

„LOW COST 2K-LDA“: NEUE MÖGLICHKEITEN DURCH NUTZUNG FASEROPTISCHER KOMPONENTEN AUS DEM TELEKOMMUNIKATIONSBEREICH

Harald Müller, Michael Eggert
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany

Zusammenfassung

Fasergekoppelte DFB-Lasermodule bieten interessante Möglichkeiten zur Realisierung kompakter LDA-Systeme für die mehrkomponentige Strömungsgeschwindigkeitsmessung, wenn man pro Geschwindigkeitskomponente jeweils zwei Laser für die Erzeugung eines LDA-Strahlenpaares nutzt. Dies ist möglich, wenn das trägerfrequente LDA-Messsignal mit dem Schwebungssignal des jeweiligen Laserpaares für die zu messende Geschwindigkeitskomponente korreliert wird. Die Verwendung kostengünstiger Komponenten in Industriequalität aus dem optischen Telekommunikationsbereich erlaubt die Realisierung von leistungsfähigen „low-cost-LDA-Systemen“ für unterschiedlichste Anwendungsbereiche.

Einleitung

Vor über 10 Jahren wurden erstmals LDA-Systeme vorgestellt, die sendeseitig jeweils einen Laser pro LDA-Sendestrahl nutzten. Neu war, dass die für konventionelle LDA-Systeme notwendige Voraussetzung zur Erzeugung kohärenter LDA-Teilstrahlen aus einer Laserquelle entfällt, wenn das detektierte LDA-Streulichtsignal mit dem Schwebungssignal der unterschiedlichen Laserquellen korreliert wird. Hierdurch konnte auf die sonst üblichen LDA-Strahlteiler verzichtet, die Laserleistung im Messvolumen erhöht und durch die optische Frequenzdifferenz der Laser das Vorzeichen der Geschwindigkeit bestimmt werden. Erste zweikomponentige Strömungsgeschwindigkeitsmessungen wurden mit drei frequenzstabilisierten fasergekoppelten Lasern realisiert, wobei die Signalkomponententrennung über die unterschiedlichen Frequenzdifferenzen der Laser erfolgte (s. Müller et al 1996). Neuere Arbeiten haben gezeigt, dass sich mit diesem Konzept präzise 2K-Geschwindigkeitsmessungen mit optimal genutzter Signalverarbeitungsbandbreite durchführen lassen (s. Eggert et al 2002). Dieses Konzept bietet entscheidende Vorteile für den modularen Aufbau vereinfachter LDA-Systeme zur mehrkomponentigen Geschwindigkeitsmessung mit glasfasergekoppelten LDA-Messköpfen. Problematisch war jedoch stets der relativ hohe Aufwand in Bezug auf die optische Entkopplung der Laser von Rückreflexen bei der Fasereinkopplung und die Verwendung von polarisationserhaltenden Singlemode-Fasern und Faserkopplern. Mit den neuerdings aus dem optischen Telekommunikationsbereich aufgrund hoher Stückzahlen zu moderaten Preisen zur Verfügung stehenden Komponenten (z.B.: konfektionierte über optische Isolatoren in polarisationserhaltende Singlemodedefasern gekoppelte DFB-Laserdioden, polarisationserhaltende Singlemodedefaserkoppler, pigtailed PIN-/APD-Photoempfänger) lassen sich fasergekoppelte low-cost 2K-LDA-Systeme zu Bauteilpreisen von unter 10 T€ realisieren, miniaturisieren und für unterschiedlichste Anwendungsbereiche adaptieren.

Grundprinzip zum 2K-LDA

Das dem low-cost-LDA-Konzept zugrunde liegende Messverfahren soll am Beispiel des auf der 10. GALA-Fachtagung bereits vorgestellten 2K-LDA Systems (siehe Eggert et al 2002) erläutert werden.

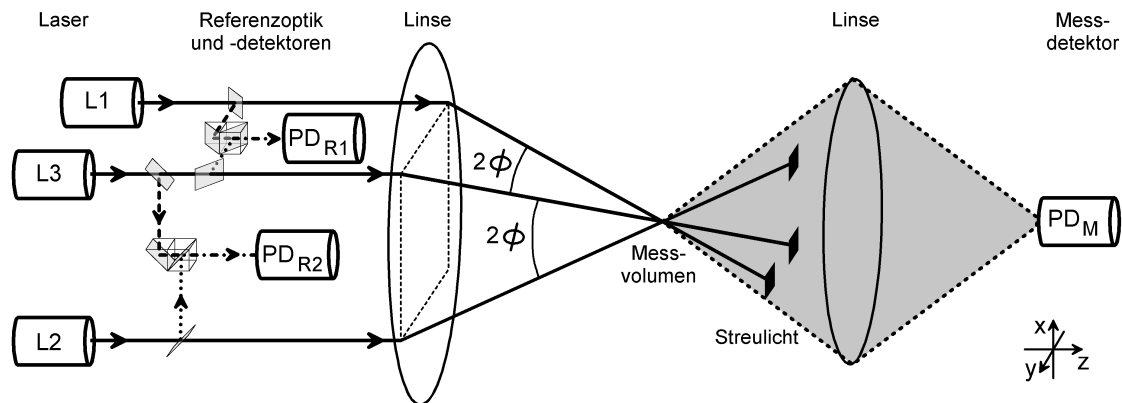


Abb. 1: Optische Anordnung des 2K-LDA mit frequenzstabilisierten Halbleiterlasern und kohärenter Signalverarbeitung

Drei abstimmbare Laserdioden (L1, L2, L3) mit einer spektralen Linienbreite von wenigen MHz erzeugen zwei orthogonale Strahlenpaare, deren Stahltaillen sich im LDA-Messvolumen überlagern (Abb. 1). Einer der drei Laser (L3) dient als Master-Laser für beide LDA-Strahlenpaare. Die Frequenzdifferenzen der beiden anderen Laser zum Master-Laser lassen sich auf wenige MHz genau einstellen. Die Referenzoptik liefert an den Photoempfängern PD_{R1} , PD_{R2} die Referenzsignale für die Stabilisierung der als Shiftfrequenzen genutzten optischen Differenzfrequenzen und die Signalverarbeitung des am Photoempfänger PD_M detektierten trägerfrequenten Messsignals. Die Shiftfrequenzregelungen (s. Abb. 2) übernehmen für die gewählten Shiftfrequenzen und vorgegebenen Laserdiodentemperaturen das Auffinden der Arbeitspunkte und die Stabilisierung der Laserdiodenströme mit Hilfe einer automatischen Mikrocontroller-Regelung.

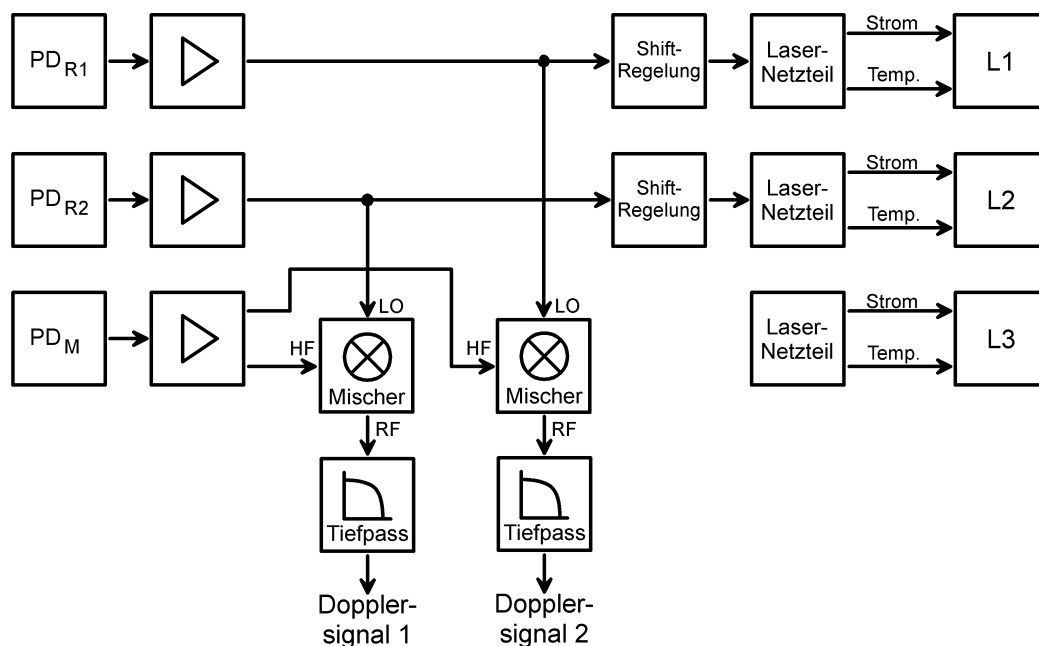


Abb. 2: Blockschaltbild der Signalverarbeitungselektronik des 2K-LDA mit frequenzstabilisierten Halbleiterlasern und kohärenter Signalverarbeitung

Die LDA-Signale (Dopplersignal 1 u. 2 in Abb. 2) erhält man durch Rückmischen des Messsignals (Photodetektor PD_M) mit den Referenzsignalen (Photodetektoren PD_{R1} , PD_{R2}) und anschließende Tiefpassfilterung. Dabei enthält das Messsignal die Schwebungssignale des aus dem Messvolumen gestreuten Doppler-verschobenen Lichts aller LDA-Strahlenpaare. Die Referenzphotodetektoren $PD_{R(i)}$ hingegen enthalten lediglich das Überlagerungssignal des jeweiligen LDA-Strahlenpaares. Während die Signale der Referenzphotodetektoren $PD_{R(i)}$ also jeweils nur eine Frequenz $f_{Ref(i)}$ enthalten, setzt sich das Signal des Messphotodetektors aus den Frequenzen $f_{Mes(i)} = f_{Ref(i)} + f_{Doppler(i)}$ zusammen. Durch die Rückmischung des Messsignals mit dem jeweiligen Referenzsignal kann für die zu messende Geschwindigkeitskomponente direkt die Dopplerfrequenz $f_{Doppler(i)}$ gewonnen werden. Das Grundprinzip der Rückmischtechnik wurde im Zusammenhang mit der Verwendung von jeweils einer Laserquelle pro LDA-Strahl bereits früher eingehend behandelt (siehe Müller et al, 1996).

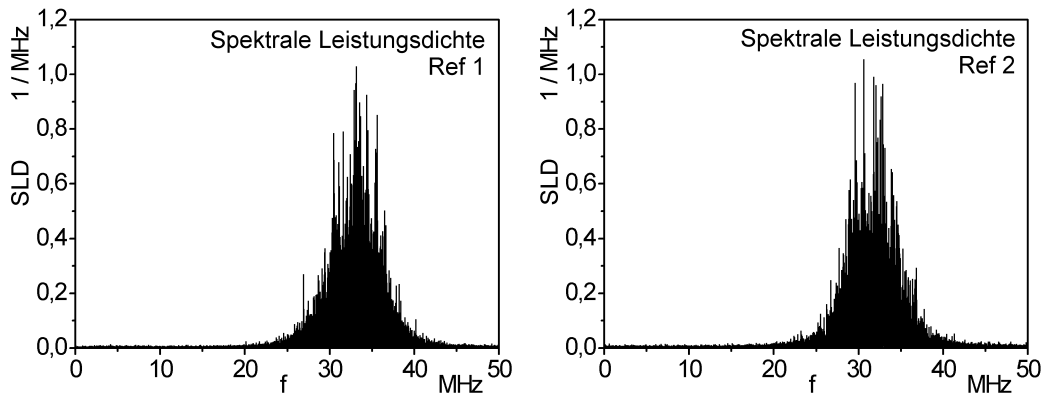


Abb. 3a: Spektrale Leistungsdichte beider Referenzsignale des 2K-LDA-Systems mit nominell gleichen Shiftfrequenzen bei 32 MHz

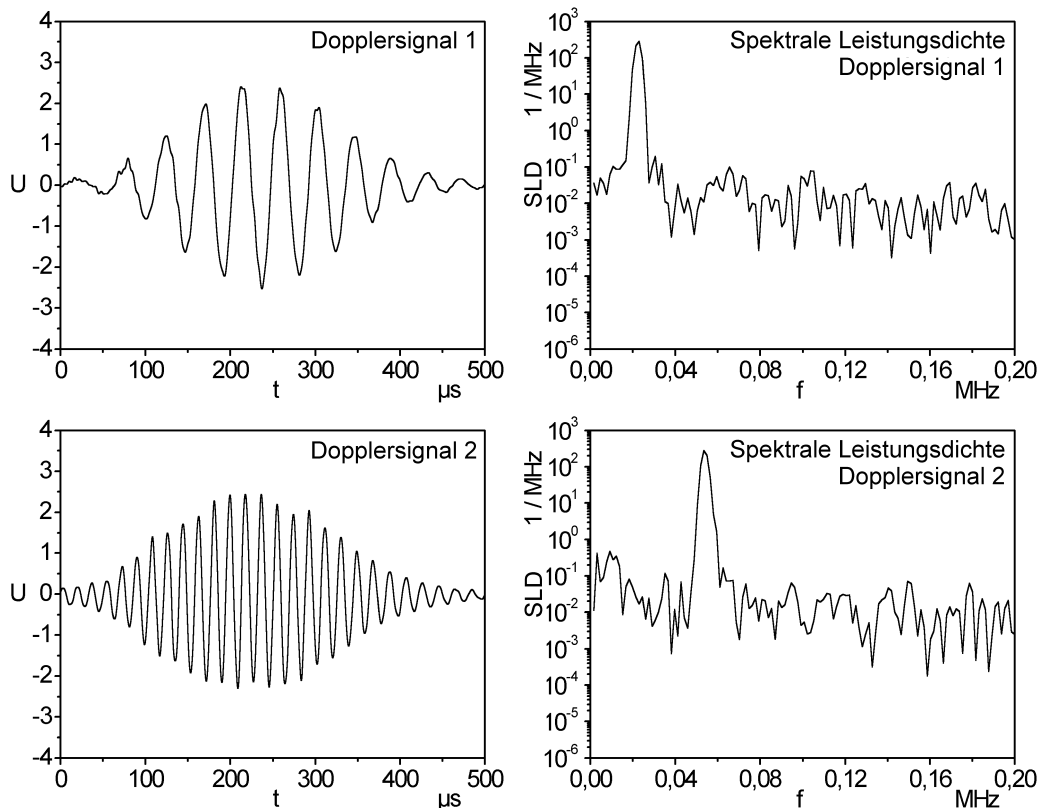


Abb. 3b: LDA-Signale im Zeit- und Frequenzbereich mit Signalkomponententrennung bei gleichen Shiftfrequenzen

Die Breite der spektralen Leistungsdichteverteilungen der Referenzsignale (vgl. Abb. 3a) ist bedingt durch schnelle Frequenzfluktuationen der Halbleiterlaser. Ist die Zeitskala dieser Frequenzfluktuationen klein gegenüber der Durchflugszeit eines Partikels durch das Messvolumen, so ist eine Signalkomponententrennung sogar bei nominell gleichen Shiftfrequenzen möglich (s. Abb.3b). In diesem Fall liefert die Mischung der fluktuierenden Referenzfrequenz $f_{\text{Ref}(i)}$ mit der in gleicher Weise fluktuierenden Signalkomponente $f_{\text{Mes}(i)}$ ein definiertes Dopplersignal während die unkorreliert fluktuierenden Frequenzen $f_{\text{Ref}(i)}$ und $f_{\text{Mes}(j)}$ für $(i \neq j)$ lediglich ein leicht angehobenes Rauschen verursachen. Hierzu zeigt Bild 3 eine 2K-Messung mit nominell gleichen Shiftfrequenzen von 32 MHz bei der kein Übersprechen der beiden Messkanäle beobachtet werden konnte.

Interessant ist, dass bei diesem Konzept mit jeweils einem Laser pro LDA-Sendestrahl durch die Emissionslinienbreiten der Laserquellen bedingte charakteristisch verrauschte Schwebungssignale entstehen, die als Trägerfrequenzen für die jeweiligen LDA Strahlenpaare bei der Messung mehrerer Strömungsgeschwindigkeitskomponenten eine Signalkomponententrennung ohne Übersprechen ermöglichen, selbst wenn die Trägerfrequenzen im gleichen Frequenzbereich liegen. Dabei kann die Wahl der Schwebungsfrequenzen an die messtechnischen Gegebenheiten bezüglich der Messsignalbandbreite und der zu messenden Geschwindigkeiten angepasst werden. (Eggert, 2002).

Das Konzept zur Realisierung eines kompakten 2K-LDA-Systems mit jeweils einem Laser pro LDA-Sendestrahl wurde in Verbindung mit einem glasfasergekoppelten LDA-Messkopf zwar bereits vor über 10 Jahren vorgestellt, doch waren die verwendeten leistungsstarken DBR-Laserdioden zunächst noch recht teuer und anschließend nicht mehr erhältlich; die Fasereinkopplungen in Monomodefaser über optische Isolatoren waren aufwendig und polarisationserhaltende Monomodefaserkoppler in den gewünschten Wellenlängenbereichen zum Teil nicht verfügbar.

Die Randbedingungen für die Realisierung eines komplett faseroptischen 2K-LDA-Systems haben sich seither mit der rasanten Entwicklung im faseroptischen Telekommunikationsbereich deutlich verbessert. So sind im Wellenlängenbereich von 1550 nm abstimmbare in polarisationserhaltende Monomodefasern gekoppelte DFB-Laserdioden mit bereits integriertem optischem Isolator mit Ausgangsleistungen von 20 mW verfügbar. Auch polarisationserhaltende Faserkoppler, Faserkollimatoren für die LDA-Sendeseite und fasergekoppelte Photoempfänger für die Mess- und Referenzsignalerzeugung sind in den low-cost-Bereich gerückt. Insgesamt sind somit alle bisher als kosten- und justageaufwändig eingeschätzten optischen und optoelektronischen Komponenten für die Realisierung eines kompakten und justageunempfindlichen 60 mW 3K-LDA-Systems als miniaturisierte faseroptische Bauteile verfügbar.

Faseroptisches 2K-LDA

Die faseroptische Anordnung in Abb.4 stellt das optische Basismodul für ein kompaktes 2K-LDA dar. Über die Faserkollimatoren werden die einzelnen LDA-Sendestrahlen entweder direkt in das LDA-Messvolumen fokussiert oder auch als kollimierte Strahlen in eine LDA-Sendeoptik eingekoppelt. Weitere Möglichkeiten bestehen in einer direkten Ankopplung an speziell entwickelte LDA-Messköpfe über PM-Singlemodestecker als optische Schnittstelle anstelle der eingezeichneten Faserkollimatoren.

Alle in der Abb. 1 zu erkennenden justagekritische Elemente für die optische Strahlführung (besonders in der Referenzoptik zur Erzeugung der Referenzsignale!) entfallen bei Verwendung der faseroptischen Bauteile nach Abb. 4. In Verbindung mit den fasergekoppelten DFB-Lasern und Photoempfängern resultiert ein kompaktes Modul ohne jeglichen Justieraufwand.

Die gesamte Ansteuer- und Signalverarbeitungselektronik lässt sich ebenfalls sehr kompakt realisieren und besteht im wesentlichen aus den bereits erprobten Modulen entsprechend des Blockschaltbilds in Abb. 2.

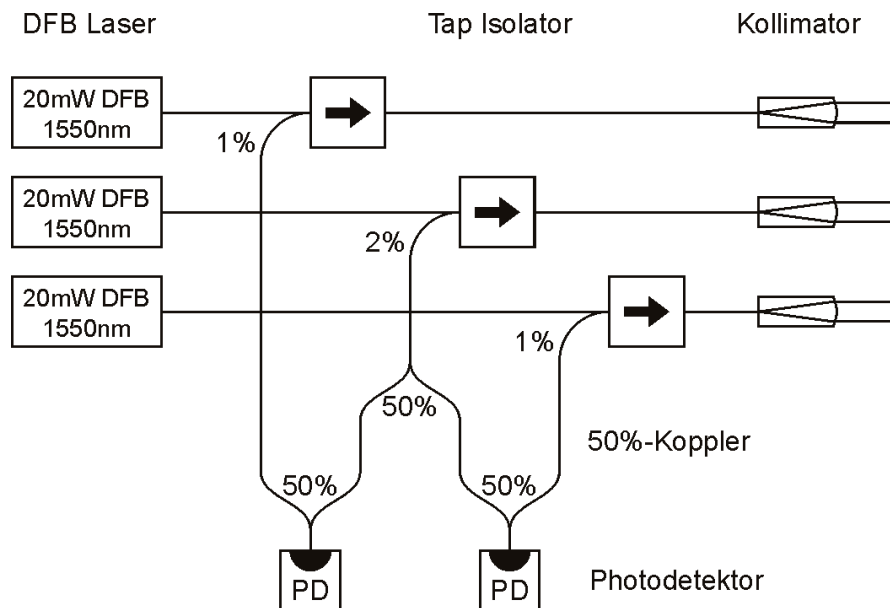


Abb. 4: Schematische Darstellung des faseroptischen 2K-LDA-Moduls

Die Tap Isolatoren in Abb. 4 dienen zum einen als polarisationserhaltende Faserkoppler zur Erzeugung der benötigten Referenzsignale durch die paarweise Überlagerung von DFB-Lasersignalen als auch zu einer verbesserten optischen Entkopplung der Laser von Reflexen und Streulicht aus dem LDA-Messkopf.

Insgesamt lässt sich z.B. mit dem in Abb. 5 dargestellten 2K-LDA-Messkopf mit integrierter Streulichtempfangsoptik für Messungen in Rückwärtsrichtung ein äußerst kompaktes und justageunempfindliches 2K-Frequenzshift-LDA realisieren.



Abb. 5: Fasergekoppelter 2K-LDA-Messkopf für einen Arbeitsabstand von 300 mm mit eingebauter Streulichtempfangsoptik

Ausblick

Das in Abb. 4 dargestellte 2K-LDA-Modul ist aufgrund seiner vollständig faseroptischen Ausführung mit kommerziell verfügbaren Bauteilen aus dem optischen Telekommunikationsbereich als ein zuverlässiges, äußerst kompaktes und leichtgewichtiges 2K-Frequenzshift-LDA-Modul einzuschätzen. Der Einsatz des Moduls ist daher künftig auch für 2K-LDA-Messungen im FSL (Fluid-Science Laboratory) der ISS (International Space Station) in Verbindung mit einem vom ZARM in Bremen in Entwicklung befindlichen Mini-LDA-Messkopf (siehe Abb. 6) vorgesehen.

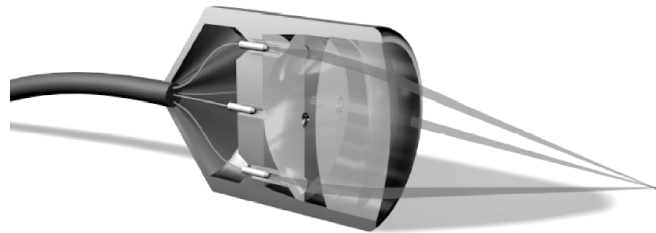


Abb. 6: Vorstufe eines vom ZARM in Bremen im Rahmen eines ESA-Projektes entwickelten Mini-LDA-Messkopfes für das FSL der ISS (siehe Fechtmann 2002)

Bedenkt man, dass sich die Bauteilkosten für das vorgestellte faseroptische 2K-Frequenzshift-LDA-Modul inklusive Ansteuerungselektronik künftig auf unter 10 T€ belaufen werden, sind mit dem vorgestellten Konzept künftig modular aufgebaute low-cost 2K-Frequenzshift-LDA-Systeme für einen breiten Anwenderkreis denkbar.

Zusammenfassung

Mit fasergekoppelten DFB-Lasermodulen lassen sich kompakte Frequenzshift-LDA-Systeme für die mehrkomponentige Strömungsgeschwindigkeitsmessung realisieren, wenn man jeweils ein DFB-Lasermodul für die Erzeugung der einzelnen LDA-Sendestrahlen nutzt. Dies ist möglich, wenn das LDA-Messsignal mit dem Schwebungssignal des jeweiligen Laserpaares der zu messenden Geschwindigkeitskomponente korreliert wird. Die Verwendung hochwertiger low-cost Komponenten aus dem optischen Telekommunikationsbereich erlaubt die Realisierung von leistungsfähigen „low-cost-LDA-Systemen“ für unterschiedlichste Anwendungsbereiche.

Literatur

Müller, H., Wang, H., Dopheide, D., 1996: Fibre Optical Multi-component LDA-System using the Optical Frequency Difference of Powerful DBR-Laser Diodes, Eighth International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 8-11 July 1996 Lisbon, Portugal, paper 34.3.1.-34.3.4.

Eggert, M., Grosche, G., Müller, H., Koch, M., 2002: Multi-component LDA using coherence properties of semiconductor lasers, 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid-Mechanics, 9-11 July 2002, Lissabon, Portugal, CD-ROM, Session 21, paper 2

Fechtmann, C., 2002: Entwicklung miniaturisierter Laser-Doppler-Anemometer Systeme, 10. Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - Neuere Entwicklungen und Anwendungen -, veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA' 2002), Universität Rostock, 10-12. September 2002, ISBN 3-86009-233-2, Beitrag 34.1-34.7

Eggert, M., Müller, H., Grosche, G., Pape, N., Siewert, C., Koch, M., 2002: Möglichkeiten trägerfrequenter Signalkomponententrennung am Beispiel eines 2D-LDA-Systems, 10. Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - Neuere Entwicklungen und Anwendungen -, veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA' 2002), Universität Rostock, 10-12. September 2002, ISBN 3-86009-233-2, Beitrag 38.1-38.8