktionen $d_{1,2}(z)$. Beide Streifenysteme weisen in guter Näherung einen linearen Verlauf des Streifenabstandes auf. b) Kalibrationskurve $q(z) = d_1(z)/d_2(z)$ für die Positionsbestimmung.

Aus einer linearen Regression ergeben sich die in Gl. (4 a,b) definierten Parameter:

$$\begin{aligned} d_{01} &= 1,95 \mu\text{m} & c_1 &= 1,16 \cdot 10^{-3} \\ d_{02} &= 2,70 \mu\text{m} & c_2 &= -1,38 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Die Quotientenfunktion ist monoton ansteigend mit einer mittleren Steigung von $1,14 \text{ mm}^{-1}$, wodurch eine eindeutige und präzise Ortsbestimmung gewährleistet ist.

4.) Signalverarbeitung

Der Algorithmus zur Chirp-Detektion und Auswertung wurde komplett in der graphischen Programmiersprache LabVIEW realisiert. Das Programm filterte zunächst mit einem Bandpaß die Signale, um den Gleichanteil und hochfrequentes Rauschen zu entfernen. Danach wurden mittels einer Hilbert-Transformation die Signaleinhüllenden bestimmt und die Signale normiert. Die Einhüllenden wurden mit Gaußfunktionen gefittet, um dadurch die Anfangs- und Endzeiten (definiert über die $1/e^2$ -Schwelle) sowie die Zeitpunkte t_{Max} , an denen die maximalen Signalamplituden auftreten, zu bestimmen. Die Anfangs- und Endzeiten definieren das Zeitfenster, welches für die Kurzzeit-FFT genutzt wird. Der Zeitpunkt der maximalen Amplitude t_{Max} definiert den Durchtritt durch die optische Achse; mit den Momentanfrequenzen zu diesem Zeitpunkt wird später die Offset-Position z_0 berechnet. Zur Berechnung der Periodendauer-Zeit-Funktionen wird eine Kurzzeit-FFT verwendet, die das Auswertefenster mit minimaler inkrementeller Schrittweite über die Zeitsignale schob. An die Periodendauer-Zeit-Funktionen wurden Regressionsgeraden gefittet, aus denen die eigentlichen Meßparameter bestimmt werden: Die Momentanfrequenzen zu der Zeit t_{Max} werden genutzt, um über die Kalibrationsfunktion (Gl. (1) und Abb. (3b)) die Durchtrittsposition z_0 durch die optische Achse zu ermitteln. Mit den lokalen Streifenabständen an dieser Position wird anhand von Gl. (2) die laterale Geschwindigkeitskomponente v_x berechnet. Schließlich wird anhand von Gl. (9) über die Steigungen der Regressionsgeraden der Periodendauer-Zeit-Funktion die axiale Geschwindigkeitskomponente ermittelt.

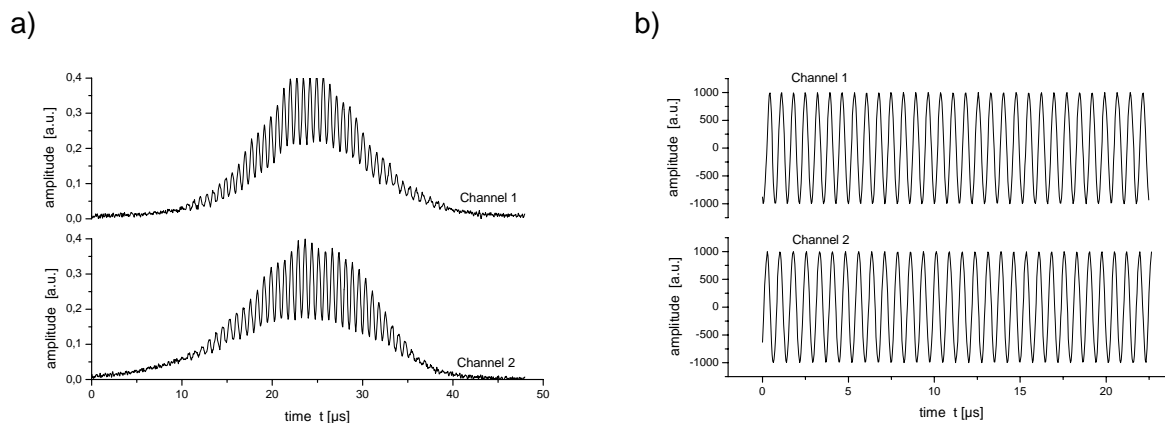


Abb. (4): a) Unverarbeitete Burstsignale von den Photodektoren. b) Burstsignale nach der Signalaufbereitung (Bandpaß-Filterung, Normierung and Bregrenzung zu den $1/e^2$ -Grenzen).

Abb. (4) zeigt die Aufbereitung der Signale für die Kurzzeit-FFT: Abb. (4a) zeigt die Original-Signale, wie sie am Ausgang der Photodetektoren zur Verfügung stehen. In Abb. (4b) b) sind die gleichen Signale zu sehen, nachdem sie Bandpaß-gefiltert und auf eine konstante Amplitude normiert wurden und auf das Zeitintervall, das innerhalb der $1/e^2$ -Grenzen liegt, beschnitten wurden.

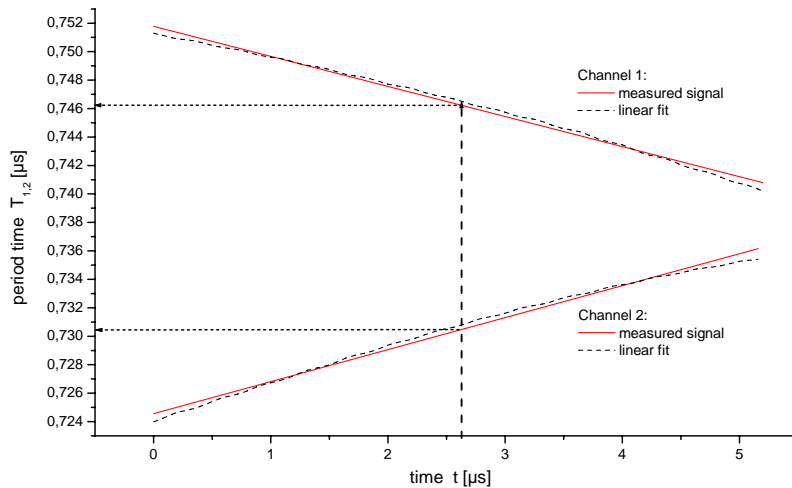


Abb. (5): Von der Kurzzeit-FFT erhaltene Periodendauer-Zeit-Funktion mit Regressionsgeraden.

Bezüglich der Länge des Auswertefensters der Kurzzeit-FFT muß ein Kompromiß gefunden werden zwischen einem langen Auswertefenster für eine ausreichende Anzahl von Perioden für eine hohe Frequenzauflösung einerseits, und einem kurzen Auswertefenster für eine hohe Zeitaufauflösung andererseits. Hier wurde die Länge des Auswertefenster zu etwa 75% der Gesamtsignallänge gewählt, wodurch genügend Signalperioden für die FFT-Auswertung zur Verfügung standen. Das Zeitfenster der erhaltenen Periodendauer-Zeit-Funktion hatte demnach eine Länge von 25% der Gesamtsignallänge. Dieses war ausreichend, um den linearen Anstieg aufzulösen und eine Regressionsgerade zu berechnen. Abb. (5) zeigt als Beispiel die Periodendauer-Zeit-Funktion des Burstsignals von Abb. (5) sowie die entsprechenden Regressionsgeraden. Der Zeitpunkt $t = 2,6 \mu\text{s}$ entspricht dem Auftreten der maximalen Amplitude. Die Momentanfrequenzen zu diesem Zeitpunkt werden für die Berechnung der Offset-Position z_0 und der lateralen Geschwindigkeitskomponente verwendet

5.) Experimentelle Ergebnisse

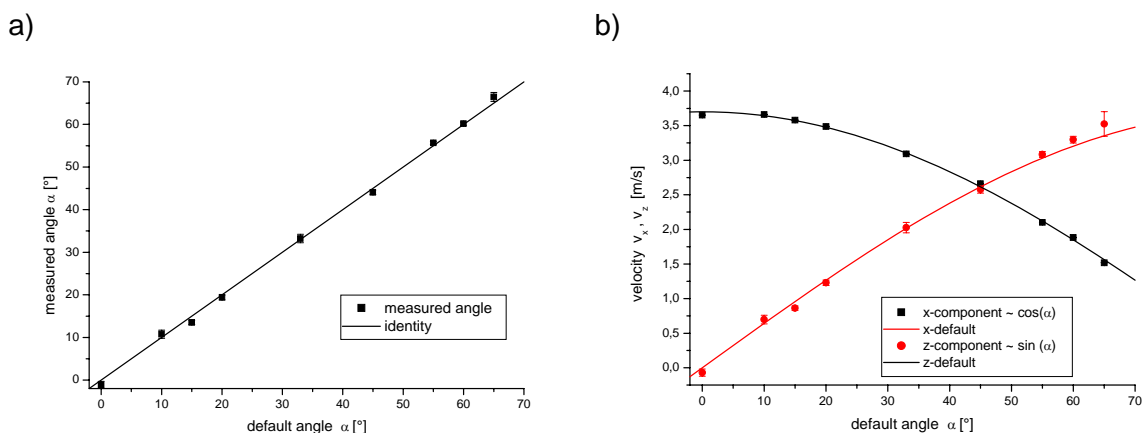


Fig. (6): Test a) der Winkelmessung und b) der Messung der Geschwindigkeitskomponenten für unterschiedliche Anstellwinkel des Choppers. Es zeigt sich eine sehr gute Überstimmung der Meßwerte mit den Vorgabewerten.

Um die Genauigkeit der Axialkomponente zu bestimmen, wurde der Chopper mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotiert und unter verschiedenen Winkel bezüglich der opt. Achse ange stellt. Es wurden die Axialgeschwindigkeit, die Lateralgeschwindigkeit und der Winkel zwischen den beiden Komponenten aufgezeichnet und dabei über 20 Burstsignale gemittelt.

Abb. (6) zeigt das Ergebnis. In Abb. (6a) ist der gemessene Winkel in Abhängigkeit vom experi mentell eingestellten Winkel dargestellt, bei dem sich eine hervorragende Übereinstimmung zeigt. Die relative statistische Unsicherheit des Winkels betrug im Mittel lediglich $\sigma_{\alpha} = 0,7^{\circ}$. Abb. (6b) zeigt die gemessenen Beträge der lateralen und axialen Geschwindigkeitskomponenten (Datenpunkte) sowie die Erwartungswerte als durchgezeichnete Kurven. Auch hier ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Die relativen statistischen Fehler betragen im Mittel $\sigma_{v_x}/v_x = 0,09\%$ für die laterale Geschwindigkeitskomponente sowie $\sigma_{v_z}/v_z = 3\%$ für die axiale Ge schwindigkeitskomponente.

Für die Bestimmung der Ortsauflösung wurde der Streudraht mit konstanter Geschwindigkeit $|v| = 3,7$ m/s und mit konstantem Winkel von $\alpha = 45^{\circ}$ zur optischen Achse ($\Rightarrow v_x = v_z = |v|/\sqrt{2} = 2,6$ m/s) durch das Meßvolumen bewegt und nun der Ort z_0 für verschiedene Vorgabewerte gemessen. Abb. (7) faßt die Ergebnisse zur Bestimmung der Ortsauflösung zusammen. Abb. (7a) zeigt die gemessene Position in Abhängigkeit von der Vorgabeposition, es ergibt sich eine hervorragende Übereinstimmung. Die Ortsauflösung ergibt sich anhand der Standardabweichung über 20 wiederholte Messungen an einer Position. Abb. (7b) zeigt das Ergebnis für die Mitte des Meßvolumens in Abhängigkeit von Signal-zu-Rauschabstand (SNR). Experimentell konnte durch Einfügen einer verstellbaren Aperturblende in die Empfangsoptik die Streulichtlei stung und damit das auftretende SNR stufenlos eingestellt werden. Die Ortsauflösung liegt auch bei schrägen Trajektorien im Mikrometerbereich und verbessert sich erwartungsgemäß mit stei genden SNR. Bei einem SNR von 10 dB konnte beispielsweise eine Ortsauflösung von $\sigma_z = 2$ μm erreicht werden.

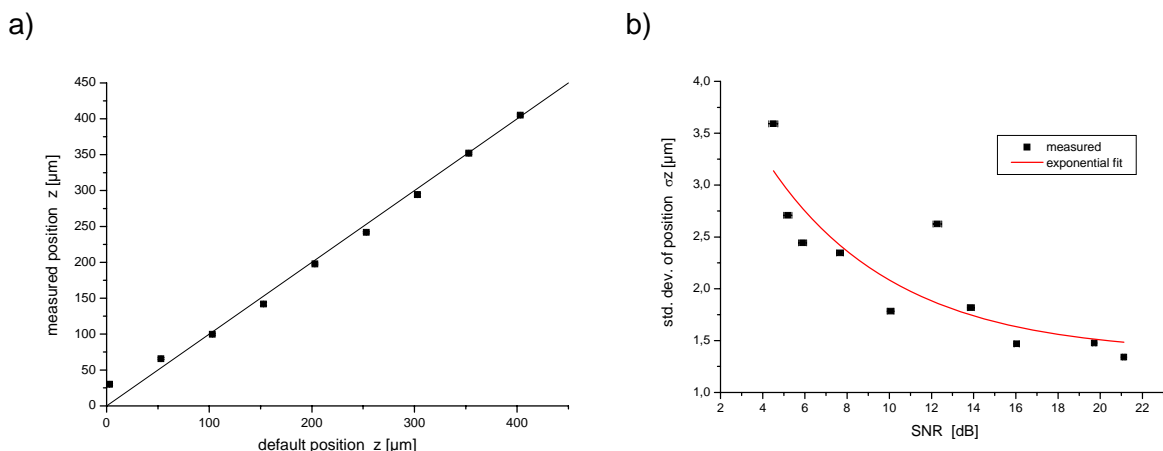


Abb. (7): a) Messung zur Bestimmung der Position: Gemessene Position in Abhängigkeit von der Vorgabeposition. b) Ermittelte Ortsauflösung für verschiedene Signal-zu-Rauschabstände.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde erstmals dargelegt, daß der im Rahmen der GALA-Tagung bereits mehrfach vorgestellte Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor auch für die Messung der axialen Geschwindigkeitskomponente genutzt werden kann. Eine Modifikation des experimen tellen Aufbaus ist dafür nicht notwendig, lediglich bei Signalverarbeitung ist ein erweiterter Algo rithmus zu verwenden. Das Meßprinzip liegt in der Verwendung der fächerförmigen Interferenz streifensysteme begründet, die bei dem Sensor verwendet werden: Durch die Abhängigkeit des Interferenzstreifenabstandes von der axialen Position ist die momentane Dopplerfrequenz nicht

nur von der Geschwindigkeit, sondern auch von der Axialposition bestimmt. Durch eine signifikante axiale Geschwindigkeitskomponente tritt innerhalb der Burstsignale eine Frequenzänderung auf, die zu deren Bestimmung genutzt werden kann. Es wurde gezeigt, daß die zeitliche Änderung der Periodendauer direkt proportional zur axialen Geschwindigkeitskomponente ist. Mit dem vorgestellten Chirp-Detektions-Algorithmus ist es daher möglich,

- i) die laterale Geschwindigkeitskomponente $|v_x|$
- ii) die axiale Geschwindigkeitskomponente v_z
- iii) die Durchtrittsposition durch die optische Achse z_0

für ein einzelnes Streuteilchen zu bestimmen. Die Messung der Axialkomponente erfolgt zudem richtungssinnerkennend. Experimentell konnten Meßunsicherheiten von 0,09% für die laterale Komponente, 3% für die axiale Komponente, $0,7^\circ$ für den Winkel zur optischen Achse und Ortsauflösungen im Mikrometerbereich ($2 \mu\text{m}$ bei 10 dB SNR) erreicht werden.

Das Verfahren kann weiter verbessert werden, indem die Frequenz-Zeit-Auswertung durch ein Trägerfrequenzverfahren („fringe-bias“-Technik) ergänzt wird.

Danksagung

Die Autoren sind insbesondere Herrn Dipl.-Ing. (FH) Peter Leppelt für die Entwicklung des Signalverarbeitungsalgorithmus sowie Herrn Tammo Böntgen für die Simulation zu Dank verpflichtet. Die Vorbereitung des experimentellen Aufbaus durch Cedric Gliere darf ebenfalls nicht unerwähnt bleiben. Ein weiterer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die stete Förderung der Arbeiten.

Literatur

- [1] G. Byun, S.M. Ölçmen, R.L. Simpson, „A miniature laser-Doppler velocimeter for simultaneous three-velocity component measurements”, Meas. Sci. Technol. 15, S. 2075-2082, 2004
- [2] Fa. Dantec Dynamics, <http://www.dantecdynamics.com/LDA/Princip/Index.html>
- [3] T. Tanaka, G.B. Benedeck, „Measurement of the velocity of blood flow in vivo using a fiber optic catheter and optical mixing spectroscopy”, Appl. Opt. 14, pp. 189-196, 1975
- [4] H. Nishihara, J. Koyama, N. Hoki, F. Kajiya, M. Hironaga, M. Kano, „Optical-fiber laser Doppler velocimeter for high-resolution measurement of pulsatile blood flows”, Appl. Opt. 21, pp. 1785-1790, 1982
- [5] F.F.M. de Mul, M. H. Koelink, A.L. Weijers, J. Greve, J.G. Aarnoudse, R. Graaff, A.C.M. Dassel, „Self-mixing laser-Doppler velocimetry of liquid flow and blood perfusion in tissue”, Appl. Opt. 31, p. 5844, 1992
- [6] L. Büttner, J. Czarske, H. Knuppertz, „Laser Doppler velocity profile sensor with sub-micrometer spatial resolution that employs fiber-optics and a diffractive lens”, Applied Optics Vol. 44, No. 12, S. 2274-2280, 2005
- [7] J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller, „Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution”, Meas. Sci. Technol. 13, S. 1979-1989, 2002
- [8] K. Shirai, L. Büttner, T. Pfister, P. Leppelt, J. Czarske, H. Müller, D. Dopheide, S. Becker, H. Lienhart, F. Durst, „Heterodyne laser Doppler velocity profile sensor used for shear flow measurements with micrometer resolution”, 12. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik”, S. 5.1-5.8, Karlsruhe, 7.-9. Sept. 2004
- [9] J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller, D. Dopheide, S. Becker, H. Lienhart, F. Durst, „Ortsaufgelöste Vermessung turbulenter Scherströmungen mittels Laser-Doppler-Profilsensor”, 11. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik”, S. 1.1-1.8, Braunschweig, 9.-11. Sept. 2003