# LDA-MESSVOLUMENKALIBRIERUNG MIT EINEM LINEARANTRIEB

# V. Strunck, H. Müller, D. Dopheide

Physikalisch-Technische Bundesanstalt Fachbereich Gase Bundesallee 100, 38116 Braunschweig Tel.: 0531-592-1311, Fax: 0531-592-1405 e-mail: volker.strunck@ptb.de

# Abstract

Es wird ein alternatives Kalibrierverfahren vorgestellt, das Laser-Doppler-Anemometer mit einem linear bewegten Platindraht vermisst. Die Bewegung des Drahtes wird interferometrisch aufgezeichnet.

## Einleitung

Die kompakte Bauweise der Kalibriervorrichtung erlaubt die Vermessung von Laser-Doppler-Anemometern (LDA) an Messorten, zu denen der Zugang für andere Kalibrierverfahren versperrt ist. Eine Einschränkung auf die Rückwärtsstreurichtung wie bei der Kalibrierung mit einer rotierenden Scheibe ist nicht gegeben. Die Messung des Streifenabstandes des LDAs geschieht durch Streifenzählung des LDA-Signals und gleichzeitige Weglängenmessung der Sonde mit einem Michelson-Interferometer. Die Ergebnisse werden mit denen verglichen, die durch ein Streuteilchen auf dem Rand einer mit definierter Geschwindigkeit rotierenden Scheibe erhalten wurden.

## Theorie

Auf dem Linearantrieb ist ein 8 cm langer Aluminiumstab angebracht, dessen eine Seite als Halterung eines 5 µm dicken Platindrahts dient, der durch das Messvolumen bewegt wird (siehe Abbildung 1). An der anderen Seite des Stabs befindet sich ein Spiegel, dessen Bewegung interferometrisch aufgezeichnet wird. Die Sondenhalterung und der Spiegel sind starr verbunden, damit der Spiegel die Bewegung des Drahtes wiedergibt.

Für die Erfassung des momentanen Orts des Spiegels wurde ein Michelson-Interferometer (siehe Hecht 1992) wie in Abbildung 2 benutzt.



Abb. 1: Aufbau der Sonde mit Spiegel



Abb. 2: Michelson-Interferometer zur Messung der Spiegelbewegung

Der kubische Strahlteiler erzeugt zwei Teilstrahlen, wobei der Messstrahl von dem auf der Sonde angebrachten Spiegel reflektiert wird, um anschließend mit dem Referenzstrahl am Empfänger überlagert zu werden. Dort erzeugen sie bei der Geschwindigkeit *v* der Sonde ein intensitätsmoduliertes sinusförmiges Signal. Eine Periode  $T_{\rm I}$  des Signals entspricht einer Weglängenänderung von  $\lambda_{\rm I}/2$ , da der Weg zum und vom Spiegel zurück vom Laserlicht zweifach durchlaufen wird. Die gleichzeitige Messung des ebenfalls mit der Sondengeschwindigkeit *v* bewegten Platindrahtes mit dem LDA ergibt ein Signal mit der Periode  $T_{\rm LDA}$ , die einer Weglängenänderung des Streifenabstands *d* entspricht. Das Verhältnis der LDA-Periode  $T_{\rm LDA}$  mit der Interferometerperiode  $T_{\rm I}$  ermöglicht die Ermittlung des örtlichen LDA-Streifenabstandes *d*:

$$d = (\lambda_{\rm I}/2) \frac{T_{\rm LDA}}{T_{\rm I}}$$

Das LDA-Signal und Interferometersignal werden über eine Vielzahl von LDA-Perioden ( $\approx 20$ ) während der Gesamtmesszeit *T* gemittelt:

$$d = \frac{\lambda_{\rm I}}{2} \cdot \frac{T_{\rm LDA}}{T} \cdot \frac{T}{T_{\rm I}}$$

Da die Bewegung des Drahtes beschleunigt ist, wurde die Quadratursignalanalyse sowohl für das Interferometer- als auch für das LDA-Signal gewählt (siehe Strunck, Müller und Dopheide 1996). Weil keine echten Quadratursignale zur Verfügung standen, wurde die Hilbert-Transformation genutzt, um solche zu erzeugen. Die durch die Quadraturauswertung erhaltene Phase  $\varphi_{LDA}$  lokalisiert den Ort des Platindrahtes im Messvolumen und die Phase  $\varphi_{I}$  entspricht dem momentanen Ort des Spiegels. Abbildung 3 zeigt die erhaltenen Signale des bewegten Drahtes. Die Messzeit *T* wird als die Zeit gewählt, in der die Amplitude größer als die Hälfte des maximalen LDA-Pegels ist und beginnt bei  $t_S$  und endet bei  $t_E$ . Die Phasen zu diesen Zeitpunkten werden durch eine lineare Regression in deren unmittelbarer Umgebung (9 Phasenmesspunkte) interpoliert.

Der über mehrere LDA- und Interferometerperioden ermittelte LDA-Streifenabstand *d* ist dann

$$d = \lambda_{\rm I} / 2 \cdot \frac{\varphi_{\rm I}(t_{\rm S}) - \varphi_{\rm I}(t_{\rm E})}{\varphi_{\rm LDA}(t_{\rm S}) - \varphi_{\rm LDA}(t_{\rm E})} \quad \text{mit} \quad \frac{\varphi(t_{\rm S}) - \varphi(t_{\rm E})}{2\pi} = \frac{T}{T_{\rm Periode}}.$$



Abb. 3: Zeitgleiche Signale vom Michelson-Interferometer und LDA

# Versuchsaufbau

Der Linearantrieb (Hartramph und Schinköthe 1998) besteht aus einem bewegten Magneten, der kugelgelagert zwischen zwei ortsfesten Spulen angeordnet ist (Abbildung 4).



Abb. 4: Platindraht und Linearantrieb mit Sondenhalterung für den Platindraht

Die Vor- und Rückbewegung von etwa 6 mm wird durch Stromrichtungsumkehr in den Spulen erreicht. Auf dem beweglichen Läufer ist die Sonde mit Platindraht und Spiegel fixiert. Der Antrieb führt zwischen dem Vorwärts- und Rückwärtsbetrieb eine geringe Nickbewegung aus, die etwa 20 µm auf der Sondenlänge von 8 cm und eine Gierbewegung von einem Viertel dessen beträgt. Diese geringen Richtungsänderungen erzeugen bei dem unjustierten LDA bereits eine Differenz von 0,1 % in der Streifenabstandsbestimmung. Als unvorteilhaft erwies sich auch die Anbringung des He-Ne-Lasers an dem Interferometerkopf. Durch die Erwärmung der Laserröhre zeigten sich im Langzeitbetrieb Richtungsänderungen des Laserstrahls. Auch die fluchtende Ausrichtung der Strahlen auf dem Detektor bei diesem Aufbau erwies sich als schwierig. Eine weitere Fehlerquelle stellt der Platindraht dar.

Folgende Probleme zeigten sich verstärkt durch das verstimmte LDA:

- Richtung des Laserstrahls (Einkopplung, Langzeitstabilität)
- Richtung der Verschiebebewegung (Antrieb)
- Richtung der Wellenfronten zwischen Mess- und Referenzstrahl
- Platinfaden als Streukörper

## Messungen zur Reproduzierbarkeit



Abb. 5: Änderung des Periodenverhältnisses während 1½ Stunden Messzeit

Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Einzelmessungen während 1½ Stunden. Vier mal 4000 Messwerte wurden bei einer Erfassungsrate von 1 Hz registriert. Die Standardabweichung vom Mittelwert beträgt für kurze Messzeiten (10 min) etwa 0,05 %. Während der Langzeitmessung veränderte sich jedoch der Mittelwert um 0,1 % aufgrund der Erwärmung des Lasers. Um die Empfindlichkeit des Interferometeraufbaus gegenüber mechanischen Verstimmungen zu überprüfen, wurde während der Messung zum Einen der Referenzarm verstimmt und zum Anderen der Laser mit einem Gewicht belastet (Abbildung 6). Eine Richtungsänderung des Referenzstrahls bleibt fast ohne Auswirkungen auf das Messergebnis. Dagegen reagiert der Messstrahl empfindlich auf kleine Verkippungen (0,1 %), was sich hier in in unterschiedlichen Periodenverhältnissen zwischen Vor- und Rückbewegung äußert.



Abb. 6: Richtungsänderungen am Messstrahl und am Referenzstrahl

Die Aufspaltung wird durch die Nickbewegung des Antriebs verstärkt. Wird ein gleiches Periodenverhältnis für beide Bewegungsrichtungen wie zu Beginn eingestellt, so ist die Abweichung vom wahren Streifenabstand gleich groß.

#### Vergleichsmessungen mit Scheibe und Sonde

Der Vergleich von Scheibe und Sonde (Abbildung 7) zeigt eine Übereinstimmung beider Methoden (< 0,5 %) in der Mitte des Messvolumens. Die Unterschiede zwischen Vor- und Rückbewegung sind jedoch zu groß, um allein durch Interferometereffekte erklärt zu werden. Daher wurde das Messvolumen senkrecht zur optischen Achse in *z*-Richtung untersucht.



Abb. 7: Vergleichsmessung mit rotierender Scheibe und Sonde entlang der Messvolumenachse *x* (optische Achse des LDAs)



Abb. 8: Scheibenmessung (mit Streupartikel) senkrecht zur optischen Achse

Das unjustierte LDA wies nicht nur eine Streifenabstandsänderung in Richtung der optischen Achse auf, sondern auch in der Vertikalen (0,5 %), siehe Abbildung 8. Da der Platindraht nicht glatt, sondern strukturiert zu sein schien und zudem durch die Luftreibung gekrümmt wird, wirkt er ortsselektiv innerhalb des Messvolumens.

#### Zusammenfassung

Die Versuche mit einer Kalibriersonde mit Linearbewegung zeigten die guten Laufeigenschaften des Antriebs, eine gute Reproduzierbarkeit und Übereinstimmung bei der Vermessung des Streifenabstandes eines LDAs. Während die Messabweichungen des Interferometers noch verbessert werden können, birgt bei schlecht justierten LDAs die Nutzung eines Platindrahts als Streukörper einige Probleme (wie auch Streuteilchen auf einer rotierenden Scheibe). Der kompakte Aufbau der Sonde erlaubt Messungen in engen Kanälen, in denen rotierende Scheiben keinen ausreichenden Platz finden.

#### Literatur

Hecht, E. (1992): "Optik", Addison-Wesley, Bonn

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.

Hartramph, R.; Schinköthe, W. (1998): "Elektrodynamische Lineardirektantriebe mit integriertem Wegmeßsystem", Kongress Wirtschaft trifft Wissenschaft, Stuttgart, 8. – 9. Dezember 1998