

Konzept eines Mehrkomponenten-Referenzstrahl-Laser-Doppler-Anemometers zur rückgeführten Messung von Strömungsgeschwindigkeitsvektoren

Concept of a multi-component reference beam laser Doppler velocimeter for traceable measurements of velocity flow vectors

S. Gläser, S. Oertel, M. Eggert, P. Wilhelm and J. Hornig

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

Tel.-Nr.: 0531 592 1318

/

E-Mail-Adresse:

stefan.glaesener@ptb.de

Schlagworte: Mehrkomponenten-Referenzstrahl-LDA, Rückführbarkeit

Key words: multi-component reference beam velocimeter, traceability

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird das Konzept des neuen PTB-Mehrkomponenten-Referenzstrahl-LDAs (MKRS-LDAs) zur rückgeführten Messung von Strömungsgeschwindigkeitsvektoren in Windkanälen vorgestellt. Das Prinzip dieses Anemometers beruht dabei auf dem bereits in der PTB entwickelten Wind-Lidar-System [Oertel 2018], das bereits ausgiebig validiert wurde [Eggert 2019]. Dabei sind theoretisch Strömungsvektoren im Arbeitsabstand von ca. 1,5 m rückführbar und rückwirkungsfrei in allen drei Vektorkomponenten messbar. Die in diesem Beitrag dargestellten Ergebnisse zeigen die grundsätzliche Realisierbarkeit des Konzepts exemplarisch anhand der vektoriellen Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten im Windkanal.

Einleitung

In der Strömungsmesstechnik haben sich Laser-Doppler-Anemometer (LDA) als präzise Messsysteme für rückwirkungsfreie Strömungsgeschwindigkeitsmessungen etabliert. Bei der Kalibrierung von Anemometern in Windkanälen werden bevorzugt Einkomponenten-LDA-Systeme (1K-LDA-Systeme) als Referenz eingesetzt. Diese 1K-LDAs sind auf die SI-Einheiten rückgeführt und bestimmen genau eine von drei Geschwindigkeitskomponenten des Geschwindigkeitsvektors.

Für die Analyse komplexer Strömungsvorgänge ist jedoch die Messung aller drei Komponenten (3K) des Strömungsgeschwindigkeitsvektors erforderlich. Dies wird bei großen Arbeitsabständen (> 1 m) meistens mit mehreren auf den gleichen Messort ausgerichteten Messköpfen erreicht. Bei diesen Systemen liegt in der Regel keine eindeutig definierte Gesamt-Messgeometrie vor, was eine Kalibrierung des Gesamtsystems problematisch macht. Kompakte 3K-LDA-Systeme mit einem einzigen Messkopf sind hingegen in der Regel nur für kleine Arbeitsabstände bis maximal 1 m ausgelegt [Byrne et al. 2004, James et al. 2016]. Die Messgeometrie wird bei diesen Systemen allerdings in der Regel nicht rückgeführt, sodass auch in diesem Fall die Messgeometrie nicht exakt bekannt ist. Die dadurch entstehende Messunsicherheit nimmt zudem mit größer werdendem Arbeitsabstand zu. Somit fehlt insbesondere für die

messtechnisch rückführbare Messung von Strömungsgeschwindigkeitsvektoren mit Arbeitsabständen von mehr als 1 m eine geeignete Messtechnik.

Funktionsprinzip LDA

Ein LDA misst die Doppler-Verschiebung, die Laserlicht bei der Streuung an in der Strömung mitgeführten Partikeln erfährt. Diese Frequenzverschiebung ist proportional zur Geschwindigkeit des Partikels und kann direkt verwendet werden, um die Strömungsgeschwindigkeit zu bestimmen.

Bei der Herleitung des mathematischen Zusammenhangs zwischen Frequenzverschiebung und Geschwindigkeit werden der optische Sender sowie der Empfänger als ortsfest angenommen, während das Streuteilchen sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} bewegt. Dabei wird das Partikel zunächst als bewegter Empfänger und in einem zweiten Schritt als bewegter Sender betrachtet. Nach [Goldstein 1967] ergibt sich damit folgender Zusammenhang für die Frequenz f_{RX} des detektierten Laserlichtes:

$$f_{RX} = f_{TX} \frac{1 - \frac{\vec{e}_{TX} \vec{v}}{c}}{1 - \frac{\vec{e}_{RX} \vec{v}}{c}}$$

Dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit, f_{TX} die Frequenz des emittierenden Lasers, \vec{e}_{TX} und \vec{e}_{RX} die Einheitsvektoren vom Laser zum Partikel sowie vom Partikel zum Empfänger. Unter der Voraussetzung, dass die Partikelgeschwindigkeit gering ist gegenüber der Lichtgeschwindigkeit, lässt sich der Ausdruck für die Frequenzverschiebung $f_D = f_{RX} - f_{TX}$ noch vereinfachen:

$$f_D = \frac{\vec{v}}{\lambda_{TX}} (\vec{e}_{RX} - \vec{e}_{TX}) \quad (1)$$

Konventionelle LDAs

Bei LDAs in Rückstreurichtung ist das Kreuzstrahl-LDA nach dem Doppler-Differenzverfahren sehr weit verbreitet. Abbildung 1 zeigt schematisch das Funktionsprinzip eines solchen LDAs.

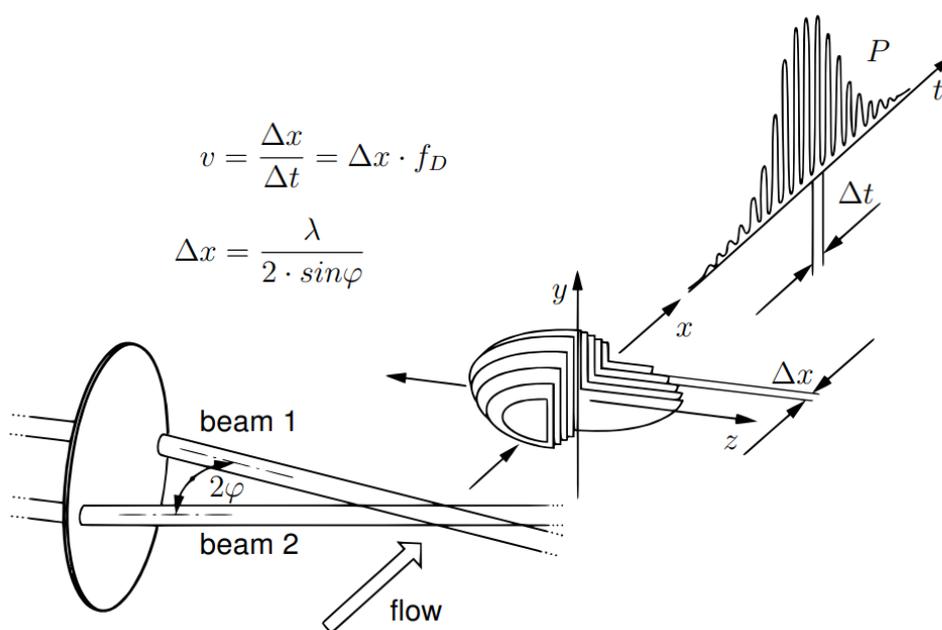


Abb. 1: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Kreuzstrahl-LDAs

Dabei wird ein Laserstrahl in zwei Teilstrahlen aufgespalten (siehe Abbildung 1 – beam 1 und beam 2) und diese im sogenannten Messvolumen wieder überlagert. Dadurch entstehen, bei der Reflexion an einem Partikel, zwei Streulichtsignale, die auf dem Detektor interferieren. Jedes Streulichtsignal separat erfährt eine Dopplerverschiebung gemäß Gleichung 1. Auf dem Detektor entsteht durch Mischen der beiden Streulichtsignale ein Schwebungssignal bei der Differenz der einzelnen Dopplerfrequenzen in den Teilstrahlen. Dadurch ergibt sich eine Signalfrequenz von $\Delta f_D = \frac{v_x 2 \sin(\varphi)}{\lambda}$.

Der zweite häufig vorkommende Vertreter der LDAs in Rückstreurichtung ist das Referenzstrahl-LDA. Bei einem Referenzstrahl-LDA wird nur ein Teilstrahl verwendet, um das Streupartikel zu beleuchten. Der andere Teilstrahl – der sogenannte Referenzstrahl – wird direkt zum Detektor geführt und dort mit dem Streulicht zur Interferenz gebracht (es wird auch von kohärenter Mischung gesprochen). Bei dieser kohärenten Detektion hat das Licht des Referenzstrahls, im Vergleich zum Kreuzstrahl-LDA, eine deutlich höhere Leistung, was einer optischen Vorverstärkung des Signals gleichkommt. Deshalb ist dieses Detektionsverfahren wesentlich unempfindlicher gegenüber Dunkelstrom- und Verstärkerrauschen, was gerade für kleine Streulichtsignale zu einem optimierten Signal-zu-Rausch-Verhältnis führt [Glaser 1997]. Die Schwebungsfrequenz entspricht bei diesem Verfahren der Dopplerverschiebung.

Ein wichtiger Unterschied zwischen dem Kreuzstrahl-LDA und dem Referenzstrahl-LDA in Rückstreurichtung ist die Richtung der detektierten Geschwindigkeitskomponente. Bei einem Kreuzstrahl-LDA wird die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zu dem, von den beiden Teilstrahlen (beam 1 und beam 2) gebildeten, Interferenzstreifensystem gemessen. In Abbildung 1 entspricht dies der x-Richtung. Beim Referenzstrahl-LDA wird hingegen die Geschwindigkeitskomponente v_w in Richtung der Winkelhalbierenden w zwischen den Einheitsvektoren \vec{e}_{RX} und $-\vec{e}_{TX}$ gemessen. In Abbildung 2 ist dies exemplarisch für einen Empfänger (RX3) und einen Sender (TX) gezeigt. Nach Gleichung 1 ergibt sich damit eine Dopplerfrequenzverschiebung von $\Delta f_D = \frac{v_w 2 \cos(\varphi)}{\lambda}$.

Ansätze für Mehrkomponenten-LDAs

Aus diesen konventionellen Ansätzen für das Konzept eines LDAs haben sich mehrere Konzepte für ein Mehrkomponenten-LDA ergeben. Sowohl Byrne et al. 2004 als auch James et al. 2016 geben einen Überblick über die verschiedenen Systeme mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen. Die folgende Tabelle stellt eine Zusammenfassung der Systeme dar:

Tab. 1: Übersicht über verschiedene Mehrkomponenten-LDAs nach Byrne et al. 2004 und James et al. 2016

#	Bezeichnung	Aufbau	Quelle
1	3-Referenzstrahl-Konfiguration	3 einzelne Referenzstrahl-LDAs	Huffacker 1970
2	Micro-LDA-Konfiguration	3 einzelne Kreuzstrahl-LDAs	Ahmed 1992
3	5-Strahl-Konfiguration	3 kombinierte Kreuzstrahl-LDAs (mit Farb- und Frequenzmultiplexing)	Strauter 1993
4	Hybrid-Konfiguration	2 Kreuz- und 1 Referenzstrahl-LDAs	James 1997

Je nach Anwendung hat jedes System seine Vor- und Nachteile. Auf Grund der Richtung der detektierten Geschwindigkeitskomponente ist Konfiguration #4 optimal, um alle drei Geschwindigkeitskomponenten mit möglichst geringer Messunsicherheit zu messen. Dies zeigen sowohl Byrne et al. 2004 als auch James et al. 2016 für kurze Arbeitsabstände und große Streulichtsignale.

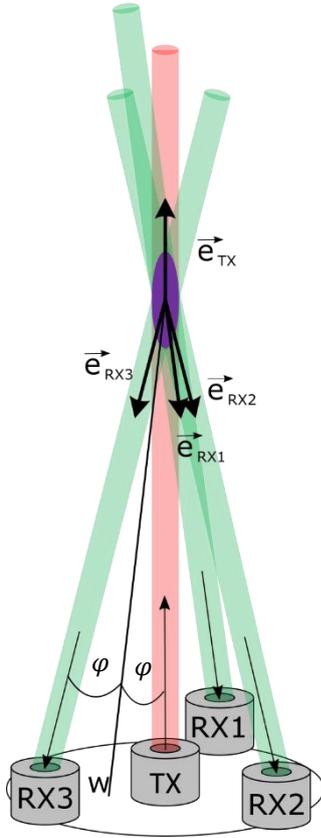


Abb. 2: Aufbau des Referenzstrahl-Mehrkomponenten-LDAs

Bei größerem Arbeitsabstand hingegen nimmt die Streusignalintensität ab, so dass das optimierte Signal-zu-Rausch-Verhältnis der kohärenten Detektion eines Referenzstrahl-LDAs eine zunehmende Rolle spielt. Daher wurde ein System mit drei Referenzstrahl-LDAs entwickelt [Gutsmuths 2017]. Der Unterschied, zu dem von Huffacker 1970 vorgestellten System ist, dass nicht drei einzelne Referenzstrahl-LDAs mit eigenen Sende- und Empfangsstrahlen in einen Kopf integriert werden, sondern nur ein Sendestrahler (TX) verwendet wird (siehe Abbildung 2). Das Streulicht wird dann von drei Empfängern (RX1-RX3) detektiert. Dies eröffnet die Möglichkeit, durch Neuausrichtung der Empfänger das Messvolumen entlang des Sendestrahls adaptiv zu verschieben, sodass die Limitierung auf eine feste Messgeometrie wegfällt. Dies wäre bei der Verwendung von Kreuzstrahl-LDAs nicht so einfach möglich, da ein anderer Messabstand für ein Kreuzstrahl-LDA eine Neuausrichtung von zwei Sendestrahlen bedeutet. Diese Neuausrichtung der Sendestrahlen beeinflusst sehr sensibel den Streifenabstand des Interferenzmusters, das die Grundlage zur Bestimmung der Partikelgeschwindigkeit darstellt.

Auch bei dieser Konfiguration von Sender und Empfängern ist eine Anpassung der Optik notwendig, falls die Lage des Messvolumens verändert wird. Betrachtet man Gleichung (1) für die allgemeine Doppler-Verschiebung in diesem MKRS-LDA für alle drei Empfangsoptiken gleichermaßen, gilt $f_{Di} = \frac{\vec{v}}{\lambda_{TX}} (\vec{e}_{RXi} - \vec{e}_{TX})$, wobei $i=1,2,3$ dabei der Index der Empfangsoptiken (RX1-RX3) ist. Durch eine geeignete Koordinatentransformation lässt sich diese Gleichung nach der Geschwindigkeit auflösen. Auf diese Weise lässt sich durch die Kenntnis der Sende- und Empfangsgeometrie, ausgedrückt durch Matrix (M) und der bekannten Wellenlänge λ_{TX} des Lasers, der Geschwindigkeitsvektor des Partikels bestimmen:

$$\vec{v} = \lambda_{TX} M^{-1} \begin{pmatrix} f_{D1} - f_{D2} \\ f_{D1} - f_{D3} \\ f_{D1} + f_{D2} + f_{D3} \end{pmatrix}$$

mit $M = (M_x, M_y, M_z)$ und

$$M_k = \begin{pmatrix} e_{RX1k} - e_{RX2k} \\ e_{RX1k} - e_{RX3k} \\ e_{RX1k} + e_{RX2k} + e_{RX3k} - 3 * e_{TXk} \end{pmatrix} ; k = x, y, z ,$$

wobei e_{RX1k} die k-te Komponente des Einheitsvektors \vec{e}_{RX1} ist.

Ändert sich demnach in diesem System die Lage des Messvolumens, so reicht es aus, die Geometriematrix anzupassen. Abbildungen 2 und 3 zeigen den optischen Aufbau des in der PTB entworfenen MKRS-LDAs. Auf Grund der Notwendigkeit, bei diesem LDA-System die Messgeometrie genau zu kennen, wird die Entfernung von jedem einzelnen Empfänger zum Messvolumen permanent mitgemessen. Auf diese Weise kann die Geometriematrix zeitkontinuierlich angepasst werden. Außerdem lassen sich alle drei Beobachtungsoptiken über Stellmotoren mit Genauigkeiten im Mikrogradbereich vom System aus nachregeln. Diese verstellbare Optik soll sicherstellen, dass zu jedem Zeitpunkt die Empfangsoptiken exakt auf das gewünschte Messvolumen ausgerichtet sind und die Messgeometrie zurückgemessen werden kann.

Die Entfernungsmessung zwischen Empfangsoptiken und Messvolumen wird durch eine Signallaufzeitmessung realisiert. Dabei wird das ausgesendete Signal moduliert, sodass die Phase des emittierten Lichts beim Aussenden und bei der Detektion bestimmt werden kann. Aus der Phasenverschiebung lässt sich die Signallaufzeit und somit auch die Distanz der Streupartikel zum Empfänger bestimmen [Park 2013].

Messaufbau

Der interne Aufbau des MKRS-LDA-Systems ist in Abbildung 3 gezeigt. Die genaue Signallaufzeitdifferenz in den Beobachtungsstrahlen erfordert die Verwendung zweier Lichtfrequenzen mit hinreichend großem Frequenzabstand. Diese Frequenzverschiebung von ± 80 MHz wird durch zwei separate akustooptische Modulatoren (AOMs) realisiert (Abbildung 3 zeigt schematisch nur einen der AOMs). Als Lichtquelle dient ein Faserlaser mit 80 mW Ausgangsleistung und einer Wellenlänge von 1550 nm. Das zu emittierende Signal wird nach der Frequenzverschiebung durch die AOMs durch einen Faserverstärker auf eine Leistung von bis zu einem Watt verstärkt, bevor es emittiert wird (TX). Vor der Emission wird ein Teil des Lichts auf einen Referenzkanal abgespalten, um die Bestimmung einer Referenzphase zu ermöglichen. Die Überlagerung des Lokaloszillatorsignals mit dem Streulichtsignal des Partikels (RX1-RX3) erfolgt über 90°-Hybridkoppler auf balanced Photodetektor-Paaren (BPD). Aus dem Schwebungssignal können je nach Phasenverschiebung im Hybridkoppler Real- und Imaginärteil des Signals

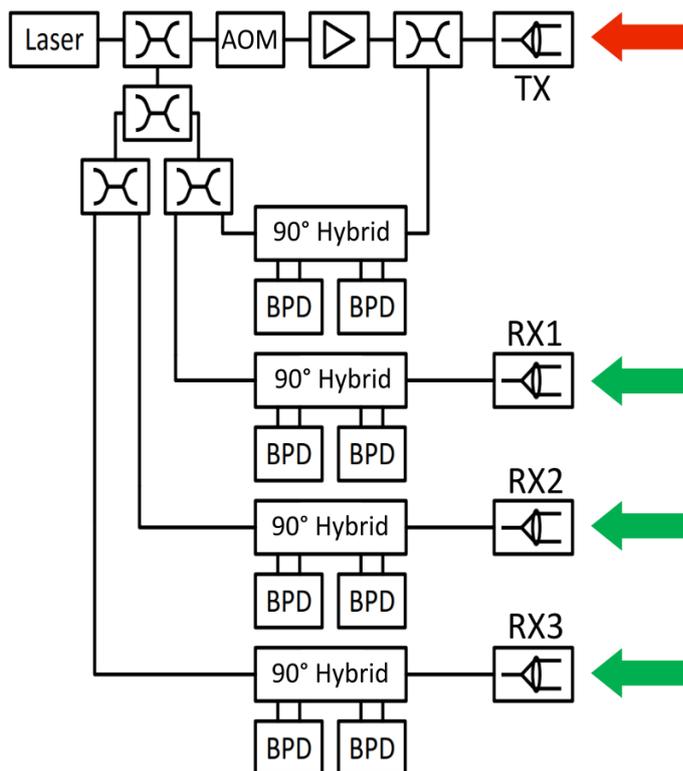


Abb. 3: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Referenzstrahl-Mehrkomponenten-LDAs (BPD: Balanced Photodetektor, AOM: Akustooptischer Modulator)

erfolgt über 90°-Hybridkoppler auf balanced Photodetektor-Paaren (BPD). Aus dem Schwebungssignal können je nach Phasenverschiebung im Hybridkoppler Real- und Imaginärteil des Signals

($Re(S)$, $Im(S)$) extrahiert werden. Über den Zusammenhang $\phi = \arctan2(Re(S), Im(S))$ lässt

sich dann auch die Phase des Signals bestimmen und über Subtraktion der Referenzphase die gesuchte Phasenverschiebung.

Strömungsgeschwindigkeitsmessung im Windkanal

Abbildung 4 zeigt den Messaufbau bestehend aus einem Windkanal (Göttinger Bauart), einem Kreuzstrahl-LDA als Referenz und dem MKRS-LDA. Die beiden LDAs sind auf dasselbe Messvolumen im Zentrum des Windkanals ausgerichtet. Das Kreuzstrahl-LDA ist senkrecht zur Strömung ausgerichtet, um den Strömungsbetrag zu messen. Das MKRS-LDA misst die Strömung unter einem Beobachtungswinkel α . Dabei wurden, für jede Strömungsgeschwindigkeit, die Geschwindigkeiten der Partikel im Messvolumen über eine Minute gemessen und Mittelwert sowie Standardabweichung bestimmt.

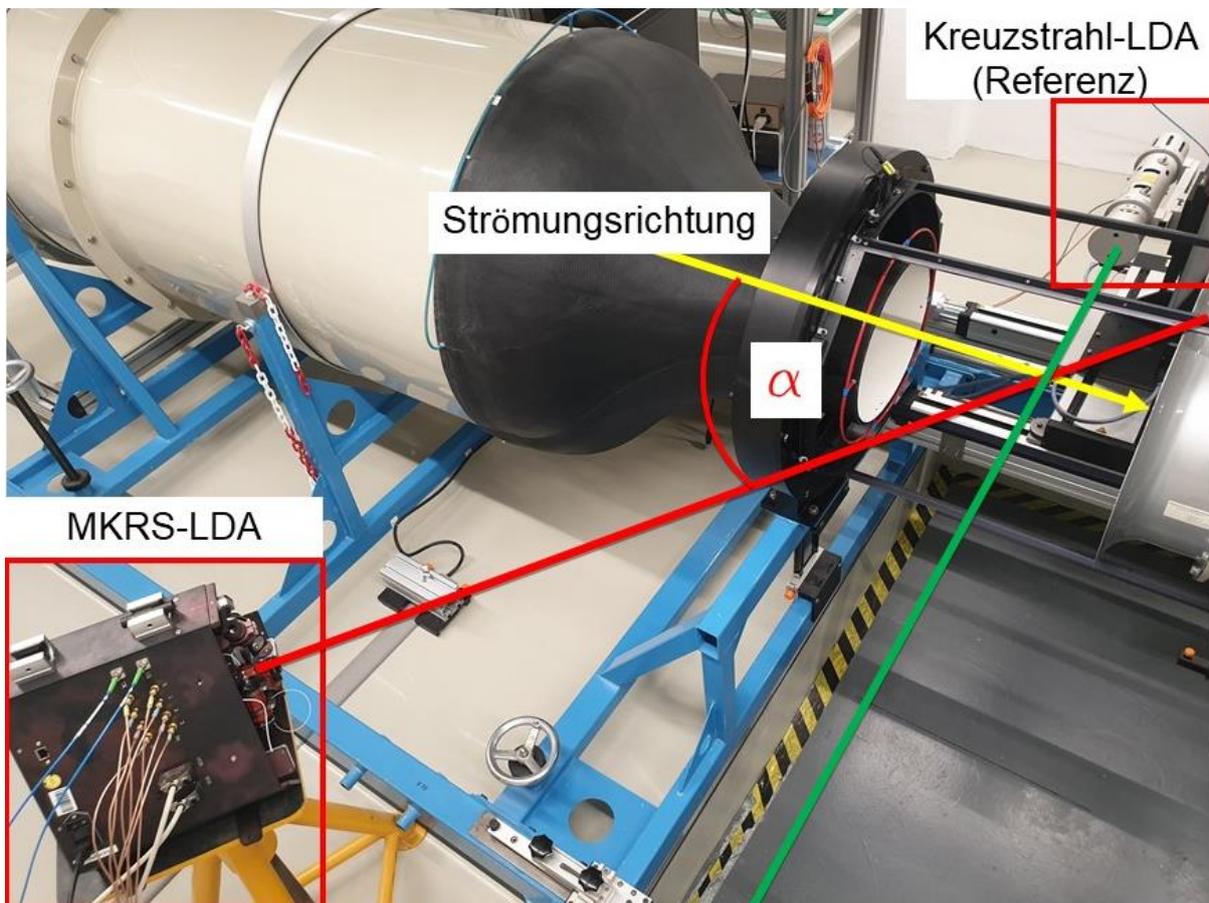


Abb. 4: Foto des Messaufbaus

Da das MKRS-LDA alle drei Komponenten des Geschwindigkeitsvektors bestimmt, lässt sich sowohl der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit zwischen den LDAs vergleichen als auch der Beobachtungswinkel α bestimmen.

Abbildung 5 zeigt den Vergleich der Messung des Geschwindigkeitsbetrags zwischen dem MKRS-LDA und dem Kreuzstrahl-LDA über einen Geschwindigkeitsbereich von 0,2 m/s bis 33 m/s. Die relative Abweichung liegt bei $(-0,72 \pm 0,25) \%$. Da das MKRS-LDA nicht kalibriert ist, kann die vom MKRS-LDA gemessene Geschwindigkeit noch um den Faktor von 0,72 % korrigiert werden.

Abbildung 6 zeigt die Aufteilung der Strömungsgeschwindigkeiten in die drei kartesischen Koordinatenrichtungen in Bezug auf den Detektorkopf (vergleiche Abbildung 1). Über $\alpha = \arctan \frac{v_y}{v_z}$ lässt sich der Beobachtungswinkel in Bezug auf die Strömungsrichtung bestimmen (vergleiche Abbildung 4), die in diesem Fall bei $\alpha = (54,96 \pm 0,06)^\circ$ liegt.

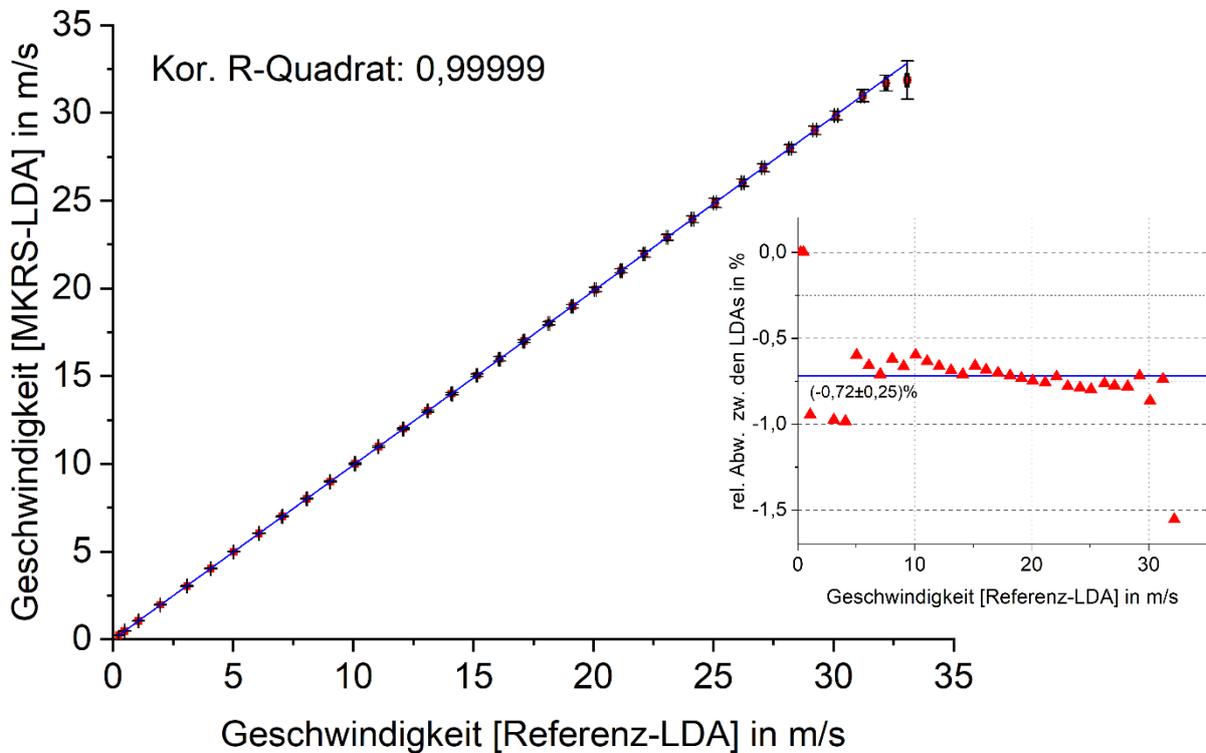


Abb. 5: Vergleich des Geschwindigkeitsbetrages zwischen einem kalibrierten Kreuzstrahl-LDA (Referenz-LDA) und dem vorgestellten MKRS-LDA (großes Diagramm) sowie die relative Abweichung zwischen den gemessenen Geschwindigkeiten (kleines Diagramm).

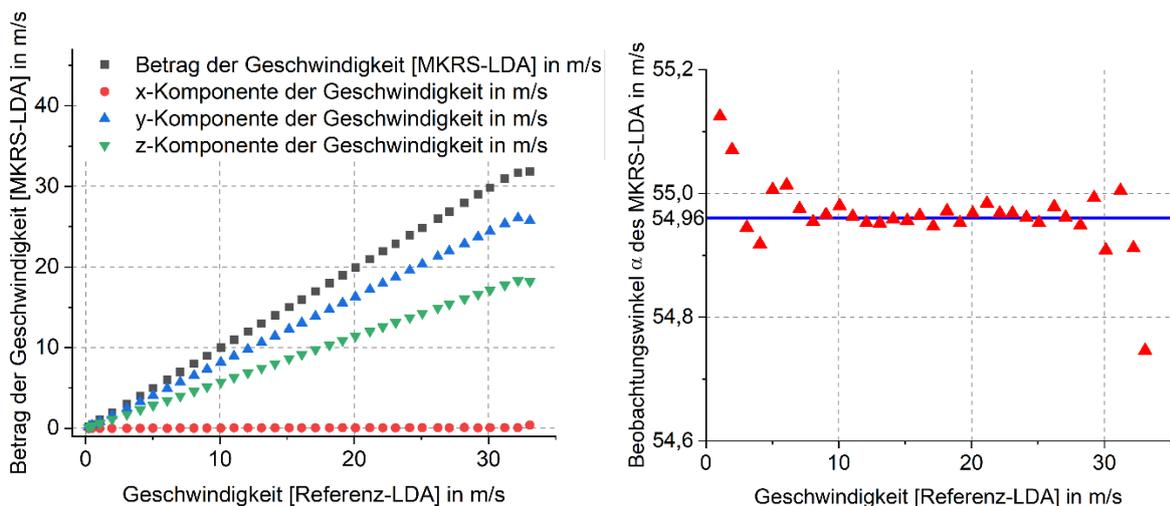


Abb. 6: Messung der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten (links) beziehungsweise des Beobachtungswinkels α zwischen MKRS-LDA und der Strömungsrichtung.

Fazit & Ausblick

In diesem Beitrag wurde das Konzept eines Mehrkomponenten-Referenzstrahl-Laser-Doppler-Anemometers (MKRS-LDAs) zur rückgeführten Messung von Strömungsgeschwindigkeitsvektoren mit verstellbarer Optik vorgestellt. Die prinzipielle Realisierbarkeit des Konzepts wurde exemplarisch anhand einer vektoriellen Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit im Bereich von 0,2 m/s bis 33 m/s in einem Windkanal gezeigt. Das Verschieben des Messvolumens während einer Messung wurde bislang noch nicht realisiert und ist neben der Erweiterung des Messbereichs hin zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten der nächste Schritt in der Entwicklung dieses MKRS-LDAs.

Literatur

Oertel, S., Eggert, M., Gutmuths, C., Müller, H., Többen, H., 2018: "Three-component fiber laser based Lidar sensor for traceable highly resolved wind vector measurements", ITG-Fb. 281: Sensoren und Messsysteme

Eggert, M., Tambke, J., Gutmuths, C., Oertel, S., Wilhelm, P., Müller, H., Mauder, M., 2019: "Vergleich des bistatischen Doppler-Lidars der PTB und eines Ultraschall-Anemometers zur Messung von Turbulenzspektrern", Proc. 27. GALA-Fachtagung, 29, pp.1-9

Byrne, G.D., James, S.W., Tatam, R.P., 2004: "A single-headed fibre optic laser Doppler anemometer probe for the measurement of flow angles", Meas. Sci. Technol. 15, pp.1-8

James, S.W., Lockey, R.A., Egan, D., Tatam, R.P., Elder, R.L., 2016: "3D Fibre Optic Laser Doppler Velocimetry", SPIE Vol. 2839, pp.323-334

Goldstein, R.J., Kreid, D., 1967: "Measurement of laminar flow development in a square duct using a laser-Doppler flowmeter", ASME J of Appl Mech 34

Glaser, W., 1997: "Photonik fuer Ingenieure"

Huffacker, R.M., 1970: "Laser Doppler detection system for gas velocity measurement", Appl. Opt. Vol. 9, pp.1026-39

Ahmed, N.A., Hamid, S., Elder, R.L., Forster, C.P., Tatam, R.P., Jones, J.D.C., 1992: "Fiber optic laser anemometer for turbomachinery applications", Opt. Lasers Eng. Vol. 16, pp.193-205

Stauter, R.C., 1993: "Measurements of the three-dimensional tip region flow field in axialcompressor", J. Turbomachinery Vol. 115, pp.469-73

James, S.W., Tatam R.P., Elder, R.L., 1997: "Design considerations for a three dimensional fibre optic laser Doppler velocimeter for turbomachinery applications", Rev. Sci. Instrum. Vol. 68, pp.3241-6

Gutmuths, C., Eggert, M., Müller, H., 2017: "Konzeption eines Mehrkomponenten-Referenzstrahl-LDA in Rückstreurichtung zur rückgeführten Messung von komplexen Strömungen in Großwindkanälen", Proc. 25. GALA-Fachtagung, 4, pp.1-7

Park, Y.-H. et al., 2013: "Three-dimensional imaging using fast micromachined electro-absorptive shutter", J. Micro/Nanolithography, MEMS, MOEMS, Vol. 12, 023011