

Faseroptischer LDA-Liniensensor mit hoher Ortsauflösung

T. Buschmann, V. Strunck, H. Müller, D. Dopheide

Fachbereich 1.41, Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100, D-38116 Braunschweig
Tel: +49 (0)531 592 1319, Fax: +49 (0)531 592 69 1319
Email: thorsten.buschmann@ptb.de

Kurzfassung

Es wird eine Referenzstrahl-LDA-Messanordnung vorgestellt, die speziell für die Durchflussmessung in Rohrleitungen mit einem Durchmesser bis 200 mm entwickelt wird. Zur Überlagerung des Streulichtes mit dem Referenzlicht werden Faserschmelzkoppler verwendet, sodass nur ein einzelner Beleuchtungsstrahl in die Rohrleitung fokussiert werden muss. Das Streulicht aus dem Beleuchtungsstrahl wird ohne Empfangsoptiken mit zwei Einmodenfasern aufgefangen. Die Empfangskegel der Fasern und der Beleuchtungsstrahl formen zwei linienförmige Messvolumen, deren Ausdehnungen von der Rohrmitte bis zur Rohrwand reichen. Mit einem großen Messvolumen kann bei Nutzung von nur einer Empfangsfaser bei bekanntem Rohrströmungsprofil eine Durchflussmessung durchgeführt werden. Mit zwei Empfangsfasern lässt sich außer der Geschwindigkeit mit Hilfe von Phasendifferenzmessungen auch der Ort innerhalb des Messvolumens bestimmen. Beide Verfahren ermöglichen Geschwindigkeitsprofilmessung ohne Traversierung. Der gesamte Aufbau ist mit faseroptischen Bauteilen aus der Nachrichtentechnik realisiert worden.

Das Sensorprinzip

Das hier vorgestellte LDA Messverfahren zur Bestimmung sowohl von Strömungs- als auch von Geschwindigkeitsprofilen in Rohrleitungen ist bereits in [1] und [2] vorgestellt worden. Es werden die neuesten Messergebnisse präsentiert und ein Einblick zum letzten Entwicklungsstand des Sensors gegeben.

Das Sensorprinzip basiert auf das Referenzstrahlverfahren. Zur Generierung eines im Vergleich zu konventionellen LDAs extrem verlängerten Messvolumens - für die geforderte Messanordnung in einem Rohr von $\varnothing = 200$ mm wird eine Messvolumenlänge von 100 mm benötigt - müssen mit der sensitiven Fläche Streulichtsignale aus einem sehr großen Raumwinkel wahrgenommen werden. Für den Durchmesser D und die Betriebswellenlänge λ ergibt sich aufgrund der Bedingung der räumlichen Kohärenz für den maximalen Öffnungswinkel

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\lambda}{2D}.$$

Für den in Abb.1 dargestellten Anwendungsfall wird ein Öffnungswinkel $\varepsilon_{\max} \sim 16^\circ$ benötigt. Bei einer Betriebswellenlänge $\lambda = 1064$ nm (Nd-YAG-Ringlaser) muss der Durchmesser des an der Rohrwand installierten LDA-Streulichtempfängers nur wenigen Mikrometern groß sein

mit der Folge, dass nur noch extrem wenig Streulicht für die Signalauswertung zur Verfügung steht.

Da die geforderte kleine Empfangsapertur die Größenordnung des Modenfelddurchmessers von Einmodenfasern erreicht, ist es zweckmäßig eine solche als Streulichtempfänger einzusetzen. Die Verwendung von Einmodenfasern ermöglicht die Nutzung die in der Nachrichtentechnik entwickelte Faserverstärkertechnik. Das von der Faser geführte Streulicht wird im Faserverstärker mit hohen Kleinsignalverstärkungen von bis zu 40 dB verstärkt. In [3] und [4] ist gezeigt worden, dass sich durch das Nachschalten von Faserverstärkern das SNR von LDA-Streulichtsignalen deutlich verbessern lässt. Das mit dem Faserverstärker aufbereitete Streulicht wird anschließend durch Faserschmelzkoppler mit einem Teil des ursprünglichen Lichts des Lasers überlagert (Referenzstrahltechnik) und einer fasergekoppelte Photodiode zugeführt. An der Photodiode entsteht ein intensitätsmoduliertes Signal, wie es aus der Laser-Doppler-Anemometrie bei einer Referenzstrahlanordnung bekannt ist.

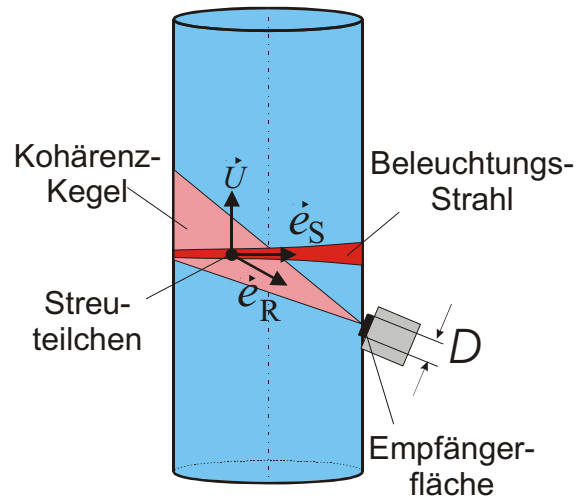


Abb.1: Anordnung des Messvolumens in der Rohrleitung

Der Kohärenzwinkel des realisierten Liniensensors mit Empfangsfasern entspricht nun dem Öffnungswinkel der Faser, so dass das Messvolumen durch den Faseröffnungswinkel und den Gaußförmigen Beleuchtungsstrahl gebildet wird. Der Beleuchtungsstrahl wird mit geeigneten Optiken derart geformt, dass der Strahldurchmesser in der Rohrmitte doppelt so groß ist wie die Strahltaile an der Rohrwand (Abb.1). Dies kompensiert den Intensitätsverlust des sich zur Rohrmitte verbreiternden Beleuchtungsstrahls durch den sich verringernden Abstand in Richtung Empfangsfasern. So können aus allen Bereichen entlang des Beleuchtungsstrahls von der Rohrwand bis zur Rohrachse etwa gleiche Streulichtleistungen durch die Fasern eingefangen werden.

Die Ortsauflösung des Liniensensors

Bei einem Faserempfänger mit nur einer Empfangsfaser ist nur eine Mittelung der Strömungsgeschwindigkeit möglich, ähnlich wie die der Ultraschallverfahren. Für eine Profilmessung ist es notwendig, die Position des Strahldurchtritts der Streuteilchen zu erhalten. Hierfür wird neben der Empfangsfaser F1 eine zusätzliche Empfangsfaser F2 verwendet (Abb.2). F2 wird nahe F1 angebracht, so dass beide Sensoren zwei virtuelle Streifensysteme „sehen“, die leicht zueinander geneigt sind. Soll die Messvolumenlänge in einem Rohr 100 mm sein und die Neigung gerade einen Streifenabstand betragen, so darf der zweite Faserempfänger gegenüber dem ersten um nur $\Delta = 10 \mu\text{m}$ versetzt sein. Das ist bei Fasern mit einem Manteldurchmesser von $125 \mu\text{m}$ durch eine Positionierung außerhalb der Strahl- und Empfängerebene (vertikaler Versatz) möglich. Dafür wird ein FC-Stecker mit zwei aneinander liegenden Einmodenfasern hergestellt (Abb.3). Durch das Verdrehen des Steckers um den Winkel $\alpha \approx 4,6^\circ$ kann ein vertikale Versatz von $\Delta = 10 \mu\text{m}$ eingestellt

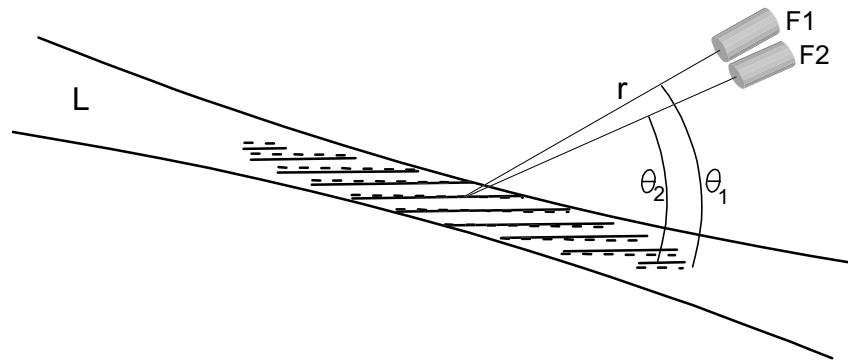


Abb.2: Zwei virtuelle Streifensysteme des Durchflusssensors mit zwei Empfängern

werden. Die von den beiden Faserkernen empfangenen LDA-Signale zeigen dann im betrachteten Messvolumen eine Phasendifferenz von etwa $\pm 180^\circ$ zueinander. Wie in Abb.2 gezeigt, liegen im Außenbereich der Messvolumen dann die gestrichelten virtuellen Streifen gerade zwischen den ungestrichelten. Je nach Signalqualität kann mit einer Phasenkorrelationsrechnung der Phasenversatz mit einer Auflösung bis zu 1° ausgewertet werden. Bei einer Messvolumenlänge von 100 mm erhält man damit etwa 300 Messstellen, d.h. eine Ortsauflösung von 0,3 mm. Die Auswertung des Messortes ist für die Messung von Profilen wichtig, da bei dem extrem langen Messvolumen der Streuwinkel und damit auch der virtuelle Streifenabstand bis zu einem Faktor von 2 variiert. Mit der Kenntnis des Ortes kann zugleich die virtuelle Streifenbreite an diesem Ort korrigiert werden.

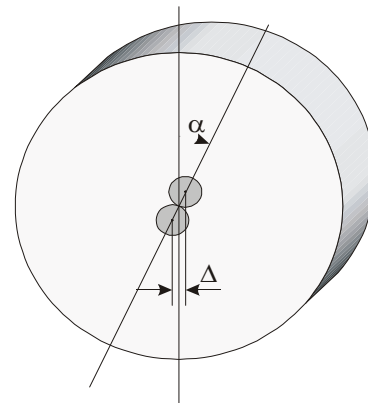


Abb.3: Stirnfläche des FC-Steckers mit zwei Einmodenfasern im Zentrum

Aufbau des Liniensensors mit zwei Empfangsfasern

In [1] und [2] ist bereits das Messprinzip und der Aufbau des Liniensensors und in [5] ist die Verstärkung von LDA-Signalen mit Faserverstärkern vorgestellt worden und soll im Folgenden nicht näher behandelt werden.

Die Einempfängeranordnung ist mit einem zweistufigen Neodym³⁺-dotierten Faserverstärker (NDFA: neodymium doped fibre amplifier) zur optischen Verstärkung des Streulichtes mit der Wellenlänge $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ausgestattet. Das Streulicht wird vor der Überlagerung mit dem Streulicht optisch verstärkt und anschließend auf eine PIN-Photodiode gegeben. Dadurch können das verstärkte Streulicht und das Referenzlicht die gleichen Größenordnungen erhalten und das SNR wird größer.

Wird für die Phasendifferenzmessung eine weitere Empfangsfaser verwendet, so hat sich, um eine genügend hohe Genauigkeit der Messergebnisse zu erlangen, die in Abb.4 skizzierte faseroptische Lösung zur Überlagerung beider Signale mit dem Referenzsignal bewährt.

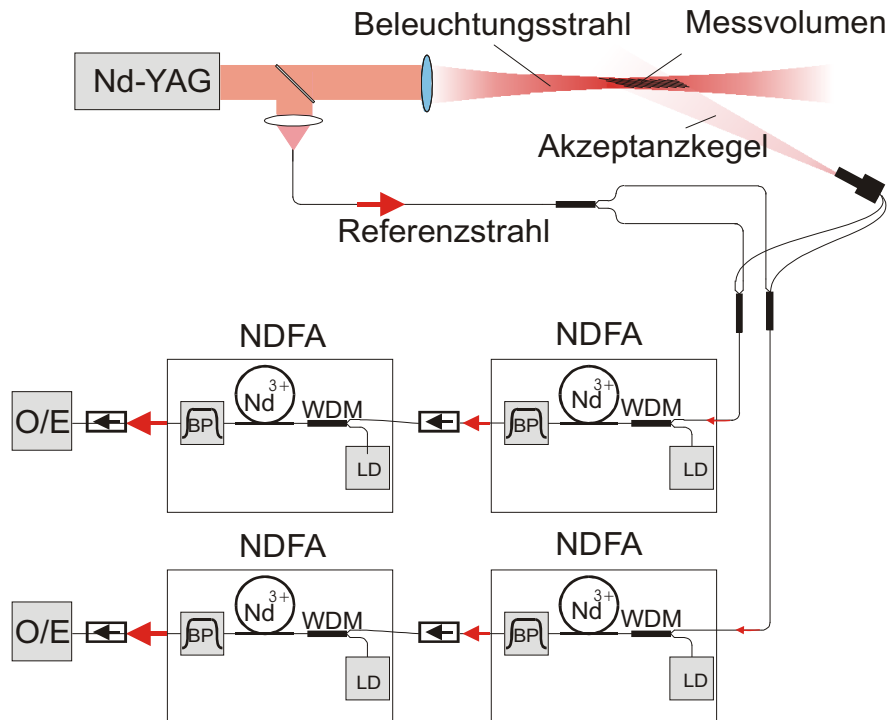


Abb.4: Liniensensor mit zwei Empfangsfasern und zwei nachgeschalteten Ndfa

Während der überwiegende Teil der von einem Nd-YAG-Ringlaser emittierten Strahlung als Beleuchtungsstrahl in das Fluid gerichtet wird, wird durch eine Glasplatte und mit einer Einkoppeloptik ein Bruchteil des Strahls in eine Einmodenfaser eingekoppelt. Sowohl die Intensität, als auch die Polarisationsrichtung sind manuell einstellbar. Das Streulicht gelangt über die in einem FC-Stecker eingebrachten Fasern nach der Überlagerung mit dem Referenzstrahl in einen zweistufig aufgebauten Faserverstärker. Nach der optischen Aufbereitung gelangen die Streulichtsignale in den O/E-Wandler (optisch-elektrischer-Wandler), der mit einem Faseranschluss versehen ist. Zur Unterdrückung von Oszillationen und um ein Übergreifen der ASE-Strahlung (ASE: amplified spontaneous emission,) der zweiten Verstärkerstufe auf die erste zu verhindern, sind faseroptische Isolatoren nach jeder Verstärkerstufe eingefügt worden.

Das zur Überlagerung benötigte Referenzsignal wird durch eine Einmodenfaser zum Sensorkopf geführt und durch einen 3 dB-Faserkoppler auf zwei Fasern aufgeteilt. Zwei Faserkoppler überlagern die Referenzsignale mit den beiden Streulichtsignalen der Empfangsfasern des FC-Steckes. Die Intensität des Referenzsignals wird aufgrund des Teilungsverhältnisses der Koppler ($1/99$) angepasst und kann zusätzlich variiert werden, um ein gutes Verhältnis beider Leistungsanteile zu erlangen.

Im Gegensatz zur Einempfängeranordnung wird jetzt das LDA-Streulicht *nach* der Überlagerung mit dem Referenzsignal zur optischen Verstärkung in beide zweistufig aufgebaute Ndfa eingekoppelt. Aufgrund der großen optischen Weglängen, die das Streulicht auf der Faserverstärkerstrecke zurücklegt, können thermisch bedingten Weglängendifferenzen (Temperaturkoeffizient der Glasfasern $\sim 5 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$) auftreten. Wird das Streulicht vor der Überlagerung mit dem Referenzsignal durch diese Veränderungen beeinflusst, können Phasendifferenzen nur mit einem erheblichen Aufwand, wie z. B. eine exakte Temperatur-

regelung des gesamten faseroptischen Aufbaus und Schutzmaßnahmen zur Verhinderung von mechanischen Schwingungen, durchgeführt werden. Aus diesem Grund ist die Referenzstrahlüberlagerung des Streulichtes kurz (15 cm) nach der Einkopplung in die Faser vorgenommen worden. Die temperatursensiblen Komponenten sind in einem Zylinder geschützt untergebracht, so dass die thermisch bedingten optischen Weglängendifferenzen klein gehalten werden.

Phasendifferenzmessungen zur Ortsbestimmung

Mit dem in Abb. 5 skizzierten Versuchsaufbau sind Phasendifferenzmessungen zur Ortserkennung durchgeführt worden. Zur Generierung der LDA-Streulichtsignale wird durch das oben beschriebene Messvolumen eine Polystyrolkugel (Durchmesser $D \sim 100 \mu\text{m}$) bewegt, die mit einem etwa $5 \mu\text{m}$ dünnen Platindraht an einer Drehscheibe befestigt ist. Die Drehscheibe ist in x-Richtung entlang des Beleuchtungsstrahls verschiebbar, so dass an verschiedenen Stellen Streulichtsignale erzeugt werden können. Im Abstand von 20 mm zur Achse des Beleuchtungsstrahls und in etwa 200 mm Entfernung zur Strahltaille befindet sich der Stecker mit den beiden Empfangsfasern ($\varepsilon/2 \sim 3^\circ$). Um zu verdeutlichen, wie der Sensor im Rohr integriert werden soll, sind die Rohrwände in grauer Farbe hinzugezeichnet worden.

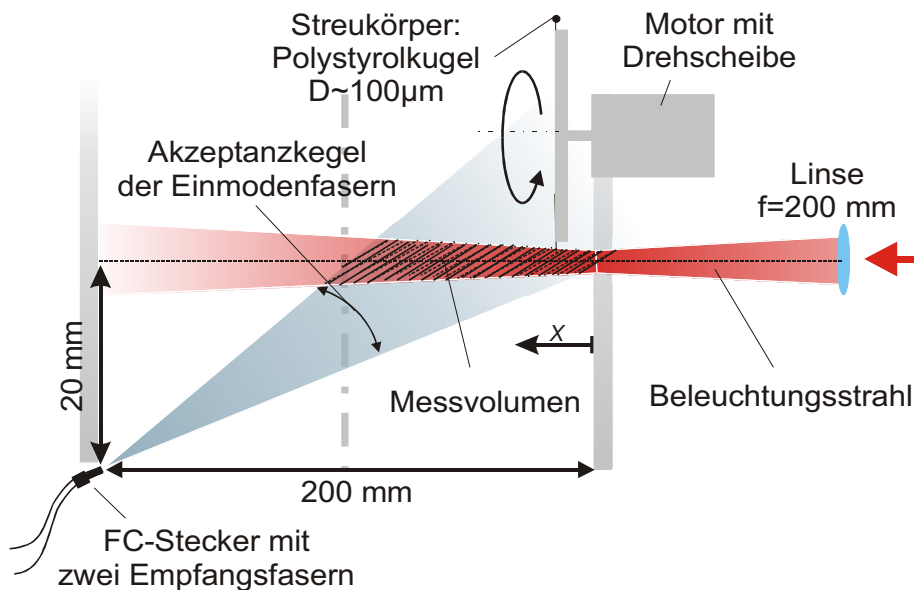


Abb.5: Messaufbau zur Phasendifferenzmessung

Ergebnisse und Ausblick

Es werden mit dem oben beschriebenen Versuchsaufbau aus allen Bereichen des Messvolumens Burstsignale mit den beiden Empfangsfasern aufgezeichnet werden, und sind für eine Geschwindigkeitsmessung auswertbar. Die Signalqualität der Burstsignale nimmt für den vorhandenen Aufbau ab, je weiter der Streukörper sich von der Strahltaille an der Rohrwand bei $x = 0 \text{ mm}$ entfernt. In einem Bereich von $x = -10 \text{ mm}$ bis $x = 65 \text{ mm}$ können die Streulichtsignale aufgrund der guten Signalqualität für eine Phasendifferenzmessung herangezogen werden. Näher am Detektor ($x > 70 \text{ mm}$) wird die Signalqualität schlechter und eine Phasendifferenzmessung wird ungenau. Bei diesen Messungen war ist der Strahldurchmesser des Beleuchtungsstrahls in der Rohrmitte größer als der doppelte Strahltaillendurchmesser, so dass die Streulichtleistung zur Rohrmitte stärker abnahm als

vorgesehen. Die Phasendifferenzwerte in Abhängigkeit von dem Ort x im Messvolumen sind in Abb.6 aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem hier vorgestellten Verfahren orts aufgelöste Geschwindigkeitsprofilmessungen möglich sind. Die für die Anwendung in einem Rohr geforderte Messvolumentiefe von 100 mm ist aufgrund des noch nicht exakt geformten Beleuchtungsstrahls nicht ganz erreicht worden. Mit einer entsprechenden Strahlaufweitung vor der fokussierenden Linse ($f=200$ mm in Abb.5) sollte dies aber möglich sein. Der Phasensprung von 2π bei $x = 60$ mm entstand durch den bei der hier vorgestellten Messung eingestellten Versatz der Detektoren von $\Delta \sim 12 \mu\text{m}$ anstelle von $10 \mu\text{m}$ (siehe Abb.3).

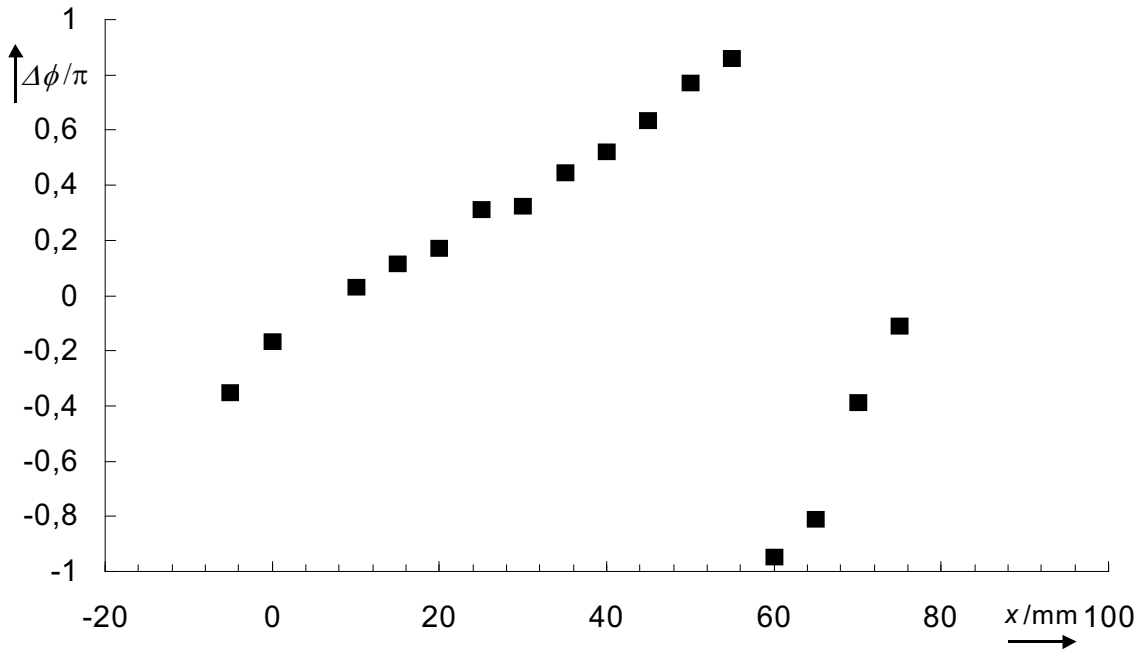


Abb.6: Phasendifferenzmessung für LDA-Streulichtsignale aus unterschiedlichen Bereichen des Messvolumens

Literatur

- [1] V. Strunck, T. Buschmann, H. Müller, D. Dopheide: "Referenz-LDA mit Faserverstärker", 9. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Winterthur, Schweiz, 18.-20. September 2001, Shaker, ISBN 3-8265-9214-X, S.4.1–4.6
- [2] T. Buschmann, V. Strunck, H. Müller, D. Dopheide: "Fiber based high resolution Doppler line sensor", 10. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Rostock, 10.-12. September 2002, Universitätsdruckerei Rostock, ISBN 3-86009-233-2, S.6.1–6.5
- [3] T. Buschmann, H. Többen, H. Müller, D. Dopheide: Verbesserung der leistungsfähigkeit einer LDA-Empfangseinheit mit integriertem Neodym³⁺-dotiertem Faserverstärker, S. 5.1 bis 5.6, ", 8. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Freisingen/Weihenstephan, 12.-14. September 2000, Shaker Verlag, ISBN 3-8265-7809-0, S.5.1–5.6
- [4] H. Többen, D. Dopheide, H. Müller, T. Buschmann: SNR-Verbesserung von LDA-Signalen durch den Einsatz von Faserverstärkern, 7. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 27.-29. September 1999, ISL, Saint-Louis, Shaker Verlag, ISBN 3-8265-6447-2, S.1.1-1.8
- [5] H. Többen, H. Müller, D. Dopheide: Optische Vorverstärkung von 1064 nm-LDA-Signalen, 6. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 28.-30.9.1998, Uni GH Essen, Shaker Verlag ISBN 3-8265-4287, S. 15.1-15.6