

3-Komponenten-Laser-Doppler-Anemometer mit Selbst-Kalibrierung

Harald Müller¹, Christian Gutmuths¹, Michael Eggert¹, Helmut Többen¹

¹Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Auf die SI-Einheiten messtechnisch rückgeführte, präzise und rückwirkungsfreie Strömungsgeschwindigkeitsmessungen erfolgen in der Regel mit Laser Doppler Anemometern als Bezugsnormen. Hierzu werden Laser-Doppler-Anemometer (LDA) kalibriert, wobei die Kalibrierung für jede einzelne, Komponente des Strömungsgeschwindigkeitsvektors unabhängig von der geometrischen Lage der Vektorkomponenten zueinander erfolgt. Daher ist für viele Messanordnungen zur Messung von mehr als einer Strömungsgeschwindigkeitskomponente eine messtechnisch rückgeführte Messung des resultierenden Strömungsgeschwindigkeitsvektors problematisch. Das in der PTB entwickelte 3-Komponenten-LDA mit Selbstkalibrierung hingegen sieht vor, durch eine während des Messvorgangs ausgemessene und nachgeregelte Messgeometrie, Strömungsgeschwindigkeitsvektoren rückgeführt zu messen. Der LDA-Arbeitsabstand im Bereich von 1,5 m und der angestrebte Geschwindigkeitsbereich von bis zu 100 m/s sollen insbesondere Möglichkeiten zu rückgeführten Messungen in größeren Windkanälen zur Analyse komplexer Strömungsvorgänge eröffnen.

Keywords: 3-K-Laser-Doppler-Anemometrie, Bezugsnormal, Strömungsanalyse, Doppler-Referenz-Verfahren, messtechnische Rückführung.

Einleitung

Laser-Doppler-Anemometer haben sich in den letzten Jahrzehnten in vielen Anwendungsbereichen der Strömungsmesstechnik als präzise Messsysteme insbesondere für rückwirkungsfreie, örtlich und zeitlich hochaufgelöste Strömungsgeschwindigkeitsmessungen etabliert. Während für die Kalibrierung von Anemometern in Windkanälen vorzugsweise kalibrierte, d.h. auf die SI-Einheiten rückgeführte, 1-K-LDA-Systeme als Bezugsnormale zur Bestimmung der Geschwindigkeitskomponente in Strömungsrichtung eingesetzt werden, ist für die Analyse komplexer Strömungsvorgänge die Messung aller drei Komponenten des Strömungsgeschwindigkeitsvektors erforderlich, wobei zunehmend auch hier die messtechnische Rückführung zur Sicherstellung der Messrichtigkeit gefragt ist. Die messtechnische Rückführung konventioneller 3-K-LDA-Systeme ist jedoch problematisch, da die meisten für größere Arbeitsabstände > 1 m eingesetzten Systeme [3, 5] auf dem Einsatz von zwei auf den gleichen Messort anwendungsspezifisch auszurichtenden Messköpfen basieren, so dass eine eindeutig definierte Gesamt-Messgeometrie in der Regel nicht vorliegt. Kompakte 3-K-LDA-Systeme mit einem einzigen Messkopf [1, 2, 4, 6] sind hingegen in der Regel nur für Arbeitsabstände bis zu ca. 1 m ausgelegt, wobei

die Messgeometrie für die drei Komponenten derartiger Systeme nicht rückgeführt ist. Somit fehlt insbesondere für die messtechnisch rückführbare Messung von Strömungsgeschwindigkeitsvektoren in Großwindkanälen mit Arbeitsabständen > 1m eine geeignete Messtechnik. Um für größere Arbeitsabstände wie z.B. für Messaufgaben in Großwindkanälen die messtechnische Rückführung von 3-K-Strömungsgeschwindigkeitsvektormessungen zu ermöglichen, wird in der PTB ein Referenzstrahl-Laser-Doppler-Anemometer (LDA) entwickelt, das auf einer während des Messvorgangs selbst vermessenen und einjustierten Messgeometrie basiert.

Messprinzip

Das entwickelte 3-K-Referenzstrahl LDA nutzt einen Messtrahl und drei Beobachtungsstrahlen [7], wobei die messtechnische Rückführung auf die SI-Einheiten auf der Kenntnis der Laserwellenlänge, der Messung der Doppler-Frequenzverschiebung in den einzelnen Beobachtungsstrahlen und – als entscheidender Neuerung! – der durch Regelalgorithmen im Rahmen der Messunsicherheit eingehaltenen Messgeometrie beruht. Das Grundprinzip ist in Abbildung 1 dargestellt und gleicht dem Prinzip des in der PTB bereits entwickelten in der Validierungsphase befindlichen bistatischen Wind-Lidar-Systems [8].

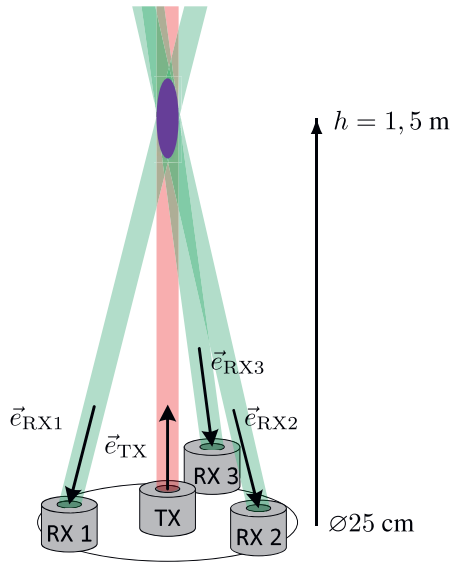


Abb. 1: Messgeometrie des 3-K-Referenzstrahl LDA-Systems mit einem Sendestrahl (rot) und drei Beobachtungsstrahlen (grün), alle Strahlen sind auf den Messort im Abstand von 1,5 m fokussiert und ausgerichtet.

Bei dem zugrunde liegenden Messprinzip wird der Strömungsgeschwindigkeitsvektor \vec{v} aus den gemessenen Doppler-Frequenzverschiebungen f_{Di} ($i = 1, 2, 3$) des von den Beobachtungsstrahlen erfassten Streulichts von in der Strömung mitgeführten Partikeln nach Gl. 1 bestimmt:

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

mit λ_{TX} : Laserwellenlänge, M : Geometriematrix aus Gl. 2 - 5 und f_{Di} ($i = 1, 2, 3$) nach Gl. 6:

$$M = \begin{pmatrix} M_x & M_y & M_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$M_x = \begin{pmatrix} e_{RX1_x} - e_{RX2_x} \\ e_{RX1_x} - e_{RX3_x} \\ e_{RX1_x} + e_{RX2_x} + e_{RX3_x} - 3 \cdot e_{TX_x} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$M_y = \begin{pmatrix} e_{RX1_y} - e_{RX2_y} \\ e_{RX1_y} - e_{RX3_y} \\ e_{RX1_y} + e_{RX2_y} + e_{RX3_y} - 3 \cdot e_{TX_y} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$M_z = \begin{pmatrix} e_{RX1_z} - e_{RX2_z} \\ e_{RX1_z} - e_{RX3_z} \\ e_{RX1_z} + e_{RX2_z} + e_{RX3_z} - 3 \cdot e_{TX_z} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$f_{Di} = \frac{\vec{v}}{\lambda_{TX}} \cdot (\vec{e}_{RXi} - \vec{e}_{TX}) \quad (6)$$

Zur Messung der Doppler-Frequenzen wird - dem Referenzstrahlverfahren entsprechend - jeweils ein vom Laser TX mittels Faserkoppler ausgekoppelter Strahlungsanteil mit dem detektierten Dopplerverschobenen Streulicht überlagert. Dabei erfolgt die Überlagerung über 90° Hybridkoppler auf balanced Photodetektor-Paaren zur Bereitstellung des Real- und Imaginärteils der auszuwertenden Schwebungssignale (s. Abb.2).

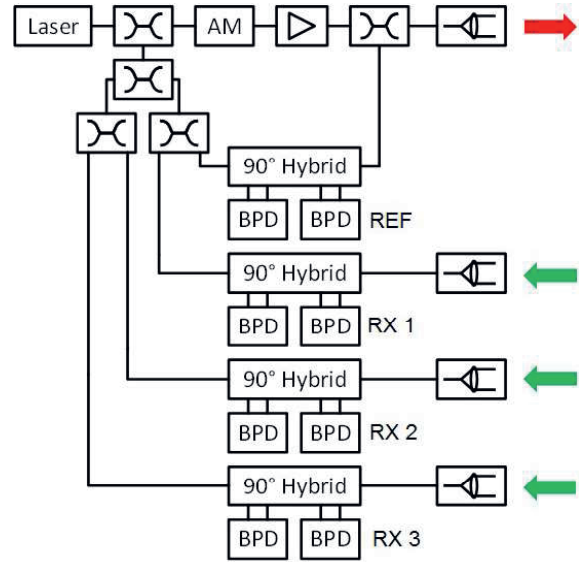


Abb. 2: Blockschaltbild zum Messprinzip des 3-K-Referenzstrahl LDA-Systems mit Kollimationsoptiken (rot: Messtrahl, grün: Beobachtungsstrahlen). Die Hybridkoppler liefern jeweils 90° in der Signalphase gegeneinander verschobene Gegentaktsignale für die „balanced Photo-Dioden“ (BPD) zur Referenz- (REF) und Messsignalerzeugung (RX 1, RX 2, RX 3).

Die Herausforderung bei dem 3-K-Referenzstrahl LDA besteht in der genauen Bestimmung der Messgeometrie und damit in der exakten Erfassung des gewählten Messabstands im Meterbereich, dessen Kenntnis eine notwendige Voraussetzung für die messtechnische Rückführbarkeit des Strömungsgeschwindigkeitsvektors darstellt. Die Abstandsbestimmung erfolgt über Signalphasen-Laufzeitdifferenzen ($TX-RX_i$) in allen drei Beobachtungsrichtungen und erfordert für die benötigte Auflösung die Verwendung zweier Lichtfrequenzen mit hinreichend großem Frequenzabstand innerhalb der Messsignalbandbreite. Dies wird durch den Amplitudenmodulator (AM) (s. Abb. 2) zur Erzeugung zweier optischer Frequenzen, der Laseremissionsfrequenz plus und minus 80 MHz, erreicht. Als Laser wird ein Faserlaser mit einer Wellenlänge von 1550 nm verwendet, dessen Ausgangssignal über einen Faserverstärker auf ca. 1 W (cw) verstärkt wird. Die eingesetzten Faserkoppler dienen der optischen Leistungsteilung für die Schwebungssignalerzeugung.

der komplexen Signale für das Referenzsignal und die drei Messsignale. Die Abbildung 3 zeigt das Blockschaltbild zur Signalverarbeitung der einzelnen Dopplerfrequenzen und Signalphasen, aus denen die Geschwindigkeitskomponenten des Strömungsvektors (s. Matrix Gln. 2 - 5) und der Abstand zum Messort bestimmt werden.

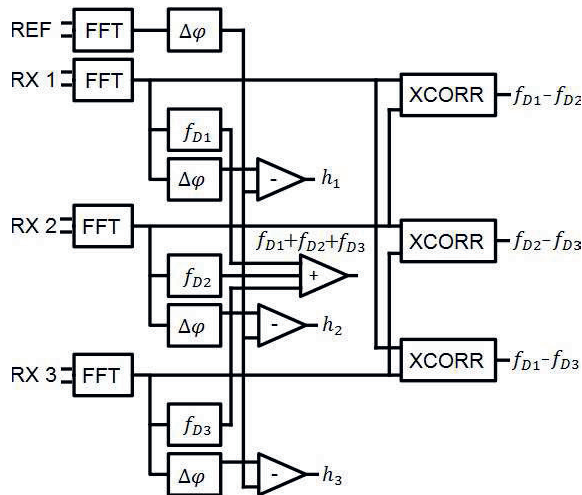


Abb. 3: Blockschaltbild zur Signalverarbeitung 3-K-Referenzstrahl LDAs.

Aus den Signalphasen der drei Beobachtungsstrahlenpfade werden die jeweiligen innerhalb der Mess- und Justierunsicherheiten übereinstimmenden Messabstände (h_1 , h_2 , h_3) bestimmt, deren Mittelwert den genauen Abstand zum Messort angibt. Die Positionierung der einzelnen Beobachtungsstrahlen erfolgt durch piezoelektrische Stellelemente für die Horizontal- und Vertikalrichtungen. Dabei werden für einen vorgegebenen Messabstand durch Scannen der Beobachtungsstrahlen, die optimale Ausrichtung auf den Messstrahl und durch Korrelation der drei Messsignale eine optimale Überlagerung aller Strahlen am Messort realisiert. Durch die Korrelation der Messsignale ist sichergestellt, dass alle drei Beobachtungsstrahlen auf den gleichen Messort ausgerichtet sind und die Auswertung der Dopplersignale aus den unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen sich auf die jeweils gleichen Streuteilchen in dem durch den Überlappungsbereich aller Strahlen definierten Messvolumen bezieht. Damit lässt sich der Strömungsgeschwindigkeitsvektor aus den Strömungsgeschwindigkeitsvektorkomponenten von einzelnen Streuteilchen innerhalb des Messvolumens eindeutig bestimmen und durch die Kenntnis der während des Messvorgangs eingeregelterten und gemessenen Beobachtungsgeometrie messtechnisch auf die SI-Einheiten rückführen. Die Abbildung 4 zeigt den Gesamtaufbau des 3-K-LDA-Systems mit Ansteuereinheit und Messkopf ohne Abdeckplatte. Zu sehen sind die Kollimationsoptiken mit den justierbaren Spiegeloptiken in den Ecken des Messkopfs sowie die Sendeoptik in der Mitte des

Messkopfs. Abbildung 5 zeigt den 3-K-Messkopf mit Abschlussdeckel und den vier planparallelen entspiegelten Fenstern für den Messstrahl und die drei Beobachtungsstrahlen.



Abb. 4: 3-K-Referenzstrahl-LDA-System



Abb. 5: 3-K-Referenzstrahl-LDA-Messkopf

Ausblick

Vorgestellt wurde ein 3-K-Referenzstrahl-LDA, das durch die mögliche Positionierung der Beobachtungsstrahlen, die Korrelation der drei Messsignale und die Auswertung der einzelnen Signallaufzeiten die Realisierung einer vom System selbst eingemessenen Geometrie zur Bestimmung des kompletten Strömungsgeschwindigkeitsvektors erlaubt. Auf diese Weise ist ein 3-K-Laser-Doppler-Anemometer realisierbar, dessen Regelalgorithmen erstmals die Selbstkalibrierung des Systems für einen vorgebbaren Arbeitsabstand ermöglicht. Das Ziel der im Rahmen einer Kooperation mit der Deutschen WindGuard Wind Tunnel Services GmbH durchgeführten Entwicklung ist der Einsatz des Messsystems für die rückführbare Messung aller Komponenten des Strömungsgeschwindigkeitsvektors in Großwindkanälen.

Literatur

- [1] G. D. Byrne, S. W. James, R. P. Tatam, Meas. Sci. Technol. 15 (2004) 1 – 8; A single-headed fibre optic laser Doppler anemometer probe for the measurement of flow angles
- [2] S. W. James, R. A. Lockey, D. Egan, R. P. Tatam, R. L. Elder: 3D Fibre Optic Laser Doppler Velocimetry, SPIE Vol. 2839/323 – 2839/334, 2016
- [3] Dantec Dynamics: Integrated solutions in Laser Doppler Anemometry, Publication No.: 318_v1
- [4] Dantec Dynamics: FiberFlow Probe, 112 mm diameter, 5 beams, Three velocity components with a single probe, Publication No.: PI_168_v10
- [5] TSI Incorporated: Powersight Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Systems, P/N 5001100 Rev C, 2014
- [6] TSI Incorporated: 5-Beam Fiber Optic Probe Model TR360, P/N 1990677 Rev D, 2014
- [7] C. Gutmuths, M. Eggert, H. Müller: Konzeption eines Mehrkomponenten-Referenzstrahl-LDA in Rückstreurichtung zur rückgeführten Messung von komplexen Strömungen in Großwindkanälen, Proc. 25. GALA-Fachtagung, 4/1 – 4/7, 2017
- [8] S. Oertel, M. Eggert, C. Gutmuths, H. Müller, H. Többen: Three-component fiber laser based Lidar sensor for traceable highly resolved wind vector measurements, ITG-Fb. 281: Sensoren und Messsysteme, 2018