

## **Interferometrische LDA-Messvolumenkalibrierung**

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

Fachbereich Gase, Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland  
Tel: 0531-592-1311, Fax: 0531-592-1305  
e-mail: volker.strunck@ptb.de

### **Einleitung**

Für die Kalibrierung des Streifenabstands von Laser-Doppler-Anemometern (LDAs) stehen mehrere Methoden zur Verfügung. Die Ausmessung des Winkels zwischen den Beleuchtungsstrahlen bei hinreichenden Abständen oder mittels 4-Quadranten-Detektoren ergibt einen Mittelwert für das gesamte Messvolumen. Die Erzeugung einer definierten Geschwindigkeit eines Streuteilchens auf einer rotierenden Scheibe erlaubt sehr genau die Bestimmung des Streifenabstandes des Messvolumens entlang der optischen Achse, sofern das LDA im Rückstreumodus operiert. Die anschließende Benutzung dieses LDAs in geschlossenen Behältnissen mit optischem Zugang kann diese Kalibrierungen jedoch zunichte machen, wenn z. B. durch Fenster die Wellenfronten der Strahlen gestört werden. Die Einbringung rotierender Körper an den Messort ist oft aus Platzgründen nicht machbar. Deshalb wird im folgenden ein Streuteilchen zunächst in Form eines Platindrahtes benutzt, der, an einer Halterung angebracht, eine Linearbewegung vollzieht. Hinsichtlich der Aufstellung eines LDA-Empfangsdetektors gibt es hier keine Einschränkungen bezüglich der Vorwärts- oder Rückwärtsstreuung. Die Kalibrierung kann darüber hinaus in engen Kanälen durchgeführt werden. Die Bewegung der Drahthalterung wird von einem Michelson-Interferometer aufgezeichnet.

### **Theorie**

Um eine Kalibrierung an schlecht zugänglichen Messorten zu ermöglichen, wird ein 5  $\mu\text{m}$  Platindraht, der auf einer Seite des Eisenkerns eines Miniaturhubrelais angebracht ist, durch das Messvolumen bewegt (Bild 1). An der anderen Seite des Kerns befindet sich ein Spiegel, dessen Bewegung interferometrisch gemessen wird. Um eine Rückbewegung ohne den Einsatz von Federn zu ermöglichen, wurde ein zweites Hubrelais genutzt, das die Sonde wieder zurückzieht. Die Sondenhalterung, beide Eisenkerne der Hubrelais und der Spiegel sind starr miteinander verbunden, damit der Spiegel die Bewegung des Drahtes wiedergibt.

## 2.2

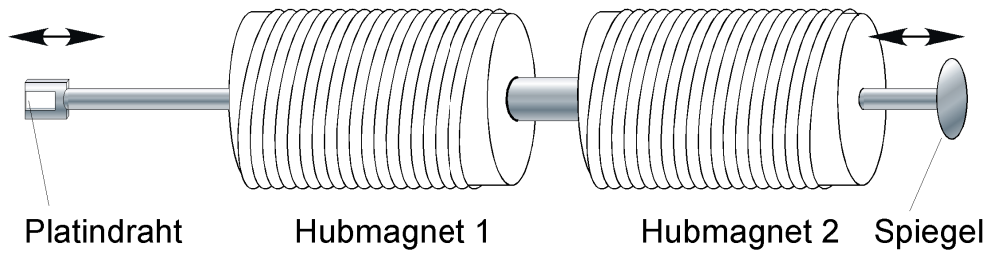


Bild 1: Aufbau der Sonde mit Linearbewegung

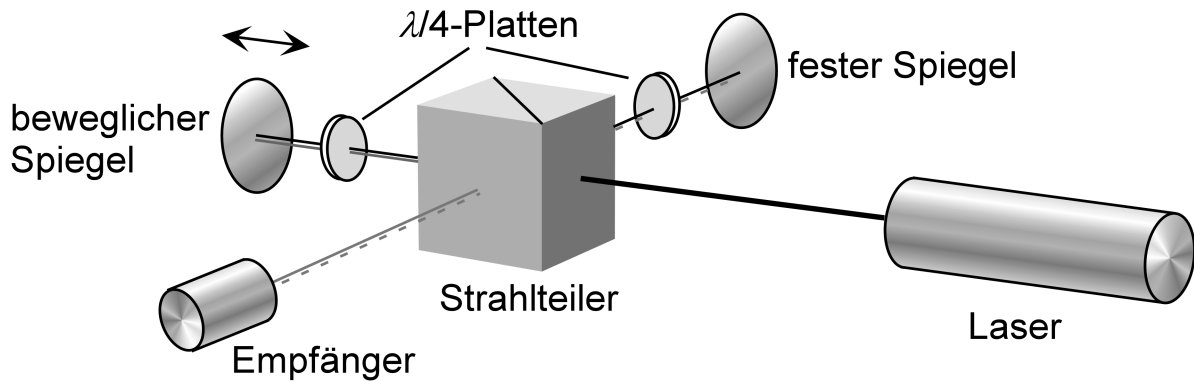


Bild 2: Michelson-Interferometer zur Messung der Spiegelbewegung

Für die Erfassung des momentanen Orts des Spiegels in Bild 1 wurde ein Michelson-Interferometer benutzt (siehe Bild 2). Ein Michelson-Interferometer [1] erfordert einen Laser mit einer Kohärenzlänge, die größer ist als die im Aufbau vorkommenden Weglängendifferenzen. Der Laserstrahl mit der Wellenlänge  $\lambda_1$  trifft auf den kubischen Strahlteiler und spaltet sich in zwei Teilstrahlen auf, welche vom fixierten Spiegel sowie vom auf dem Hubrelaiskern angebrachten Spiegel reflektiert werden. Wegen der zwischen dem Strahlteiler und den Spiegeln angebrachten  $\lambda/4$ -Platten werden die Polarisations Ebenen der Strahlen nach zweimaligem Durchlaufen um  $90^\circ$  gedreht, so dass beim wiederholten Eintritt der Strahlen in den polarisationsempfindlichen Strahlteiler der vom bewegten Spiegel kommende Strahl im Strahlteiler nunmehr reflektiert wird bzw. der vom fixierten Spiegel kommende Strahl den Strahlteiler gerade durchläuft. Beide Teilstrahlen überlagern sich auf dem Empfänger und erzeugen ein intensitätsmoduliertes sinusförmiges Signal, dessen Frequenz  $f_1$  proportional zur Geschwindigkeit  $v_1$  des bewegten Spiegels ist:

$$f_1 = v_1 / (\lambda_1 / 2)$$

Die gleichzeitige Messung der Geschwindigkeit  $v_{\text{LDA}}$  des von den Hubrelais bewegten Platindrahtes mit einem LDA ergibt ein LDA-Signal der Frequenz  $f_{\text{LDA}}$ . Das Verhältnis der LDA-Frequenz  $f_{\text{LDA}}$  und der Interferometerfrequenz  $f_{\text{I}}$  ermöglicht die Ermittlung des örtlichen LDA-Streifenabstandes  $d$ :

$$d = v_{\text{I}} / f_{\text{LDA}} = (\lambda_{\text{I}} / 2) f_{\text{I}} / f_{\text{LDA}}, \text{ wenn } v_{\text{LDA}} = v_{\text{I}}$$

Weil die Interferometerfrequenz  $f_{\text{I}}$  die Frequenz des LDA-Signals  $f_{\text{LDA}}$  um etwa eine Größenordnung übertrifft, sollte der Unsicherheitsbeitrag durch das Interferometer bei der Kalibrierung vernachlässigbar sein.

Da die Bewegung des Drahtes beschleunigt ist, wurde die Quadraturanalyse sowohl für das Interferometer- als auch für das LDA-Signal gewählt [2]. Da keine echten Quadratur-signale zur Verfügung standen, wurde die Hilbert-Transformation genutzt, um solche zu erzeugen. Die durch die Quadraturauswertung erhaltene Phase  $\varphi_{\text{LDA}}$  lokalisiert den Ort des Platindrahtes im Messvolumen und die Phase  $\varphi_{\text{I}}$  entspricht dem momentanen Ort des Spiegels. Die Abbildung zeigt die erhaltenen Signale des „fliegenden“ Drahtes:

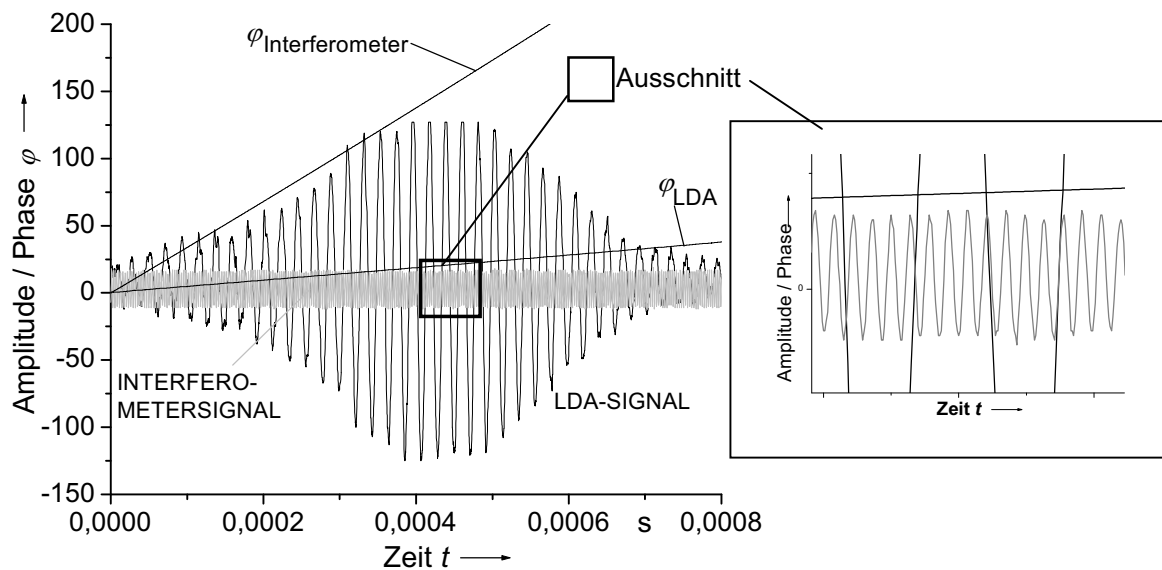


Bild 3: Zeitgleiche Signale vom Michelson-Interferometer und LDA

Die Ableitungen der Phasen nach der Zeit ergeben wiederum die Geschwindigkeiten:

$$v_{\text{LDA}} = \dot{\varphi}_{\text{LDA}} d / (2\pi) \text{ und } v_{\text{I}} = \dot{\varphi}_{\text{I}} \lambda / (4\pi)$$

Dann ist der lokale LDA-Streifenabstand  $d$

$$d = (\dot{\varphi}_{\text{I}} / \dot{\varphi}_{\text{LDA}}) \cdot (\lambda / 2).$$

## 2.4

### Versuchsaufbau

Das Modul für die Linearbewegung (Bild 4) besteht aus zwei auf einer Platte angeschraubten Hubrelais, deren Hubstangen auf einer Seite ein Gewinde haben, so dass sie aneinandergeschraubt werden konnten. Dazwischen wurde eine Lötöse mit zwei Laschen angebracht. Diese wurden verdreht und gleiten auf zwei Plastikblöcken, um eine Drehung der Sonde zu verhindern. Für die Sonde wurde ein auf der Hubstange angeklebter Transistor benutzt, zwischen dessen zwei Beinen der Platindraht mittels Siegelack befestigt wurde. Auf der zweiten Hubstange wurde der Spiegel, dessen Bewegung untersucht werden sollte, angebracht.

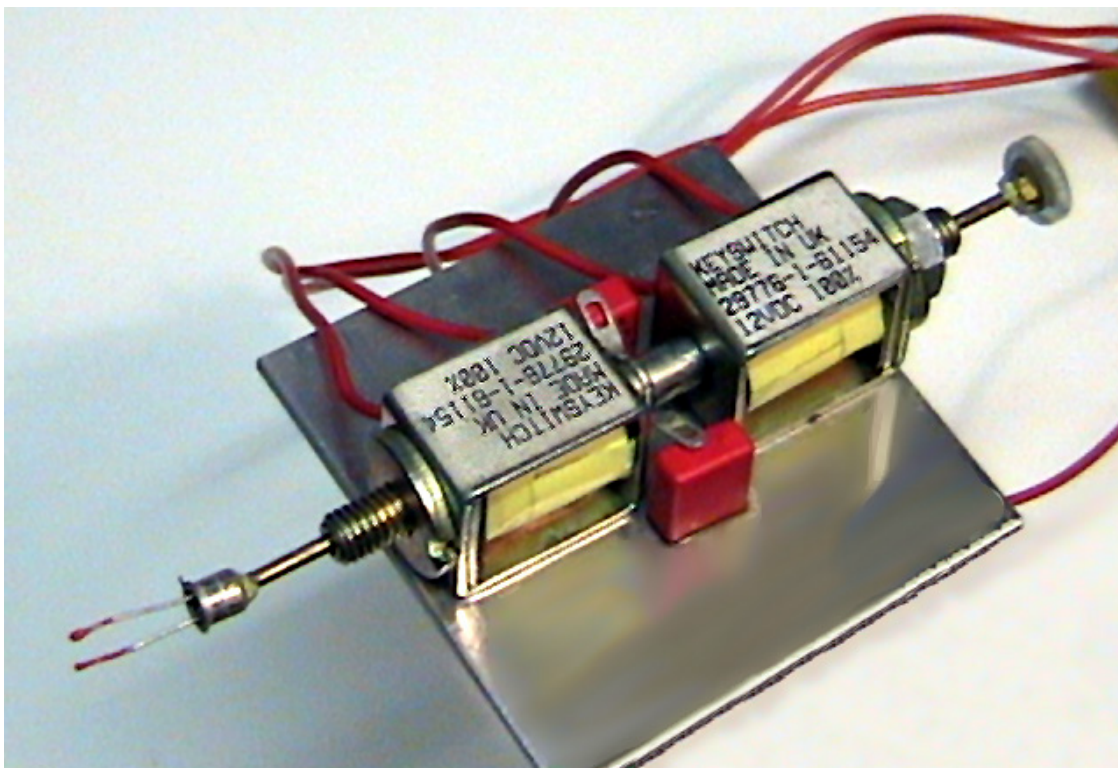


Bild 4: Sonde mit Hubmagneten und Spiegel

Dieser Versuchsaufbau sollte der Untersuchung dienen, ob diese Vorgehensweise prinzipiell möglich ist. Es zeigt sich jedoch, dass die Reproduzierbarkeit der Einzelmessungen nicht zufriedenstellend ist. Dies liegt zum einen an dem Spiel der Hubstangen von etwa 1 mm in der Führung der Hubrelais, zum andern an der Ausrichtung der Relais zueinander, die zu Verkantungen führte und die Funktion störte. Hinzu kommt die schlechte Führung des Gleitlagers mittels Lötösen auf den Plastikklötzen. Insgesamt ist die ungleichmäßige Reibung im Betrieb der Hauptstörfaktor, der zu nicht reproduzierbaren Wegen des Platindrahtes durch das Messvolumen führt.

## Messungen zur Reproduzierbarkeit

Bei der Auswertung der LDA-Signale wurde nur der Teil des LDA-Signals genutzt, dessen Amplitude größer als das halbe Maximum des LDA-Signals war. Aus dem Verlauf der Phasen von Interferometer und LDA (Bild 3) in diesem Bereich wurde mittels linearer Regression deren Steigung (Geschwindigkeit) bestimmt und ihr Verhältnis in Bild 5 aufgetragen.

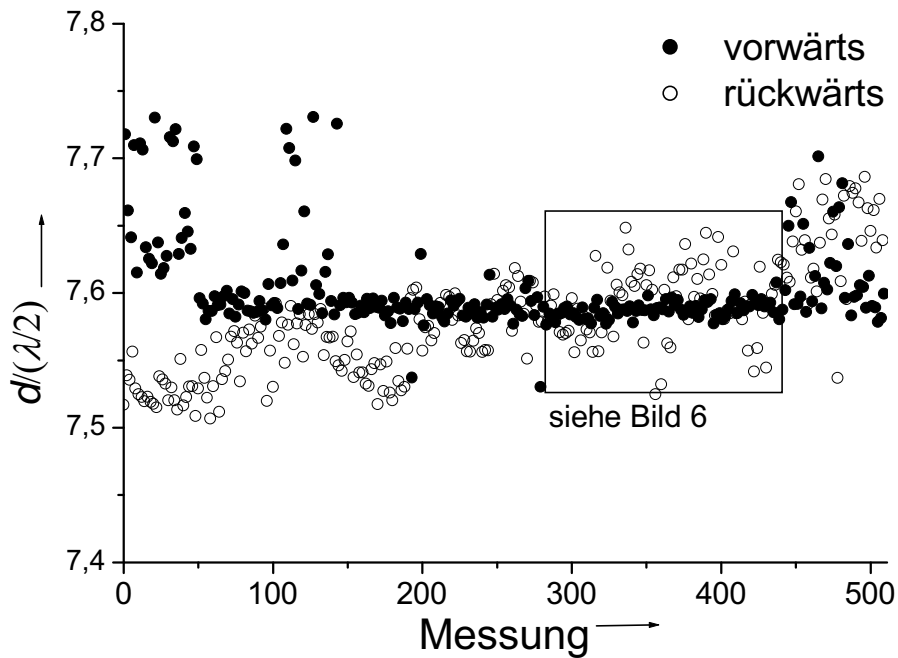


Bild 5: Daten  $(\dot{\phi}_I / \dot{\phi}_{LDA}) = d/(\lambda/2)$  der Vor- und Rückwärtsbewegung der Sonde

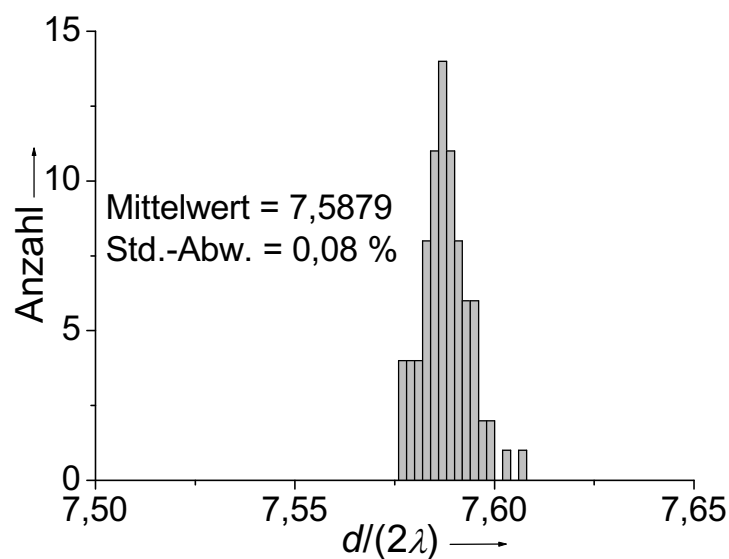


Bild 6: Histogramm der Vorwärtsbewegung (Ausschnitt von Bild 5)

## 2.6

Die Auftragung der Rohdaten in Bild 5 zeigt, dass die Linearbewegung sehr unregelmäßig war. Dies gilt vor allem für die Rückwärtsbewegung des Platindrahtes mit einer Geschwindigkeit von nur 0,2 m/s. Bei der höheren Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung von 0,5 m/s erfolgte die Linearbewegung geradliniger und zeigte kleinere Abweichungen. Bei der Datenrate von einer Messung in zwei Sekunden war die Vorwärtsbewegung des Platindrahtes für eine kurze Zeit von zwei Minuten sogar sehr konstant (siehe Kästchen in Bild 5). Das Histogramm in Bild 6 für diesen Abschnitt zeigt eine Standardabweichung von nur 0,08%.

Eine strenge Filterung der Daten bezüglich des SNRs, der Signale und der Regressionskoeffizienten bei der Ermittlung der Geschwindigkeiten würde einige der streuenden Messpunkte in Bild 5 herausnehmen. Die Hauptursache für die Abweichungen jedoch sind in der unregelmäßige Reibung, im Spiel der Eisenkerne in den Hubrelais und in Schwingungen der Platindrahthalterung zu finden.

### **Zusammenfassung**

Erste Versuche einer Kalibriersonde mit Linearbewegung zeigen die prinzipielle Möglichkeit, den Streifenabstand von LDAs zu vermessen. Der mechanische Aufbau muss sehr präzise realisiert werden, um eine sehr genaue Linearbewegung zu erreichen. Anstelle von zwei Hubrelais sollte nur ein Magnetschalter benutzt werden. Erste Ergebnisse sprechen bei einen verbesserten mechanischen Aufbau für ein erfolgreiches Messprinzip, das dort Anwendung findet, wo der Zugang für andere Kalibrierverfahren versperrt ist.

### **Literatur**

[1] Hecht, E. (1992): „Optik“, Addison-Wesley, Bonn

[2] Strunck, V.; H. Müller, H.; D. Dopheide, D. (1996): „Time Domain Single Tone Analysis using Quadrature Algorithm“, Eighth International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 08.-11. July 1996 Lisbon Portugal, paper 6.6.1.-6.6.4.