

KONZEPTION EINES MEHRKOMponentEN-REFERENZSTRAHL-LDA IN RÜCKSTREURICHTUNG ZUR RÜCKGEFÜHRTEN MESSUNG VON KOMPLEXEN STRÖMUNGEN IN GROSSWINDKANÄLEN

CONCEPT OF A MULTI-COMPONENT-REFERENCEBEAM-LDA IN BACKSCATTERING DIRECTION FOR TRACEABLE MEASUREMENTS OF COMPLEX FLOWS IN LARGE WINDTUNNELS

C. Gutsmuths, M. Eggert, H. Müller

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

Schlagworte: Rückstreu-Referenzstrahl-LDA, Mehrkomponenten-LDA, Geschwindigkeitsvektor Rückführung
Key words: backscattering-referencebeam-LDA, multicomponent-LDA, 3c velocity vector traceability

Abstract

Vorgestellt wird das Konzept eines neuartigen Mehrkomponenten-Referenzstrahl-Laser-Doppler-Anemometers (**MKRS LDA**), welches in Großwindkanälen die messtechnische Rückführung eines Strömungsgeschwindigkeitsvektors auf die SI-Einheiten ermöglichen soll, indem alle Komponenten des Strömungsgeschwindigkeitsvektors an einzelnen Streupartikeln simultan erfasst werden. Die messtechnische Rückführbarkeit wird es erlauben, dieses LDA in seinem vollen Funktionsumfang insbesondere auch für Kalibrierungen zu verwenden. Weiterhin wird gezeigt, dass das System sowohl bei großen Arbeitsabständen (ca. 1,5 m) als auch bei hohen Geschwindigkeiten (bis zu 100 m/s) Messungen mit geringen Messunsicherheiten in komplexen Strömungsfeldern erlaubt, welche bei Umströmungsvorgängen von Interesse sind.

Durch die kohärente Detektion ist es zudem möglich, auch kleinere Streupartikel (\varnothing im untern μm -Bereich) für die Untersuchung von dynamischen Strömungsvorgängen zu verwenden.

Motivation

Die Motivation zum vorgestellten Konzept liegt in der zunehmenden Nachfrage nach messtechnisch rückgeführten Messungen für hohe Geschwindigkeiten von bis zu 100 m/s, mehrere Geschwindigkeitskomponenten und größere Arbeitsabstände von ca. 1,5 m. Zudem sollten die Messungen zwecks optischer Zugänglichkeit zur Strömung in Rückstreurichtung erfolgen. Nun gibt es bereits LDA-Systeme, die einzelne Forderungen erfüllen, jedoch nicht alle Anforderungen gleichzeitig abdecken. Gründe hierfür bestehen darin, dass bei konventionellen LDA-Systemen in Rückstreurichtung mit der durch zunehmenden Arbeitsabstand und mit der durch schwindende Beobachtungsdauern (hohe Strömungsgeschwindigkeiten) abnehmenden Streulichtleistung die LDA-Messsignale keine hinreichenden Signal-zu-Rauschverhältnisse mehr aufweisen.

Zudem wird bei der derzeitigen Rückführung von konventionellen Mehrkomponenten-Kreuzstrahl-LDA-Systemen die Kalibrierung mit dem Geschwindigkeits-Primärnormal für jede Geschwindigkeitsvektorkomponente einzeln und nacheinander durchgeführt ohne die durch den LDA-Aufbau vorgegebenen Lagen der Messebenen zueinander messtechnisch rückzuführen. Hier würde das neue Messkonzept Möglichkeiten für neue Verfahren zur messtechnischen Rückführung konventioneller Mehrkomponenten LDA-Systeme bieten.

Bei den über 20.000 von akkreditierten Kalibrierlaboratorien in Deutschland pro Jahr für die Windenergiebranche kalibrierten Anemometern wird üblicherweise ein Geschwindigkeitsbereich von 4 m/s bis 16 m/s abgedeckt, wobei zunehmend auch die Windrichtung zur Bestimmung des Windvektors einbezogen wird. Gerade

aber für deutlich höhere Windgeschwindigkeiten, wie sie bei Extremwetterlagen auftreten und für die Analyse von Belastungsmessungen an Rotorblättern und den Nachweis von Schadensfällen von Interesse sind, besteht ein Bedarf an messtechnisch rückführbaren Messungen von Windgeschwindigkeitsvektoren mit deutlich höheren Windgeschwindigkeiten.

Funktionsprinzip LDA

Bei einem **Laser-Doppler-Anemometer (LDA)** wird an in Strömungen mitgeführten Partikeln Licht gestreut, Doppler-verschoben und mit einem Fotodetektor empfangen. Die Doppler-Verschiebung wird als der Strömungsgeschwindigkeit proportionale Messgröße bestimmt. Der optische Sender und der Empfänger sind ortsfest, während sich das Streupartikel im strömenden Medium bewegt. Bei Partikeln mit Größen im mittleren μm -Bereich kann davon ausgegangen werden, dass sie der Strömung schlupffrei folgen, so dass die Geschwindigkeit der Partikel mit der Strömungsgeschwindigkeit gleichgesetzt werden kann.

Bei diesem Messprinzip wirkt der Doppler-Effekt zweimal: Das Erste mal wird der Laser als Sender betrachtet und das Partikel als Empfänger. Beim zweiten mal wird das Partikel als Sender betrachtet und der optische Empfänger als Empfänger. Daraus ergibt sich folgender formaler Zusammenhang für die gemessenen Frequenz f_{RX} [Goldstein (1967)]:

$$f_{RX} = f_P \cdot \frac{1}{1 - \vec{e}_{RX} \cdot \vec{v}/c} \quad (1)$$

$$f_{RX} = f_{TX} \cdot \frac{1 - \vec{e}_{TX} \cdot \vec{v}/c}{1 - \vec{e}_{RX} \cdot \vec{v}/c} \quad (2)$$

Durch eine Potenzreihenentwicklung sowie unter der Voraussetzung dass $\vec{v}/c < 10^{-4}$ gelten soll, sowie unter Vernachlässigung des quadratischen Terms ergibt sich [Goldstein (1967)]:

$$f_{RX} \approx f_{TX} + f_{TX} \frac{\vec{v}}{c} \cdot (\vec{e}_{RX} - \vec{e}_{TX}) \quad (3)$$

$$f_{TX} - f_{RX} = f_D = f_{TX} \cdot \frac{\vec{v}}{c} \cdot (\vec{e}_{RX} - \vec{e}_{TX}) \quad \text{Frequenzverschiebung (Dopplerfrequenz)}$$

$$f_D = \frac{\vec{v}}{\lambda_{TX}} \cdot (\vec{e}_{RX} - \vec{e}_{TX}) \quad (4)$$

Zu beachten ist, dass f_{RX} die gleiche Größenordnung hat wie f_{TX} (ca. $c/\lambda \approx 10^8 \cdot (10^{-6})^{-1} \text{Hz} = 10^{14}$ Hz). Zur Signalfrequenzauswertung wird eine kohärente Detektion verwendet, bei dem ein Teil des Sendelichts auf den Empfänger umgeleitet wird, wo es mit dem Licht aus der Messung interferiert und sich ein Schwebungssignal ausbildet, dessen Frequenz Δf_D entspricht.

Konventionelle LDAs

In Rückstreurichtung ist das Kreuzstrahl-LDA nach dem Doppler-Differenzverfahren der konventionelle Vertreter unter den LDAs. Seit den 80er Jahren hat sich ihr prinzipieller Aufbau kaum verändert. Er wurde lediglich den aktuellen Technologien (von HeNe Lasern über DFB-Laserdioden zu Faserlasern, von kompletten Freistrahlbauten zur teilweisen Verwendung von faseroptischen Komponenten sowie von Photomultipliern zu Avalanche-Photodioden) angepasst. Grundsätzlich kann man die 1D Kreuzstrahl-LDAs unterteilen in Systeme mit und ohne optischer Frequenzverschiebung zwischen den in das Messvolumen fokussierten Laserstrahlen.

In Abbildung 1 ist der schematische Aufbau eines ungeschifteten Kreuzstrahl-LDAs zu sehen. Es werden hierbei zwei kohärente Laserstrahlen in eine Strömung fokussiert. Durchquert ein in der Strömung mitgeführtes Partikel den Kreuzungsbereich der beiden Laserstrahlen, so streut es zwei unterschiedlich dopplerverschobene Lichtkomponenten, aus deren Überlagerung der Geschwindigkeitsbetrag des Teilchens ermittelt werden kann.

Beim Frequenzshift-LDA befindet sich ein AOM (akustooptischer Modulator, Braggzelle) in einem der beiden

Strahlengänge zur Erzeugung einer optischen Frequenzverschiebung. Dadurch ist es möglich, das Vorzeichen der Frequenzverschiebung und damit auch das Vorzeichen der Geschwindigkeit des Teilchens festzustellen. Weiterhin sind Frequenzshift-LDAs in der Regel etwas rauschärmer, da die Signale in einem höheren Frequenzband liegen und damit leichter von dem niederfrequenten Rauschen zu trennen sind.

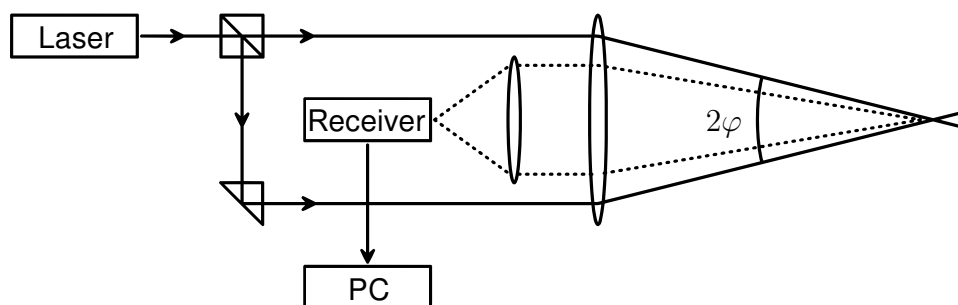


Abbildung 1: Strahlenverlauf

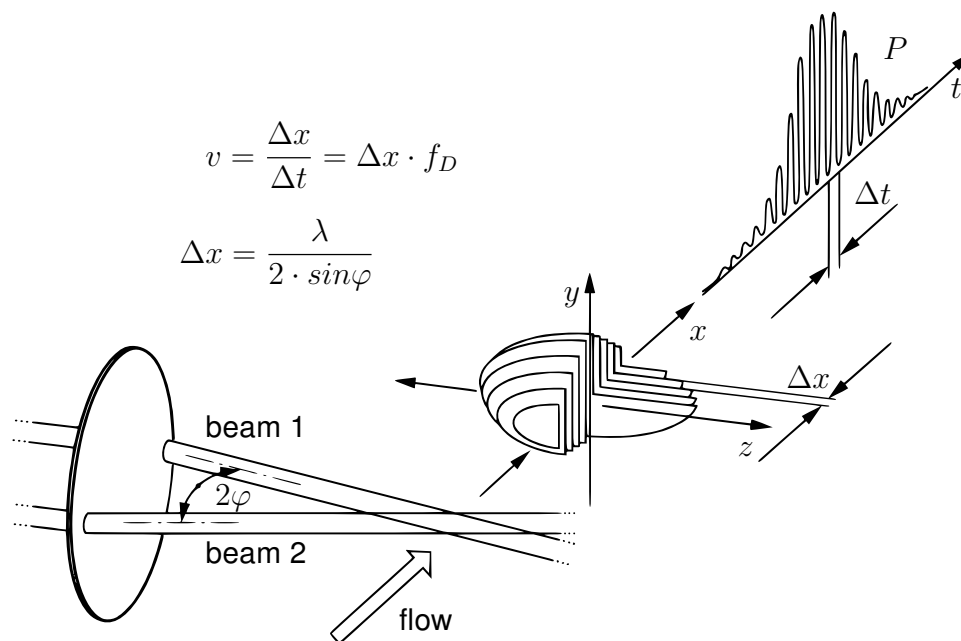


Abbildung 2: Messvolumen

Abbildung 2 veranschaulicht die Signalerzeugung im Kreuzungsbereich. Durch die Kreuzung zweier kohärenter Strahlen kommt es im Kreuzungsbereich zur Ausbildung eines Interferenzstreifensystems. Bewegt sich nun ein Streupartikel durch dieses Streifen-system, nimmt der Detektor eine Modulation wahr. Aus der Frequenz und der Kenntnis des Streifenabstandes sowie der exakten Ausrichtung des Streifen-systems senkrecht zur Strömungsrichtung kann die Geschwindigkeit berechnet werden.

Kohärente Detektion

Technisch besteht die Problematik beim Kreuzstrahl-LDA in der Detektion schwacher Streulichtsignale, welchen das Dunkelstromrauschen des jeweiligen Detektors (meist Photomultiplier oder Avalanche-Photodiode) und das thermische Rauschen des nachfolgenden Verstärkers gegenüberstehen.

Ganz anders sieht es bei Referenzstrahl-LDAs aus: Hier wird das rückgestreute Licht optisch mit dem Lokaloszillatorsignal kohärent gemischt, wodurch, wie nachfolgend mit der Gleichung 11 gezeigt wird, das Signal

optisch vorverstärkt wird und bei passender Auslegung das Dunkelstrom- und Verstärkerrauschen in den Hintergrund treten. Dadurch kann die optoelektrische Signalwandlung mit einer konventionellen PIN-Photodiode realisiert werden.

Betrachtet man die optische Interferenz zweier Signale genauer mit dem E-Feld E_S des Signals und dem E-Feld E_L des Lokaloszillators

$$E_S = \hat{E}_S(t) \cos(\omega_S t + \varphi_S) \quad (5)$$

$$E_L = \hat{E}_L \cos(\omega_L t + \varphi_L), \quad (6)$$

entsteht bei Überlagerung der E-Felder ein Summenfeld

$$E_{ges}(t) = \hat{E}_S(t) \cos(\omega_S t + \varphi_S) + \hat{E}_L \cos(\omega_L t + \varphi_L). \quad (7)$$

Da Fotodioden Leistungsempfänger nach dem formalem Zusammenhang aus der Gleichung 8 sind [Glaser (1997)],

$$i_S = \frac{\eta e}{h f} P = S P = c \frac{E_{ges}^2}{2}, \quad (8)$$

mit η - Wirkungsgrad, e - elementar Ladung, h - Plankkonstante, f - optische Frequenz, P optische Leistung, S - Empfindlichkeit der Diode und c - Konstante, ergibt sich für den Photostrom i_S der Überlagerung der folgende formale Zusammenhang [Glaser (1997)].

$$\begin{aligned} \frac{i_S(t)}{c} &= \overline{E_{ges}^2(t)} \quad (9) \\ &= \frac{E_S^2}{2} + c \frac{E_S^2}{2} \overline{\cos(2\omega_S t + 2\varphi_S)} + \\ &\quad \frac{E_L^2}{2} + c \frac{E_L^2}{2} \overline{\cos(2\omega_L t + 2\varphi_L)} + \\ &\quad \frac{E_S E_L \cos((\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S - \varphi_L)}{2} + \\ &\quad \frac{E_S E_L \cos((\omega_S + \omega_L)t + \varphi_S + \varphi_L)}{2} \quad (10) \end{aligned}$$

Aufgrund des Tiefpassverhaltens von Fotodioden nach [Glaser (1997)], entfallen die Glieder mit $2\omega_S$, $2\omega_L$ und $\omega_S + \omega_L$ und mit $c = 2 \frac{SP}{E^2}$ erhält man:

$$i_S = SP_S(t) + SP_L + 2S \sqrt{P_S(t) P_L} \cos(\omega_D + \Delta\varphi) \quad (11)$$

mit $\omega_D = \omega_S - \omega_L$. Der erste Summand entspricht der Signaldetektion bei reinem Leistungsempfang und kann vernachlässigt werden, der zweite Summand ist eine Gleichlichtkomponente (DC-Anteil) und als starke Quantenrauschquelle störend und im dritten Summanden wird das beim Überlagerungsempfang genutzte Schwebungssignal beschrieben (AC-Anteil). Es kann ebenfalls erkannt werden, dass im AC-Anteil die Amplitude des Stromsignals zum einen proportional zu $\sqrt{P_S(t)}$ ist und zum anderen aber auch zu $\sqrt{P_L}$. Damit kann ein um den Faktor $\frac{4P_L}{P_S}$ größeres Signal detektiert werden als bei einer direkten Leistungsdetektion [Glaser (1997)].

Funktionsprinzip MKRS-LDA

Bei einem MKRS-LDA wird nur ein Laserstrahl in die Strömung gerichtet und in seinem Fokusbereich aus unterschiedlichen Positionen gleichzeitig beobachtet. Sowohl der Sendestrahl (TX) als auch die Empfangsstrahlen (RX) können verstellt werden, um entweder verschiedene Positionen entlang des Sendestrahls zu beobachten oder auch thermisches Driften auszugleichen. Wenn sich nun ein Streupartikel durch den Beobachtungsbereich bewegt, wird ein Teil des Sendelichtes gestreut und Dopplerverschoben. Die Dopplereffektfrequenz ist, wie in der Gleichung (4) beschrieben, abhängig von der Geschwindigkeit, der Bewegungs- und Beobachtungsrichtung und wird von den Empfängern kohärent detektiert. Durch die Kenntnis der Sende- und

Beobachtungsgeometrie, ausgedrückt durch Matrix (M) und der bekannten Wellenlänge (λ_{TX}) des lokalen Oszillators (Lasers), ist es möglich die Bewegungsgeschwindigkeit und -richtung wie in Gleichung (17) zu berechnen.

$$f_{D1} - f_{D2} = \frac{\vec{v}}{\lambda_{TX}} \cdot ((\vec{e}_{RX1} - \vec{e}_{TX}) - (\vec{e}_{RX2} - \vec{e}_{TX})) \quad (12)$$

$$= \frac{\vec{v}}{\lambda_{TX}} \cdot (\vec{e}_{RX1} - \vec{e}_{RX2}) \quad (13)$$

$$f_{D1} + f_{D2} + f_{D3} = \frac{\vec{v}}{\lambda_{TX}} \cdot (\vec{e}_{RX1} + \vec{e}_{RX2} + \vec{e}_{RX3} - 3 \cdot \vec{e}_{TX}) \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} f_{D1} - f_{D2} \\ f_{D1} - f_{D3} \\ f_{D1} + f_{D2} + f_{D3} \end{pmatrix} = \frac{\vec{v}}{\lambda_{TX}} \cdot M \quad (15)$$

$$M = \begin{pmatrix} e_{R1x} - e_{R2x} & e_{R1y} - e_{R2y} & e_{R1z} - e_{R2z} \\ e_{R1x} - e_{R3x} & e_{R1y} - e_{R3y} & e_{R1z} - e_{R3z} \\ e_{R1x} + e_{R2x} + e_{R3x} - 3 \cdot e_{Tx} & e_{R1y} + e_{R2y} + e_{R3y} - 3 \cdot e_{Ty} & e_{R1z} + e_{R2z} + e_{R3z} - 3 \cdot e_{Tz} \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\vec{v} = \lambda_{TX} \cdot M^{-1} \cdot \begin{pmatrix} f_{D1} - f_{D2} \\ f_{D1} - f_{D3} \\ f_{D1} + f_{D2} + f_{D3} \end{pmatrix} \quad (17)$$

Zur Auswertung werden dann nur die Signale zugelassen, welche von allen Empfängern beobachtet wurden und die auf Grund ihrer zeitlichen Zuordnung aus dem zu beobachtenden Bereich stammen.

Geplanter Aufbau

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen den geplanten optischen Aufbau. Der Sendestrahl und alle Empfängerstrahlen sind auf eine feste Entfernung fokussiert. Die angestrebte Beobachtungsposition ist senkrecht über der Sendeoptik bei einer Entfernung von 1,5 m vorgesehen. Auf Grund der geringen Entfernung und der Notwendigkeit, die von den Umgebungsparametern beeinflusste Beobachtungsgeometrie zu kennen, ist es notwendig, die tatsächliche Entfernung des Beobachtungsvolumen zu messen. Dafür wird permanent eine Signallaufzeitmessung durchgeführt. Für diese Messung wird das Sendelicht vollständig amplitudenmoduliert (AM). Durch diese Modulation entstehen im Frequenzbereich zwei Seitenfrequenzen: je eine um die Modulationsfrequenz (f_{mod}) positiv und negativ verschobene Frequenz. Für die Signallaufzeitmessung wird die Phasendifferenz zwischen den beiden Frequenzen ermittelt und gemäß der Gleichung (18) in eine Entfernung umgerechnet.

$$h = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{2 \cdot f_{mod}} \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (18)$$

Da das Sendelicht amplitudenmoduliert wurde, kann bei einer skalaren kohärenten Detektion nicht mehr festgestellt werden, welche der Frequenzen aus dem negativ oder dem positiv verschobenen Frequenzband stammen. Daher muss noch vor der optischen skalaren Mischen eine Signalzerlegung mittels eines optischem 90° Hybriden (IQ - Demodulation) erfolgen. An dem Ausgang dieses Hybriden erhält man vier kohärent gemischte optische Signale, die jeweils um 90° zueinander phasenverschoben sind (0°, 90°, 180°, 270°). Da der optische DC Anteil im 0°- und 180°- sowie im 90°- und 270°- Pfad identisch ist, erhält man bei einer Subtraktion, z.B. mit einem Balanced Photodetector (BPD), den reinen Schwebungsanteil und die beiden Substitutionsergebnisse wären zueinander um 90° phasenverschoben [Garreis (1991)]. Dadurch wird es unter der Voraussetzung, dass beide skalare Kanäle separat aber synchron digitalisiert und anschließend zu einem komplexen Signal zusammen geführt werden (siehe Abbildung 5) möglich, eine eindeutige Frequenzzuordnung zu erhalten.

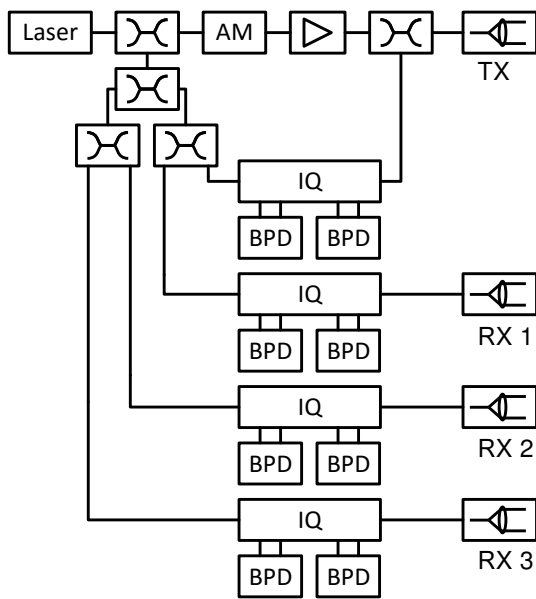


Abbildung 3: Faserschema

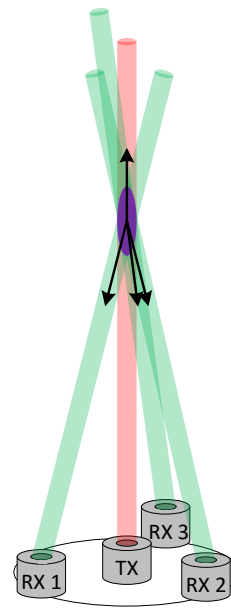


Abbildung 4: Freistrah-Aufbau

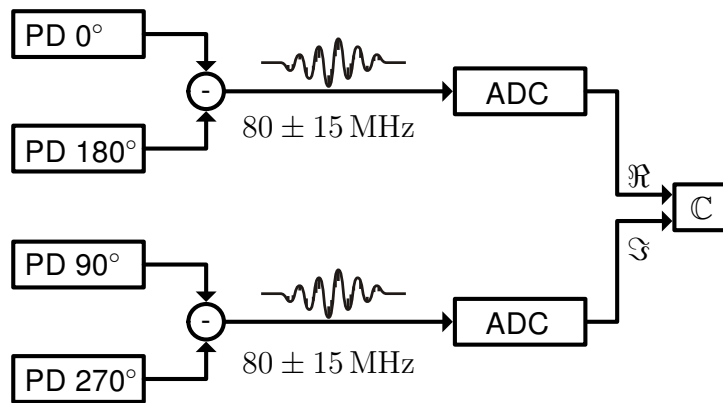


Abbildung 5: Digitalisierung von einzelnen Kanälen

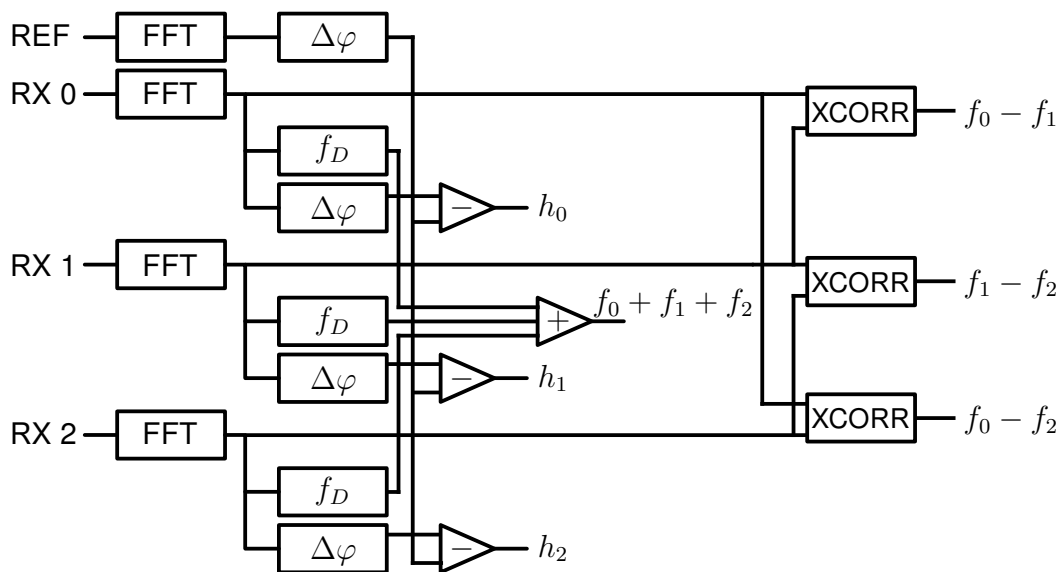


Abbildung 6: Auswertungsschema

Auswertung

Die jeweils vier optischen Signale werden (siehe Abbildung 5) optoelektrisch mittels BPDs gewandelt, digitalisiert und zu einem komplexen Signal zusammengeführt. Anschließend erfolgt die Auswertung nach dem in der Abbildung 6 dargestellten Schema. Von jedem dieser Signale wird eine FFT (Fast Fourier Transformation) berechnet und daraus die Lage sowie die Phasendifferenz des dopplerverschobenen Erregersignals ermittelt. Der Referenzkanal wird für die offset-Korrektur der Phasenmessung verwendet. Die Kreuzkorrelation der FFT-Ergebnisse dient der eindeutigen Bestimmung der Differenzen der Doppler-Frequenzen. Dies soll gerade bei SNR-schwachen Signalen die Fehldetektionrate minimal halten. Anschließend wird der Geschwindigkeitsvektor wie in Gleichung (17) beschrieben rekonstruiert.

Zusammenfassung

Es wurde ein LDA-Konzept vorgestellt, welches mithilfe heterodyner Detektion mit deutlich geringeren Signalleistungen als die konventionellen Kreuzstrahl-LDAs und ebenfalls in Rückstreurichtung arbeiten kann. Dadurch eignet es sich besonders für den Einsatz bei hohen Partikelgeschwindigkeiten, großen Messentfernungen, sowie kleinen Streupartikeln zur Untersuchung hochdynamischer Strömungsprozesse. Aufgrund der Besonderheit, zu jeder Zeit die Messgeometrie zu bestimmen und nachzuregeln, ist das neue Konzept rückführbar, da anders als bei Mehrkomponenten-Konzepten nach dem Doppler-Differenz-Prinzip (Kreuzstrahl LDAs) die genaue Beobachtungsgeometrie im Rahmen der Messunsicherheiten bekannt ist.

Literatur

[Garreis (1991)] Garreis, Reiner B.: 90 degree optical hybrid for coherent receivers. In: *Optical space communication II* (1991)

[Goldstein (1967)] Goldstein R.J., Kreid D.: Measurement of laminar flow development in a square duct using a laser-Doppler flowmeter. In: *ASME J of Appl Mech* 34 (1967)

[Glaser (1997)] Glaser, W.: *Photonik fuer Ingenieure*. 1997