

## LINIENSOR MIT SKALIERBARER MESSVOLUMENLÄNGE

### Line sensor with scalable measuring volume length

**Stefan Oertel, Volker Strunck**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)  
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany

Referenzstrahl-Streustrahl-LDA, Ortsauflösung mittels Phasendifferenzmethode  
Reference scatter LDA, spatial resolution using phase difference method

### Zusammenfassung

Linien Sensoren eignen sich für die Messung von Strömungsprofilen mit geringer räumlicher Ausdehnung und steilen Geschwindigkeitsgradienten, wie sie in Scherschichten oder in Grenzschichten auftreten. Profilmessungen an Strömungen mit großer räumlicher Ausdehnung, wie z. B. in Rohren, erfordern das Versetzen des Messvolumens, da die Messvolumenlänge von Linien Sensoren i. A. nicht lang genug ist, um das gesamte Strömungsprofil erfassen zu können. Große Strömungsprofile können daher nur abschnittsweise mit Hilfe von Verschiebeeinheiten gemessen werden.

Das Referenzstrahl-Streustrahlverfahren (Strunck 1993), basierend auf einem Kreuzstrahl-LDA, erlaubt dagegen die Größe des Messvolumens je nach Bedarf – in gewissen Grenzen – zu skalieren. Dieses wird erreicht, indem der Winkel des Akzeptanz- (Kohärenz-) Kegels mittels einer Optik wie z.B. einem Strahlaufweiter, Weitwinkel- oder Teleobjektiv verändert wird, so dass kleinere Messvolumina für Grenzschichten bzw. größere für z.B. Rohrströmungen im Vergleich zum unveränderten Messvolumen genutzt werden können.

### Einleitung

Das Messvolumen eines Laser Doppler Anemometers (LDA) ist durch die Größe des Bereiches der sich kreuzenden Laserstrahlen gegeben. Für Scher- und Grenzschichten ist dieses Messvolumen oft zu groß. Mittels diverser Techniken kann die Position der Streupartikel auch innerhalb des Messvolumens ermittelt werden, siehe Strunck 1993, Borys 2000, Czarske 2002, Strunck 2002. Eine davon ist das hier verwendete Referenzstrahl-Streustrahlverfahren (RS-LDA). Durch zusätzliche Selektion des vom Detektor erfassten Bereiches des Messvolumens mittels Linsen bzw. Linsenanordnungen kann die Messvolumengröße der Messsituation angepasst werden.

## Theorie

Während beim Standard-LDA (STD-LDA) das Messvolumen durch die sich kreuzenden Laserstrahlen definiert wird, befindet sich beim RS-LDA das Messvolumen innerhalb des Beleuchtungsstrahls B (s. Abb. 1). Der Empfänger E wird bei letzterem Verfahren in den zweiten Strahl, d.h. den Referenzstrahl platziert. Die Orientierung des Streifensystems und der Streifenabstand ist in der Messvolumenmitte identisch zu dem des STD-LDA. Die effektive Messvolumenlänge ist im Wesentlichen gegeben durch die Apertur des Detektors und seines Abstands zum Kreuzungspunkt.

Typischerweise wird der Messvolumenrand bei einem STD-LDA durch die Abnahme des Produktes der Feldstärken beider Laserstrahlen auf den Wert  $1/e^2$  beschrieben. Bei einem RS-LDA bleibt die Feldstärke des Referenzstrahls jedoch konstant und es gilt annähernd:

$$\frac{l_{RS}}{l_{STD}} = \frac{8 e^2 f}{D} \tan(\varepsilon/2)$$

Mit einer Fokusslänge  $f = 500$  mm, einem Strahldurchmesser  $D$  an der Linse von 5 mm und einem Schnittwinkel  $\varepsilon$  der Laserstrahlen von  $5^\circ$  ist die Messvolumenlänge  $l_{RS}$  des RS-LDAs um drei Größenordnungen länger als die des Standard-LDAs für einen Detektor mit sehr kleiner Apertur, siehe Buschmann 2003.

Analog zum Interferenzfeld im Kreuzungsvolumen bildet sich auch auf der Detektorfläche ein Interferenzfeld aus Streulicht und Referenzstrahl-Licht aus. Der Modulationsgrad des über die Detektorfläche integrierten Laser-Doppler-Signals ist abhängig von dem Abstand der Interferenzstreifen dieses Interferenzfeldes und nimmt mit kleiner werdendem Interferenzstreifenabstand ab. Der Bereich konstruktiver Interferenz wird nach Drain 1980 Kohärenzkegel genannt. Der Öffnungswinkel dieses Kegels ist

$$\alpha_c = \sin^{-1}(\lambda/2b)$$

bei der Wellenlänge  $\lambda$  und dem Durchmesser  $b$  der Apertur des Detektors. Damit wird die Messvolumenlänge  $l_{RS}$ :

$$l_{RS} \leq \frac{r \sin \alpha_c}{\sin(\varepsilon + \alpha_c)}$$

bei einem Abstand  $r$  des Detektors zum Kreuzungspunkt, siehe Borys 1998.

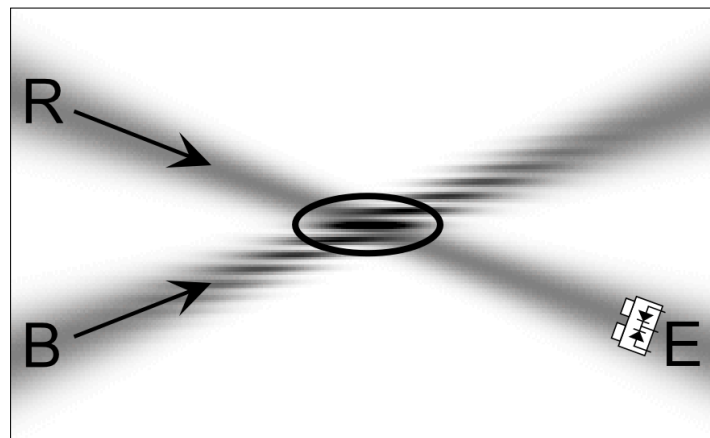


Abb. 1: RS-LDA-Messvolumen und Standard-LDA-Messvolumen (eingekreist)

Für die Bestimmung des Ortes  $z$  innerhalb des Messvolumens (entlang des Beleuchtungsstrahls) wurde eine Duo-Pindiode (mit einem Diodenabstand  $x_E$ ) benutzt, die die dazu notwendige Phasendifferenz  $\Delta\Phi$  nach Auswertung der Signalaare bereitstellt:

$$z = \frac{\lambda r}{2\pi x_E \sin \varepsilon} \Delta\Phi$$

Neben der Limitierung des Messvolumens auf den Bereich konstruktiver Interferenz, d.h. auf den Kohärenzkegel, ist das Messvolumen zusätzlich beschränkt auf den Bereich, innerhalb dem eine eindeutige Zuordnung des Ortes zur Phasendifferenz möglich ist. Für die Phasendifferenzmethode erhält man eine Phaseneindeutigkeit, d.h.  $(-\pi \leq \Delta\Phi \leq \pi)$ , innerhalb der Messvolumenlänge

$$l_{2\pi} = \frac{\lambda r}{x_E \sin \varepsilon}$$

Bei einem bestehenden LDA-System und vorgegebenem Photodetektor ( $x_E$  fest) kann nur über den Abstand  $r$  des Detektors zum Kreuzungspunkt Einfluss auf die Messvolumenlänge  $l_{2\pi}$  genommen werden. In der praktischen Anwendung unterliegt der Zugang zum Messort allerdings häufig technischen Einschränkungen bezüglich der Positionierung des Detektors. Zusätzlich nimmt die Streulichtintensität quadratisch mit dem Abstand ab, so dass für eine ausreichend hohe Signalstärke der Detektor nicht beliebig weit vom Kreuzungsort entfernt positioniert werden kann.

Im Folgenden wird am Beispiel einer kurzbrennweitigen Linse (mit  $f = 30$  mm) gezeigt, dass mittels optischer Abbildung auf den effektiven Empfängerabstand  $x_E$  Einfluss genommen werden kann. Die Geschwindigkeitsinformation der Dopplersignale bleibt davon unangetastet, da der Streuprozess, d.h. die Dopplerverschiebung, nicht von der Abbildung geändert wird. Eine Linse (z.B.  $f = 30$  mm) im Abstand  $d$  vom Kreuzungspunkt zwischen Messvolumen und Detektor ändert den Winkel  $\alpha$  (siehe Borys 2000) – unter dem der Referenz- und der Streustrahl auf den Detektor treffen – in paraxialer Näherung zu:

$$\alpha(z) = \frac{z \sin \varepsilon}{r - \frac{d(r-d)}{f}}$$

Hieraus resultiert eine Skalierung der Messvolumenlänge  $l_{2\pi}$ , die neben der Brennweite der Linse zusätzlich von der Positionierung  $d$  der Linse zwischen Kreuzungspunkt und Detektor abhängt.

$$l_{2\pi; \text{Linse}} = \frac{\lambda \left( r - \frac{d(r-d)}{f} \right)}{x_E \sin \varepsilon}$$

Abb. 2 zeigt einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Messvolumenlängen, bei dem der Ort  $d$  der Linse variiert wurde ( $r = 550$  mm,  $x_E = 625$   $\mu\text{m}$ ). Zusätzlich wurde durch die Verwendung einer Linse mit  $f = 10$  mm im Abstand von  $d = 275$  mm ein Messvolumen von  $l_{2\pi} = 100$  mm realisiert.

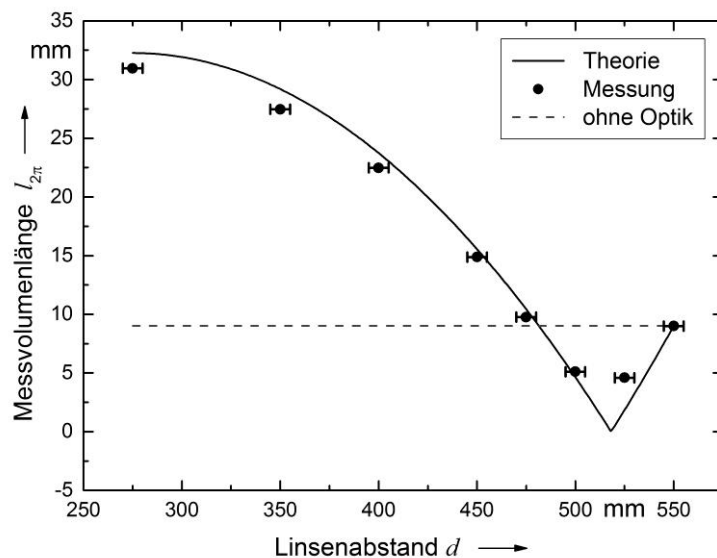


Abb. 2: Berechnete (Linie) und gemessene (Punkte) von Messvolumenlängen  $l_{2\pi}$  in Abhängigkeit vom Linsenabstand  $d$  zum Kreuzungspunkt (Brennweite der Linse  $f = 30$  mm, Detektorabstand  $r = 550$  mm). Zum Vergleich: Gemessener Wert ohne optische Abbildung, der bei  $d = 550$  mm eingetragene Messpunkt und die gestrichelte Linie (berechnet).

### Strömungsprofilmessung mit unterschiedlicher Messvolumenlänge

Beispielmessungen, bei denen die Messvolumenlänge mittels optischer Abbildung variiert wurde, sind in den Abb. 3 und 4 dargestellt. Der Detektor (Diodenabstand  $x_E = 625 \mu\text{m}$ , Diodenapertur  $b = 600 \mu\text{m}$ ) war jeweils im Abstand  $r = 585$  mm positioniert. Unskaliert beträgt die Messvolumenlänge bei diesem Abstand  $l_{2\pi} = 10$  mm. Anstelle einer Linse wurde für die Variation der Messvolumenlänge ein Teleskop, bestehend aus einer Zerstreuungslinse mit  $f = -10$  mm und einer Sammellinse mit  $f = 100$  mm im Abstand von 90 mm, verwendet. Bei der Aufweitung des Messvolumens, die in Abb. 3 anhand von Rohrströmungsprofilen – aufgenommen in Abhängigkeit von verschiedenen Reynoldszahlen – demonstriert wird, war das Teleskop mit der Zerstreuungslinse (Abstand  $d = 475$  mm zum Kreuzungspunkt) in Richtung Messvolumen orientiert. Hieraus ergab sich eine Messvolumenlänge von  $l_{2\pi; \text{Tel.}} = 85$  mm.

Durch das Umdrehen des Teleskops (Zerstreuungslinse unmittelbar vor dem Detektor) wurde das Messvolumen auf  $l_{2\pi; \text{Tel-inv.}} = 5$  mm verkleinert und es konnte eine Düsenströmung (Durchmesser: 2,6 mm) mit hoher Auflösung gemessen werden (s. Abb. 4). Eine vergleichbare Messung wird mit einer Sammellinse ( $f = 30$  mm) als abbildende Optik erreicht, wobei der Brennpunkt der Linse nahe am Detektor positioniert war.

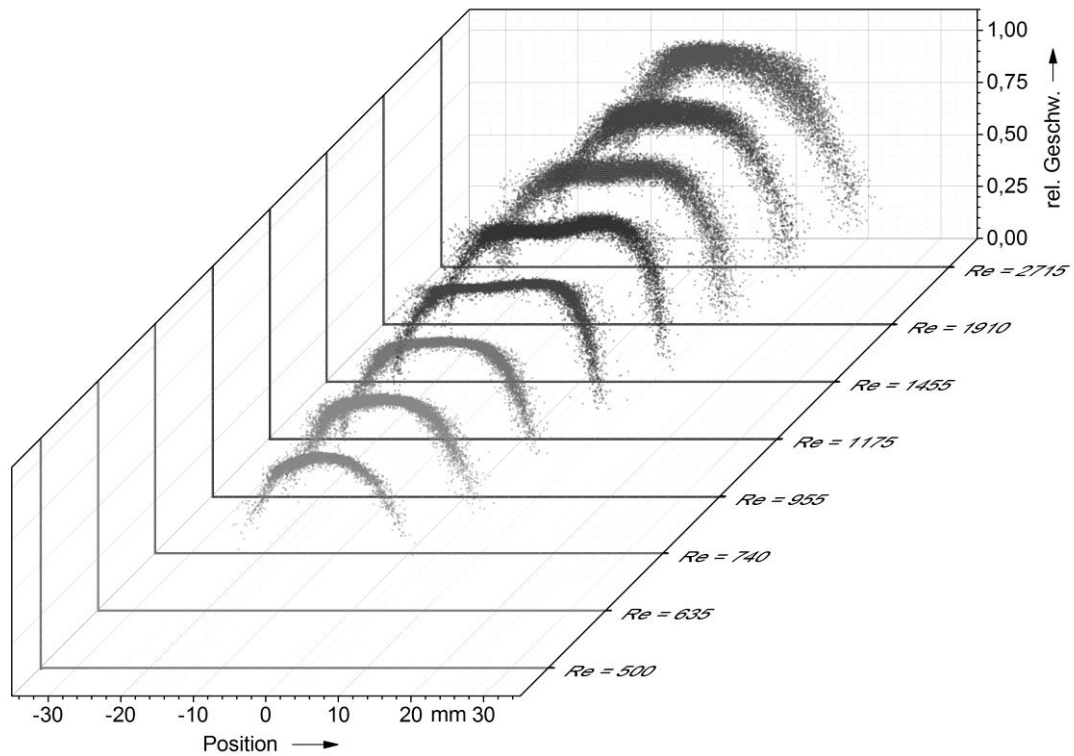


Abb. 3: Rohrströmungsprofile mit der Reynoldszahl als Parameter. Zu sehen ist der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung. Der Rohrdurchmesser beträgt 40 mm. Das Messvolumen liegt 3 mm vor der Rohröffnung. Die Messvolumengröße wurde mit dem beschriebenen Teleskop auf etwa 85 mm vergrößert.

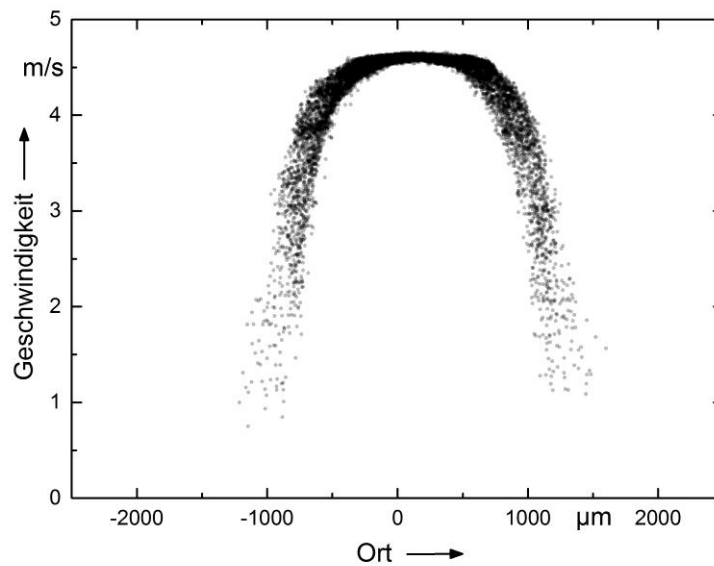


Abb. 4: Strömungsprofil einer Düse (Spitze eines Kugelschreibers) mit einem Durchmesser von 2,6 mm. Das Messvolumen wurde mit dem invertierten Teleskop auf ca. 5 mm verkleinert. Die gleiche Messvolumengröße und daraus resultierende Ortsauflösung wurde mit einer Sammellinse ( $f = 30$  mm), in deren Fokus sich der Detektor befand, erzielt.

## Literatur

V. Strunck, D. Dopheide: "Ortauflösender LDA-Sensor für die Grenzschichtprofilmessung", Tagungsband 2. Workshop Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik - Aktueller Stand und neue Anwendungen, Braunschweig 14.-16- Sept. 1993, Beitrag 4, Aachen, Shaker Verlag, 1993

M. Borys, V. Strunck, H. Müller, D. Dopheide:"Interferometrische Ortsauflösung der Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Meßvolumens eines Referenzstrahl-LDA", In: Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik, 8. Fachtagung veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA2000), Technische Universität München, 12-14. September 2000, Verlag Shaker, Aachen, ISBN 3-8265-7809-0, Beitrag 2.1-2.8

J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller, D. Dopheide, S. Becker, E. S. Zanooum, F. Durst: "Messung der Wandschubspannungen mit einem ortsauflösenden LDA-Doppler-Profilsensor", 10. Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - Neuere Entwicklungen und Anwendungen -, veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA 2002), Universität Rostock, 10 - 12. September 2002, ISBN 3-86009-233-2, Beitrag 9.1-9.6

V. Strunck, T. Sodomann, H. Müller, D. Dopheide: "Profilmessungen innerhalb des Messvolumens kommerzieller 3D-LDAs", 10. Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - Neuere Entwicklungen und Anwendungen -, veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA 2002), Universität Rostock, 10-12. September 2002, Verlag Shaker, Aachen, ISBN 3-86009-233-2, Beitrag 10.1-10.6

T. Buschmann, V. Strunck, H. Müller, D. Dopheide: "Faseroptischer LDA-Liniensensor mit hoher Ortsauflösung", 11. Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - neuere Entwicklungen und Anwendungen -, veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA 2003), PTB-Braunschweig, 9.-11. September 2003, Fischer Druck, Peine, ISBN 3-00-011903-5, Beitrag 7.1-7.6

Drain, L. E. (1980): The laser Doppler technique. John Wiley & Sons, New York

Borys, M.; Strunck, V.; Müller, H.; Dopheide D. (1998): Meßvolumeneffekte des Referenzstrahl-LDAs. In: Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik, 6. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie, GALA, Essen, Verlag Shaker, Aachen, S. 38.1–38.6