

Richtungssinnerkennendes und ortsauflösendes Zweiwellenlängen-Laser-Doppler-Anemometer mittels Phasenauswertung

L. Büttner, T. Razik, J. Czarske

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

Kurzfassung

In der Strömungsmesstechnik kommt der Messung von Geschwindigkeitsgradienten und insbesondere der Wandschubspannung eine besondere Bedeutung zu. Kommerzielle Laser-Doppler-Anemometer sind aufgrund ihrer mäßigen Ortsauflösung für diese Aufgabe nur bedingt geeignet. In diesem Beitrag wird eine neue Methode vorgestellt, die sowohl örtlich hochauflösende als auch richtungssinnerkennende Geschwindigkeitsmessungen ermöglicht. Voraussetzung dabei ist die Erzeugung zweier Interferenzstreifensysteme mit identischem Streifenabstand mittels zweier Wellenlängen. Werden die Streifensysteme parallel ausgerichtet, so lässt sich eine Richtungssinnerkennung nach dem Quadratur-Homodyn-Prinzip erreichen. Bei leicht gekippter Justage kann durch die relative Phasenlage des Burstsinalpaares eine Ortsauflösung innerhalb des Messvolumens erreicht werden, wobei bereits eine Ortsauflösung von unter $1\ \mu\text{m}$ nachgewiesen werden konnte. Der Sensor wurde in einem Windkanal zur Bestimmung der Wandschubspannung einer laminaren Plattengrenzschicht eingesetzt. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den theoretischen Werten. Die beiden Möglichkeiten der örtlich hochauflösenden wie auch der richtungssinnerkennenden Geschwindigkeitsmessung lassen sich in einem kompakten Sensor kombinieren.

1.) Einleitung

Auf dem Gebiet der optischen Strömungsmesstechnik ist es von besonderem Interesse, Geschwindigkeitsgradienten, wie sie an Oberflächen auftreten, zu vermessen. Eine besondere Rolle kommt dabei der Wandschubspannung zu, die aufintegriert über die Oberfläche deren Reibungswiderstand ergibt. Experimentell lässt sich die Wandschubspannung aus dem Geschwindigkeitsgradienten nahe der Bauteiloberfläche bestimmen [1]. Kommerzielle Laser-Doppler-Anemometer sind durch die Abmessungen ihres Messvolumens von typischerweise $50\cdot 50\cdot 1000\ \mu\text{m}^3$ für diese Aufgabe nur bedingt geeignet, zudem ist eine zeitaufwendige mechanische Traversierung des Sensorkopfes notwendig. Um die Ortsauflösung zu erhöhen, können einerseits Blenden in der Empfangsoptik eingesetzt werden, die aber einen Teil des Streulichts blocken und so die Signalqualität mindern. Weiterhin können die LDA-Partialstrahlen stärker fokussiert werden, so dass ein kleineres Messvolumen resultiert. Es kann aber gezeigt werden, dass dadurch die Variation des Interferenzstreifenabstandes im Messvolumen vergrößert wird [2]. Dieser Effekt bestimmt wesentlich die sog. „virtuelle Turbulenz“, d.h. Schwankungen der gemessenen Geschwindigkeit, die einen statistischen Messfehler darstellen. Folglich ist immer ein Kompromiss zwischen hoher Ortsauflösung, wie sie für die Bestimmung der Wandschubspannung zwingend ist, und geringen Messfehlern der Geschwindigkeit zu finden.

Wünschenswert ist ein Sensor, der die Wandschubspannung präzise, instantan und ohne mechanische Traversierung erfasst sowie eine geringe Baugröße aufweist, so dass er sich einfach an dem Testobjekt positionieren lässt. Ein neuartiges Prinzip für einen solchen Sensor wird in diesem Beitrag vorgestellt.

2.) Der Sensor

Abb. (1) zeigt den Aufbau des Sensors. Als Strahlquellen dienen zwei Laserdioden mit 685 nm und 785 nm Wellenlänge, deren Strahlen über einen dichroitischen Spiegel überlagert und auf ein Beugungsgitter fokussiert werden. Dieses fungiert als Strahlteiler, von dem die +1. und -1. Beugungsordnung die beiden LDA-Teilstrahlen bilden, übrige Beugungsordnungen werden ausgeblendet. Die Teilstrahlen werden über ein Kepler-Teleskop zur Überschneidung gebracht und formen ein Messvolumen von ca. $600 \mu\text{m}$ $1/e^2$ -Länge. Dieses System ist in erster Näherung achromatisch [3, 4], d.h. in der zentralen Schnittebene der Laserstrahlen sind die Streifenabstände für beide Wellenlängen gleich. Außerhalb dieser Ebene verursacht die Wellenfrontkrümmung einen parabolischen Verlauf der Streifenabstände entlang der optischen Achse. Da die Wellenfrontkrümmung für die beiden Wellenlängen unterschiedlich ist, haben die Parabeln unterschiedliche Krümmungen. Streuteilchen würden daher zwei Signale mit leicht unterschiedlichen Dopplerfrequenzen erzeugen. Da eine Phase, auf deren Messung die vorgestellten Prinzipien basieren, nur zwischen zwei exakten Frequenzen definiert ist, ist dieser Fall daher ungünstig. Es ist folglich notwendig, die Streifenabstandskurven im gesamten Messvolumen anzugleichen, was durch eine Anpassung der Strahltaillenradien erreicht werden kann. Es kann gezeigt werden [5, 6], dass diese der Verhältnisgleichung $w_{02}=w_{01}\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$ gehorchen müssen, wobei w_{02} und w_{01} die Strahltaillenradien der verwendeten Laserwellenlängen λ_2 und λ_1 sind. Ist diese Bedingung erfüllt, so sind die Wellenfrontkrümmungen aufeinander angepasst und es ergeben sich im gesamten Messvolumen identische Streifenabstände. Im Experiment wurde dieses durch eine entsprechende Wahl der Kollimationslinsen der einzelnen Laserdioden erreicht.

Der dichroitische Spiegel zur Strahlüberlagerung ist mit einer Winkelfeinstellung ausgestattet, wodurch sich der Winkel zwischen den beiden Interferenzstreifensystemen gezielt einstellen lässt und sich so unterschiedliche Aufgabenstellungen verfolgen lassen.

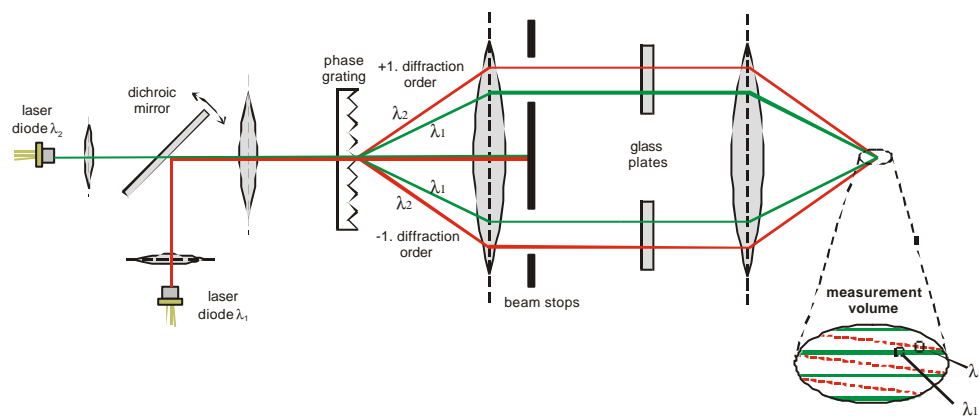


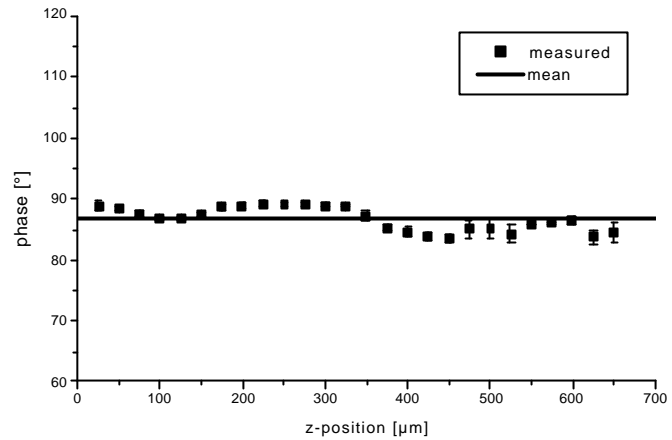
Abb. (1): Aufbau des Zweiwellenlängen-Laser-Doppler-Sensors

3.) Richtungssinnerkennender Betrieb (Quadratur-Homodyn-LDA)

Für einen richtungssinnerkennenden Betrieb wird der Winkel zwischen den Interferenzstreifensystemen zu Null eingestellt. Damit ergeben sich im gesamten Messvolumen parallele Streifen und folglich eine konstante Phasenverschiebung zwischen Burstsignalen. Durch Einfügen von Glasplatten in die einzelnen LDA-Teilstrahlen im Kepler-Teleskop erfahren aufgrund der Materialdispersion beide Wellenlängen unterschiedliche Phasenverzögerungen [5], so dass sich die relative Phasenlage zwischen den Streifensystemen gezielt einstellen lässt. Das Prinzip der Quadratur-Homodyn-Richtungserkennung, über das auf früheren GALA-Fachtagungen schon berichtet wurde [7, 8], beruht auf einer 90° -Phasenverschiebung, die \sin/\cos -Burstsignalpaare hervorrufen. Da die Streuteilchen das Messvolumen an statistisch verteilten Positionen das Messvolumen durchqueren, muss die Phasenverschiebung im gesamten Messvolumen konstant sein. Abb. (2) zeigt den Verlauf der Phase zwischen

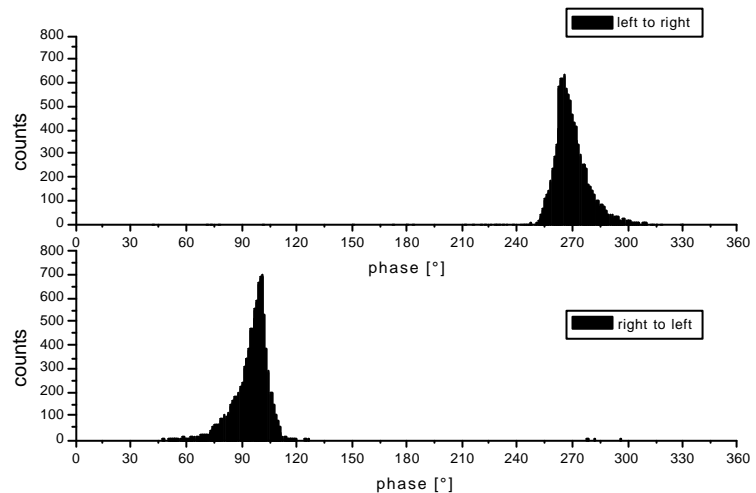
zwei Burstsinalen entlang der optischen Achse, gemessen mit einem $4\ \mu\text{m}$ -Streudraht als Geschwindigkeitsnormal. Die Phase liegt konstant bei $87^\circ \pm 2^\circ$, so dass ein richtungssinnerkennender Betrieb möglich ist.

Abb. (2): Phasenverlauf bei parallel justierten Interferenzstreifensystemen. Die Phase liegt konstant bei $87^\circ \pm 2^\circ$. Streuteilchen erzeugen damit Sinus/Kosinus-Signalpaare, von denen auf den Richtungssinn geschlossen werden kann.



Zur Verifizierung des Prinzips wurde der Sensor in einem Windkanal in zwei Orientierungen relativ zur Strömung justiert und von jeweils ca. 10^4 Burstsinalpaaren die relative Phasenverschiebung ausgewertet. Abb. (3) zeigt die Histogramme für beide Orientierungen. Es ergeben sich wie erwartet Verteilungen um 90° bzw. 270° , die deutlich voneinander separierbar sind. Die Richtungssinnerkennung nach dem Quadratur-Homodyn-Prinzip ist damit verifiziert.

Abb. (3): Test der Richtungssinnerkennung in einer Windkanalströmung. Die Phasenverteilungen von ca. 10^4 aufgenommen Burstsinalpaaren sind deutlich getrennt, womit die Richtungssinnerkennung verifiziert ist.



4.) Ortsauflösender Betrieb

Durch Verkippung des dichroitischen Spiegels kann nun ein definierter Winkel zwischen den beiden Messvolumina eingestellt werden, woraus sich eine linear mit dem Ort ändernde Phaseverschiebung des Burstsinalpaars ergibt [MST-Phasen-Profilsensor]: $\varphi(z) = s \cdot z + \varphi_0$ mit s : „Phasenkoeffizient“ und φ_0 : Phasenverschiebung bei $z = 0$. Der Phasenkoeffizient hängt dabei mit dem Kippwinkel ψ der Interferenzstreifensysteme und dem gemeinsamen Streifenabstand d zusammen über: $\tan\psi = s \cdot d / (2\pi)$. Abb. (4) zeigt die experimentell ermittelten Werte für einen Interferenzstreifenabstand von $4,55\ \mu\text{m}$ im Vergleich zur Theorie. Die Variation der Phasenverschiebung entlang der optischen Achse ist unabhängig von der Geschwindigkeit und kann daher zur Positionsbestimmung innerhalb des Messvolumens genutzt werden.

3.4

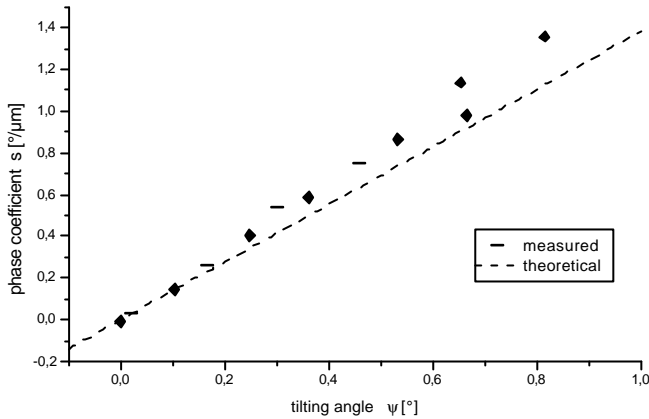


Abb. (4): Abhängigkeit des Phasenkoeffizienten $s = \frac{Dj}{Dz}$ vom Kippwinkel ψ zwischen den beiden Interferenzstreifensystemem.

Für eine präzise Ortsbestimmung ist daher einerseits ein großer Phasenkoeffizient s notwendig, andererseits ist aufgrund der Mehrdeutigkeit der Phase der Phasenbereich von 0 bis 2π beschränkt, woraus sich ein optimaler Phasenkoeffizient s ergibt. Abb. (5) zeigt die optimale Phasenkurve bei einem Verkippungswinkel von ca. $0,46^\circ$. Der Phasenbereich von 0° bis 360° deckt dabei die gesamte Länge des Messvolumens von ca. $600 \mu\text{m}$ innerhalb der $1/e^2$ -Grenzen ab.

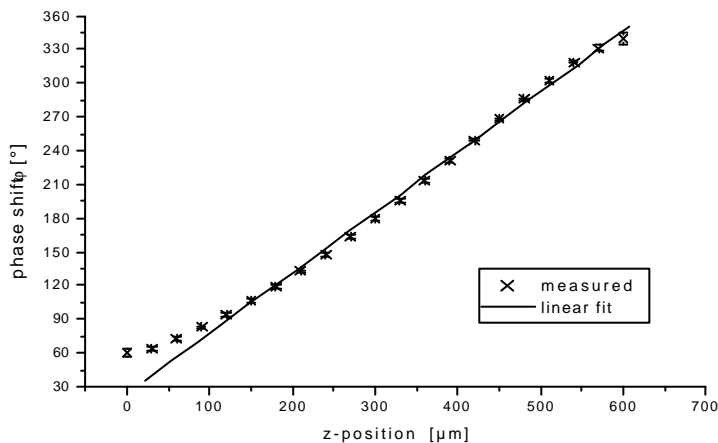


Abb. (5): Relative Phasenverschiebung zwischen den beiden Burstsignalen entlang der optischen Achse. Diese Funktion dient als Kalibrationskurve für die Zuordnung der Position.

Die Ortsauflösung wurde mit $4 \mu\text{m}$ Draht als Streuobjekt, der von einem optischen Chopper mit definierter Geschwindigkeit und Position durch das Messvolumen bewegt wurde, getestet. Im Zentrum des Messvolumens wurde eine Ortsauflösung von unter einem Mikrometer festgestellt, an den Rändern stieg die Unsicherheit der Ortsauflösung aufgrund des schlechter werdenden Signal-zu-Rausch-Verhältnisses (SNR) bis auf ca. $5 \mu\text{m}$ an. Insgesamt ließen sich im Messvolumen ca. 400 verschiedene Positionen auflösen. Diese relative Auflösung wird dabei im wesentlichen durch das vorliegende SNR bestimmt. Die absolute Ortsauflösung sollte sich durch ein kürzeres Messvolumen weiter bis in den sub- μm Bereich steigern lassen, indem das Messvolumen verkürzt und eine entsprechend steilere Phasenkurve gewählt werden kann.

Mit der Kenntnis der Position, an der das Streuteilchen durch das Messvolumen fliegt, kann die „virtuelle Turbulenz“, d.h. der Messfehler der Geschwindigkeit, der im wesentlichen durch die Änderung des Interferenzstreifenabstandes entlang der optischen Achse hervorgerufen wird, deutlich reduziert werden. Dazu muss für die Berechnung der Geschwindigkeit nur der lokale Streifenabstand $d(z)$, der vorher durch eine Kalibrationsmessung bestimmt wurde, anstelle eines konstanten Wertes d herangezogen werden. In Abb. (6) ist die Verbesserung der Messgenauigkeit dargestellt. Ohne Korrektur weist die gemessene Geschwindigkeit einen systematischen Fehler von 6% auf, der durch Verwendung des

lokalen Streifenabstandes, d.h. mit Korrektur, auf ca. 0,2% reduziert wird. Eine weitere Verbesserung sollte sich durch eine genauere Kalibrierung des Sensors erreichen lassen.

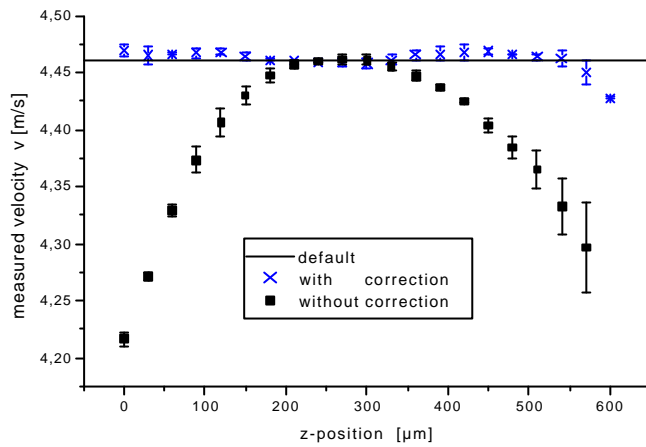


Abb. (6): Reduzierung des Messfehlers, der durch einen variierenden Streifenabstand hervorgerufen wird. Es wurde eine Verbesserung von 6% auf 0,2% erreicht.

Der Sensor wurde in einem Windkanal eingesetzt, um die Wandschubspannung einer laminaren Plattengrenzschicht zu vermessen. Experimentell kann die Wandschubspannung über den Gradienten der Geschwindigkeit in unmittelbarer Wandnähe ermittelt werden [1]. Das Messvolumen wurde an konstanter Position 500 μm von der Plattenoberfläche und 34,5 mm hinter der angeströmten Kante justiert. Da die Grenzschichtdicken in diesem Fall deutlich größer als die Länge des Meßvolumens waren, kann die Wandschubspannung direkt aus der Steigung des Geschwindigkeitsprofils bestimmt werden. Das Ergebnis für sechs verschiedene Anströmgeschwindigkeiten ist in Abb. (7) dargestellt. Abb. (7a) zeigt die gemessenen Geschwindigkeitsprofile, Abb. (7b) die durch lineare Regressionen ermittelten Wandschubspannungen im Vergleich zu den theoretisch zu erwartenden Werten. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung.

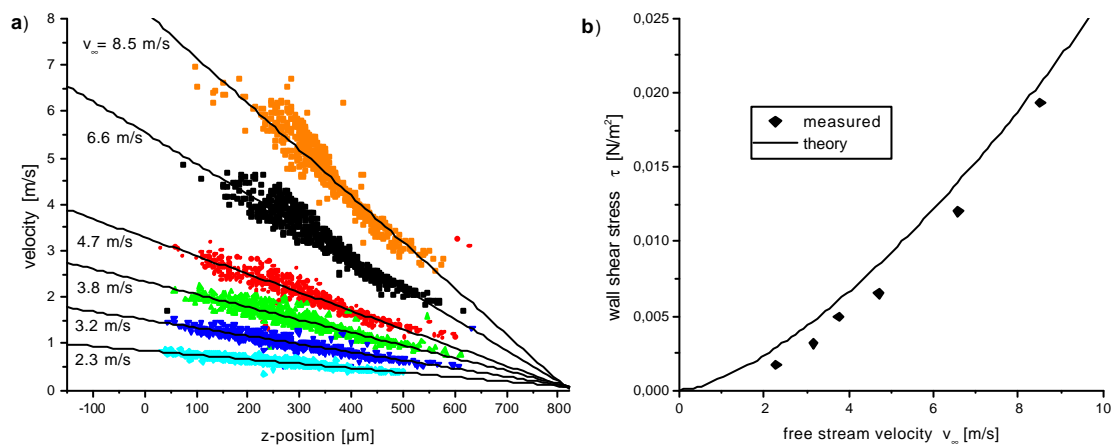


Abb. (7): Bestimmung der Wandschubspannung für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten. a) Gemessene Geschwindigkeitsprofile im wandnahen Bereich sowie die linearen Fitkurven. b) Aus den Steigungen berechnete Wandschubspannungen im Vergleich zur Theorie.

5.) Zusammenfassung

Es wurde über einen neuartigen Laser-Doppler-Sensor berichtet, der die relative Phasenlage zwischen zwei Burstsignalen, die von zwei Interferenzstreifensystemen verschiedener Wellenlänge aber mit gleichem Streifenabstand erzeugt werden, als zusätzliche Information nutzt. Sind die Interferenzstreifensysteme parallel ausgerichtet und um ein Viertel des gemeinsamen Streifenabstandes gegeneinander verschoben, so lässt sich der Richtungssinn der Streuteilchenbewegung auswerten. Die Richtungssinnerkennung wurde erfolgreich im Windkanal getestet.

Bei leichter Verkippung der Interferenzstreifensysteme um ca. $0,55^\circ$ kann eine Positionsbestimmung innerhalb des Messvolumens erreicht werden, da sich in diesem Fall die Phasenverschiebung des Burstsignals linear mit dem Ort ändert. Mit einem Streudraht als Geschwindigkeitsnormal konnte eine Ortsauflösung von weniger als einem Mikrometer festgestellt werden. Die von der Streifenabstandsvariation verursachte „virtuelle Turbulenz“ konnte von 6% auf 0,2% verbessert werden. Der Sensor wurde erfolgreich in einem Windkanalexperiment eingesetzt, um die Wandschubspannung einer laminaren Plattengrenzschicht zu bestimmen. Die Messergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit der Theorie.

Das vorgestellte Prinzip lässt auch eine ortsauflösende und eine richtungserkennende Messung gleichzeitig zu. Dazu ist ein Phasenverlauf notwendig, der sich entlang des Messvolumens nur um 180° anstatt bisher um 360° linear ändert. Über eine Bereichsauswertung kann dann auf den Richtungssinn geschlossen werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten (FKZ: Cz55/9-1). Herrn Dr. H. Müller von der PTB/Braunschweig, Fachlaboratorium 1.31 sowie den Herrn Prof. Dr. F. Durst und Dr. S. Becker vom LSTM/Erlangen wird für die Ermöglichung der Windkanalmessungen gedankt.

Literatur

- [1] J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller, D. Dopheide, S. Becker, F. Durst, „Messung der Wandschubspannung mit einem ortsauflösenden Laser-Doppler-Profilensensor“, 10. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik", Beitrag Nr. 9, Rostock 2002
- [2] H.-E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke, C. Tropea, „Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques“, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 2003
- [3] J. Czarske, F. Hock, H. Müller, „Applications of diffraction gratings in the laser Doppler velocimetry“, Proc. 16th congress of the International commission for Optics, Part two (Proc. SPIE 1983), pp. 654-5, 1993
- [4] H. Müller, D. Dopheide, „A new method for directional LDA-velocity measurement of lateral and axial components using diffraction gratings“, Proc. 6th Int. Symp. Laser Techn. and Appl. in Fluid Mech., paper 2.1, Lissabon/Portugal 1992
- [5] L. Büttner, J. Czarske, „Passive directional discrimination in laser Doppler anemometry (LDA) using the two-wavelength quadrature homodyne-technique“, zur Veröffentlichung akzeptiert bei Applied Optics
- [6] L. Büttner, J. Czarske, „Spatial resolving laser Doppler velocity profile sensor using slightly tilted fringe systems and phase evaluation“, zur Veröffentlichung eingereicht bei Measurement Science & Technology
- [7] J. Czarske, „Richtungserkennendes Homodyn-Laser-Doppler-Anemometer mit Zweiwellenlängen-Faserlaser“, 7. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik", Beitrag Nr. 2, Saint-Louis/Frankreich 1999
- [8] L. Büttner, M. Hinrichs, T. Razik, J. Czarske, H. Müller, „Mehrwellenlängen-Laser-Doppler-Velocimetrie zur richtungsempfindlichen und orts aufgelösten Geschwindigkeitsmessung“, 10. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik", Beitrag Nr. 7, Rostock 2002