

Miniaturisierbarer Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor auf der Basis von diffraktiver Mikrooptik

Lars Büttner und Jürgen Czarske

Laserzentrum Hannover e.V., Grp. Lasermeßtechnik
Hollerithallee 8, 30419 Hannover, email lb@lzh.de, cz@lzh.de

Kurzfassung

Dieser Beitrag berichtet über eine miniaturisierbare Version des LDA-Geschwindigkeitsprofilsensors mittels Faserzuführung und einer diffraktiven Linse. Der Profilsensor erlaubt eine Positionsbestimmung von Streuteilchen im Meßvolumen mit einer örtlichen Auflösung von $<1\mu\text{m}$. Die beiden dem Prinzip zugrunde liegenden Streifensysteme mit konvergenten und divergenten Interferenzstreifen werden durch eine geeignete Kombination von Linsen mit hoher und geringer Dispersion erzeugt. Da die beiden Wellenlängen über eine einzelne Faser zugeführt werden und keine aufwendigen Justageelemente für deren Ausrichtung und Überlagerung benötigt werden, läßt sich der Sensor kompakt aufbauen.

1.) Einleitung

Auf dem Gebiet der Strömungsmechanik werden für eine zunehmende Zahl von Anwendungen örtlich hochauflösende Geschwindigkeitsmeßtechniken benötigt. In der Turbulenzforschung sind Strömungsprofilmessungen im Bereich der Kolmogorov-Mikroskala, in der Biomedizintechnik an Stents und Miniatur-Blutpumpen von großem Interesse. In dem neu aufkommenden Gebiet der Mikro- und Nanofluidik besteht Bedarf an Strömungsmessungen in miniaturisierten Bauteilen wie Mikromischern, Lab-on-a-Chip-Systemen, Einspritzdüsen, etc. Für diese Aufgabenstellung wurde in der Gruppe Lasermeßtechnik des LZH ein LDA-Geschwindigkeitsprofilsensor mit einer Ortsauflösung im Mikrometerbereich entwickelt und erfolgreich eingesetzt [1-4]. Das Prinzip basiert auf der Erzeugung von zwei LDA-Meßvolumina, eines mit konvergierenden und eines mit divergierenden Interferenzstreifen mit Hilfe zweier Laserwellenlängen. Diese spezielle Anordnung wurde bisher durch zwei Laserdioden erreicht, deren Strahlen zunächst mit einem dichroitischen Spiegel unter 45° Inzidenz überlagert werden müssen. Sowohl die rechtwinklige Anordnung der Laserdioden zueinander als auch die Notwendigkeit, beide Laserdioden mit x-, y- und z-Justageelementen zu versehen, führt zu einem relativ großen Meßkopf, was die Möglichkeit für eine Miniaturisierung stark einschränkt. Ferner kann eine Fehljustage, z.B. als Folge von Erschütterungen, zu einer mangelnden Überlappung der einzelnen Meßvolumen führen (lateraler Versatz), was die notwendige Koinzidenz-Messung erschwert oder komplett verhindert.

Die Vorteile fasergestützter Sensoren wie flexible Handhabung und ein kleiner Meßkopf wurden auch für die LDA-Technik früh erkannt [5-7]. In diesem Beitrag soll auf die Verwendung von Faseroptik und einer diffraktiven Linse für den LDA-Profilsensor eingegangen und die Anforderungen an den optischen Meßkopf herausgestellt werden. Beide Wellenlängen werden über eine einzelne Faser dem Meßkopf zugeführt. Da die beiden Wellenlängen stets

ineinander verlaufen, kann eine transversale Verschiebung der Meßvolumina a priori nicht auftreten, und man kommt mit einer deutlich geringeren Anzahl von Justageelementen aus, wodurch sich der Sensor deutlich kompakter realisieren läßt. Die Erzeugung der divergierenden und konvergierenden Interferenzstreifen kann durch eine gezielte Einstellung der Dispersion mit Hilfe einer Kombination aus einer diffraktiven Linse und achromatischen Linsen erreicht werden.

2.) Das Konzept

Für eine Darstellung des Prinzips des Geschwindigkeits-Profilsensors sei an dieser Stelle auf die vorherigen Publikationen verwiesen [1-4].

Folgende Anforderungen sind an das Meßvolumen zu stellen:

- i. Die beiden einzelnen Meßvolumina sollten, da das Sensorprinzip auf einer Koinzidenzmessung basiert, von vergleichbarer Größe sein und sich optimal überlagern.
- ii. Für die Erzeugung der konvergenten und divergenten Interferenzstreifen sollte sich die Strahlteile für die eine Wellenlänge *vor*, die der anderen Wellenlänge *hinter* dem Meßvolumen befinden.

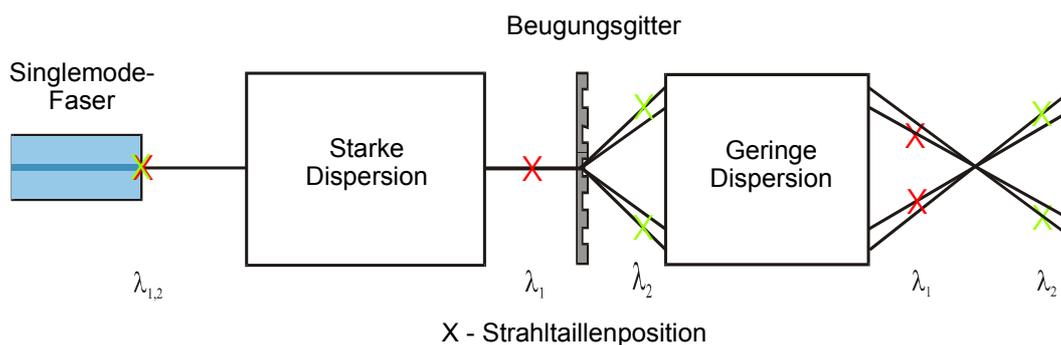


Abb. (1): Dispensionsmanagement beim Divergenz-Profilsensor. Für die Abbildung vor dem Strahlteiler wird eine hohe Dispersion benötigt, um die Strahlteile der beiden Wellenlängen örtlich zu trennen. Die für die Überschneidung der Teilstrahlen benötigte Optik sollte dagegen eine vernachlässigbare Dispersion besitzen, damit sich die einzelnen Meßvolumina bestmöglich überlagern.

Durch eine geeignete Anordnung von Optiken mit starker und geringer Dispersion lassen sich beide Forderungen gleichzeitig erfüllen („Dispensionsmanagement“), siehe Abb. (1). Die aus der Faser austretende Singlemode-Strahlung, die beide Wellenlängen enthält, wird zunächst mit einer stark dispersiven Optik abgebildet. Die Dispersion führt zu einem großen chromatischen Fehler der Abbildungsoptik, ein Fall, den man üblicherweise zu vermeiden sucht. Im Fall des LDA-Profilsensors führt die chromatische Aberration zu der gewünschten Trennung der Strahlteile beider Wellenlängen in longitudinaler Richtung. Das strahlteilende Element, in diesem Fall ein Beugungsgitter, dessen +1. und -1. Beugungsordnungen als die Teilstrahlen genutzt werden, wird nun zwischen den beiden Strahlteilen platziert. Eine Abbildungsoptik mit geringer Dispersion wird genutzt, um die beiden Teilstrahlen zur Überschneidung zu bringen. Diese Optik bildet also die Anordnung aus Strahlteile der ersten Wellen-

länge, Ursprung der Teilstrahlen und Strahlteile der zweiten Wellenlänge ab: 1. Strahlteile, Kreuzungspunkt, zweite Strahlteile, siehe Abb. (1). Durch die Verwendung von Linsen mit geringer chromatischer Aberration für diese letzte Abbildung wird sichergestellt, daß sich die einzelnen Meßvolumina bestmöglich überlappen. Damit sind die beiden oben genannten Anforderungen erfüllt.

Für die Auswahl der Optiken ist es sinnvoll, einen Blick auf deren Funktionsweisen zu werfen. Prinzipiell lassen sich abbildende Elemente in drei verschiedene Klassen einteilen:

- A. *Reflektive Optiken.* Diese weisen keinerlei Dispersion auf, jedoch ändern sie die Richtung der optischen Achse und sind justageempfindlich. Sie sind geeignet für gefaltete Strahlengänge.
- B. *Refraktive Optiken* weisen eine moderate chromatische Aberration auf, die nur von der Materialdispersion verursacht wird. Durch Kombination von Einzellinsen unterschiedlicher Materialien lassen sich Achromaten realisieren, deren chromatische Aberration deutlich reduziert ist.
- C. *Diffraktive Optiken* besitzen Oberflächenstrukturen mit Strukturgrößen in der Größenordnung der Lichtwellenlänge, so daß Beugung der vorherrschende physikalische Effekt ist [8]. Da hier die Brennweite bzw. die Dispersion direkt (invers) proportional zur Wellenlänge ist, besitzt dieser Typ von allen Abbildungselementen die größte Dispersion (im Nahinfrarotbereich ca. 30mal höher als die von refraktiven Linsen). Die resultierende hohe chromatische Aberration ist für die meisten Anwendungen ein entscheidender Nachteil, kann hier jedoch vorteilhaft für die Trennung der Strahlteilpositionen genutzt werden.

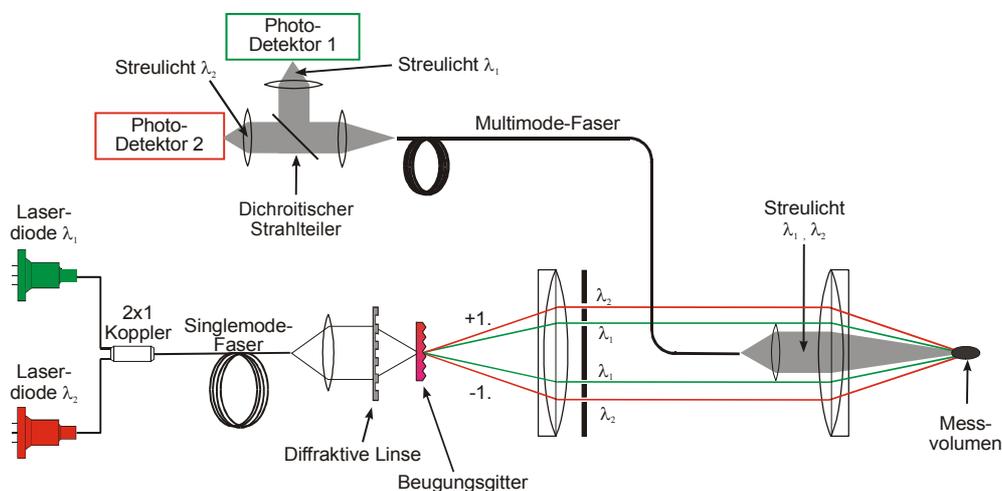


Abb. (2): Realisierung des Divergenz-Profilsensors basierend auf Lichtleitfasern und diffraktiver Mikrooptik.

Für die Realisierung des faseroptischen LDA-Profilsensors ist es daher zweckmäßig, für die Abbildung vor dem Gitter eine diffraktive Linse zu verwenden (die in Kombination mit einer refraktiven Linse ein Kepler-Teleskop bildet) und für die Abbildung hinter dem Gitter achromatische Linsen einzusetzen [9]. Der komplette Aufbau ist in Abb. (2) dargestellt. Als Lichtquellen werden zwei Laserdioden von 658 nm und 825 nm Wellenlänge eingesetzt, deren Strahlen in zwei Singlemode-Fasern eingekoppelt, dann mit einem Faserkoppler vereinigt

und dem faseroptischen Meßkopf zugeführt werden. Das Streulicht wird in eine Multimode-Faser eingekoppelt und zur Detektionseinheit geleitet. Nach Wellenlängenselektion mit einem dichroitischen Spiegel werden die beiden spektralen Anteile mit zwei Photodetektoren in elektrische Signale umgewandelt und mit einem PC ausgewertet. Als Testobjekt dient ein dünner Wolframdraht, der sich, an einem optischen Chopper befestigt, mit konstanter Geschwindigkeit an einer festen Position durch das Meßvolumen bewegt.

3.) Die Ergebnisse

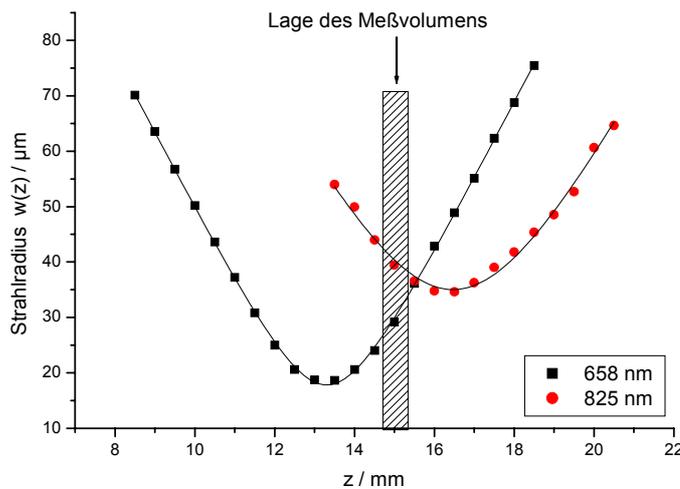


Abb. (3): Charakterisierung des Profilsensors mit diffraktiver Linse und Faserzuführung. Dargestellt sind die Kaustikkurven der zu den unterschiedlichen Wellenlängen gehörenden Strahlen sowie der Bereich des Meßvolumens. Durch die starke chromatische Aberration der Linse kann eine Strahltaile vor und eine hinter dem Meßvolumen angeordnet werden.

Abb. (3) zeigt die Kaustikkurven der Strahlen der beiden Wellenlängen um den Bereich des Meßvolumens, sowie skizziert die Lage des Meßvolumens. Es ist zu erkennen, daß die Strahltaillen der beiden Wellenlängen deutlich getrennt liegen und sich eine vor, die andere hinter dem Meßvolumen befindet. Die diffraktive Linse besitzt bei 825 nm eine Brennweite von 20 mm und bei 658 nm eine Brennweite von 25 mm, womit sich eine Trennung der Strahltaillenpositionen von 5 mm ergeben würde. Im Experiment ist die Trennung mit 3,17 mm geringer als der theoretische Wert. Dieser gilt jedoch nur unmittelbar hinter der diffraktiven Linse. Aufgrund der (nicht linearen) Abbildung der Strahltaillenlagen durch das zweite Teleskop, kann sich die Trennung von diesem Wert je nach Justage unterscheiden.

Abb. (4) zeigt die Amplitude des Doppler-Burstsignals im Frequenzspektrum für beide Wellenlängen in Abhängigkeit von der Position entlang der optischen Achse. Diese Kurven definieren die Lage und Ausdehnung des Meßvolumens. Es tritt eine zufriedenstellende Überlappung zwischen den beiden einzelnen Meßvolumina auf, die Verschiebung beträgt lediglich 180 μm. Diese ist auf die verbleibende chromatische Aberration der verwendeten Achromaten zurückzuführen, die bei der verwendeten Brennweite von 60 mm etwa 0,3% entspricht. Durch die verbleibende Verschiebung kann nicht die gesamte Länge des 825 nm Meßvolumens für die Koinzidenzmessung genutzt werden, jedoch ist die effektive Meßvolumenlänge mit 700 μm noch für die meisten Anwendungen ausreichend. In lateraler Richtung tritt stets eine optimale Überlappung auf, da die beiden Strahlen unterschiedlicher Wellenlänge von einem Punkt, dem Faserende, ausgehen und danach kollinear durch das optische System geführt werden.

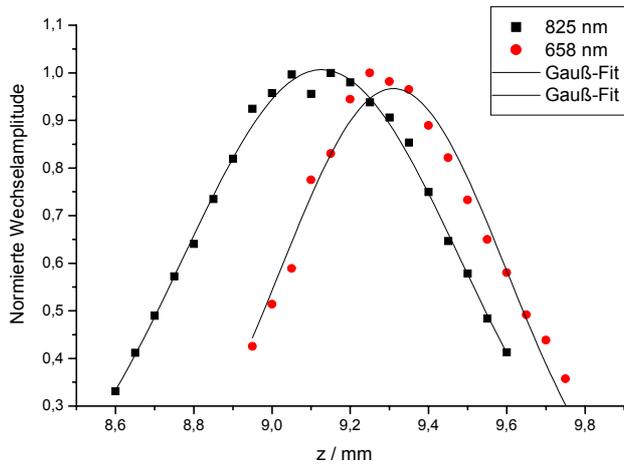


Abb. (4): Überlagerung der beiden einzelnen Meßvolumina, dargestellt anhand des Verlaufes der Wechselamplitude des Doppler-Signals entlang der optischen Achse. Die Verschiebung von $180 \mu\text{m}$ ist auf die verbleibende chromatische Aberration der verwendeten Achromate zurückzuführen.

Abb. (5) zeigt den Verlauf der Streifenabstände für beide Wellenlängen, sowie Abb. (6) die daraus berechnete Quotientenkurve für die Ortszuordnung. Es ergeben sich wie erwartet eine monoton ansteigende und monoton abfallende Streifenabstandskurve als Hinweis für das Vorliegen eines divergenten und eines konvergenten Streifensystems. Die Kalibrationskurve kann in sehr guter Näherung durch eine Gerade beschrieben werden, so daß eine eindeutige Ortszuordnung gewährleistet ist. Die Steigung der Kalibrationskurve beträgt $0,69 \text{ mm}^{-1}$ und stellt damit den höchsten bisher publizierten Wert dar. Anhand einer Meßfehlerbetrachtung [4] kann hieraus eine Ortsauflösung von 500 nm abgeschätzt werden. Aufgrund der mechanischen Stabilität der Kalibrationsobjektes ($\approx 1 \mu\text{m}$) ist diese allerdings schwierig nachzuweisen.

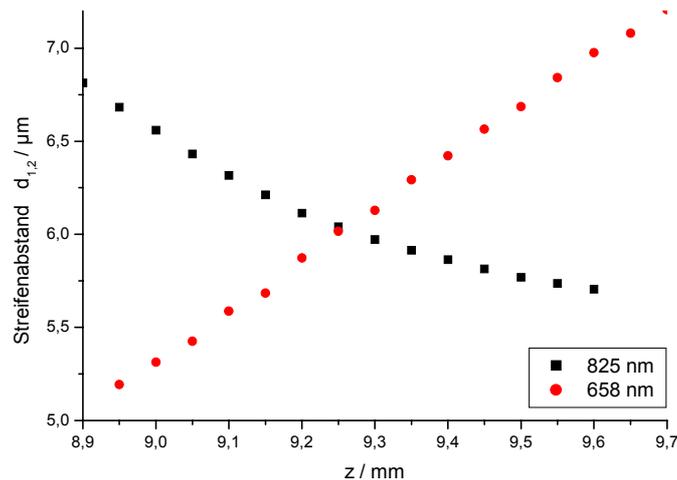


Abb. (5): Links: Ansteigende und abfallende Streifenabstandsverläufe $d_{1,2}(z)$ als Indiz für das Vorliegen eines konvergierenden und eines divergierenden Interferenzstreifensystems.

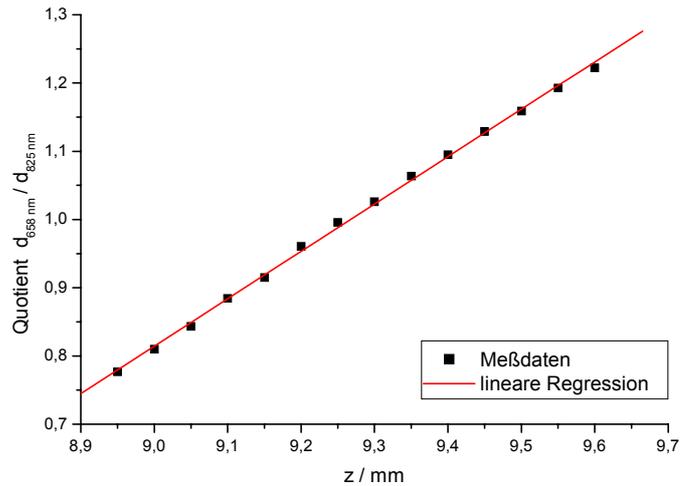


Abb. (6): Quotientenfunktion $q(z)=d_2(z)/d_1(z)$, die für die Ortsbestimmung genutzt wird.

4.) Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden der LDA-Profilsensor auf Basis von Fasern und diffraktiver Mikrooptik vorgestellt und charakterisiert. Die für den Profilsensor notwendigen zwei Wellenlängen werden über eine Faser dem optischen Meßkopf zugeführt und laufen daher in dem Meßkopf a priori kollinear ineinander. Aus diesem Grund kann auf aufwendige Justageelemente für die Ausrichtung und Überlagerung der einzelnen Strahlen verzichtet und der Sensor deutlich kompakter aufgebaut werden. Die Erzeugung der überlagerten Interferenzstreifensysteme mit konvergierenden und divergierenden Streifen kann durch ein gezieltes „Dispersionsmanagement“ erreicht werden. Eine diffraktiver Linse mit hoher chromatischer Aberration sorgt für eine räumliche Trennung der Strahlteilen der einzelnen Wellenlängen. Achromatische Linsen mit geringer Dispersion führen nach der Strahlteilung die Partialstrahlen und bringen diese an nahezu gleicher Position zur Überlagerung. Als Resultat entsteht ein bichromatisches Meßvolumen von 700 μm effektiver Länge. Eine Ortsauflösung 500 nm ist theoretisch zu erwarten.

Der miniaturisierbare Sensor ermöglicht dadurch die Vermessung von Strömungsgrenzschichten mit Submikrometer-Ortsauflösung ohne mechanische Traversierung.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die teilweise Förderung der Arbeiten, Herrn H. Knuppertz und Herrn Prof. J. Jahns von der Fernuniversität Hagen für die Anfertigung der diffraktiven Linse sowie Joash Osen und Patrick Becker für die Mitarbeit bei den Experimenten.

Literatur

- [1] 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“, Karlsruhe, Beitrag Nr. 4, 7.-9. Sept. 2004
- [2] 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
- [3] J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller, D. Dopheide, S. Becker, F. Durst, „Messung der Wandschubspannung mit einem ortsaufauflösenden Laser-Doppler-Profilsensor“, 10. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, S. 9.1-9.6, Rostock, 10.-12. Sept. 2002
- [4] 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
- [5] S.L. Kaufman, L.M. Fingerson, „Fiber Optics in LDV Applications“, Proc. Int. Conference on Laser Anemometry – Advances and Applications, S. 53-65, Manchester/UK, 16-18. Sept. 1985
- [6] F. Durst, H. Krebs, H. Weber, „Faseroptische Laser-Doppler-Anemometer für die industrielle Strömungsmessung“, Technisches Messen, Heft 9, S. 351-354, 1986
- [7] M. Stieglmeier, C. Tropea, „Mobile fiber-optic laser Doppler anemometer“, Applied Optics, Vol 31, No. 21, S. 4096-4105, 1992
- [8] S. Sinzinger, J. Jahns, "Microoptics", Wiley-VCH, Weinheim, 2nd. edition, 2003
- [9] L. Büttner, "Untersuchung neuartiger Laser-Doppler-Verfahren zur hochauflösenden Geschwindigkeitsmessung", Dissertation Universität Hannover, ISBN 3-86537-074-8, Cuvillier Verlag Göttingen, 2004