

LITHOGRAPHIE-STREUTEILCHEN FÜR DIE LDA-KALIBRIERUNG

NANOSTRUCTURED SCATTERING PARTICLES FOR LDA-CALIBRATION

V. STRUNCK, N. PAPE, T. WEIMANN, H. MÜLLER

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

Lithographie, Dünnschichtstruktur, LDA, Kalibrierung, rotierende Scheibe

Lithography, thin film structure, LDA, calibration, rotating

Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt die Nutzbarkeit von lithographisch hergestellten Streuteilchen, die auf einer rotierenden Scheibe für die LDA-Kalibrierung eingesetzt werden können. Die Streuteilchen werden auf einen Objektträger gedruckt und anschließend auf der Seitenfläche eines Glaszylinders angebracht. Aus bekannter Drehzahl und radialem Abstand der Streuteilchen und sowie aus dem bekannten Abstand der Streuteilchen untereinander lässt sich jeweils die Gerätekonstante bestimmen. Beide Methoden liefern die gleichen Ergebnisse. Da die Streuteilchen an bekannten Orten fixiert sind, lässt sich eine konsistente Kalibrierung für optische Geschwindigkeitsmessgeräte erreichen.

Einleitung

Für die Messung von Geschwindigkeiten mit Laser-Doppler-Anemometern (LDA) in einer Gasströmung werden bevorzugt Flüssigkeiten zu Streuteilchen vernebelt und der Strömung zugesetzt. Aufgrund der Oberflächenspannung bilden sich hierbei kugelförmige Tröpfchen. Bei der Kalibrierung von LDA-Systemen nutzt man hingegen Streuteilchen aus Feststoffen, die sich auf der mit bekannter Geschwindigkeit bewegten Oberfläche eines Körpers befinden. Die Form und Struktur dieser Streuteilchen ist meist unbekannt und der Benutzer muss entscheiden, ob sie für eine Kalibrierung geeignet sind oder nicht. Da die Selektion der Streuteilchen nach frei wählbaren Auswahlkriterien erfolgt und für jede Kalibrierung unterschiedlich ausfallen kann, wird im Folgenden untersucht, ob sich mit gedruckten Streuteilchen eine verbesserte Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse erzielen lässt.

Der Druckprozess erlaubt ein lokal hochpräzises und genaues Aufbringen der Streuteilchen auf einem ebenen Glasträger, so dass der Abstand zweier Streuteilchen zueinander für eine zusätzliche Kalibrieremethode genutzt werden kann.

Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen wurde eine Kalibriereinrichtung genutzt, deren ausführliche Beschreibung bei Strunck et al 2010 zu finden ist. Die rotierende Scheibe wird von einem Schrittmotor angetrieben. Die Schrittweite erlaubt eine räumliche Auflösung von $10\ \mu\text{m}$. Der bedruckte Glasträger mit den Maßen $50\ \text{mm} \cdot 24\ \text{mm} \cdot 0,2\ \text{mm}$ wurde so auf die Seitenfläche der Scheibe geklebt, dass eine Radiallinie der Scheibe innerhalb und parallel zu den Seitenkanten des Trägers verläuft, siehe Abb. 1.

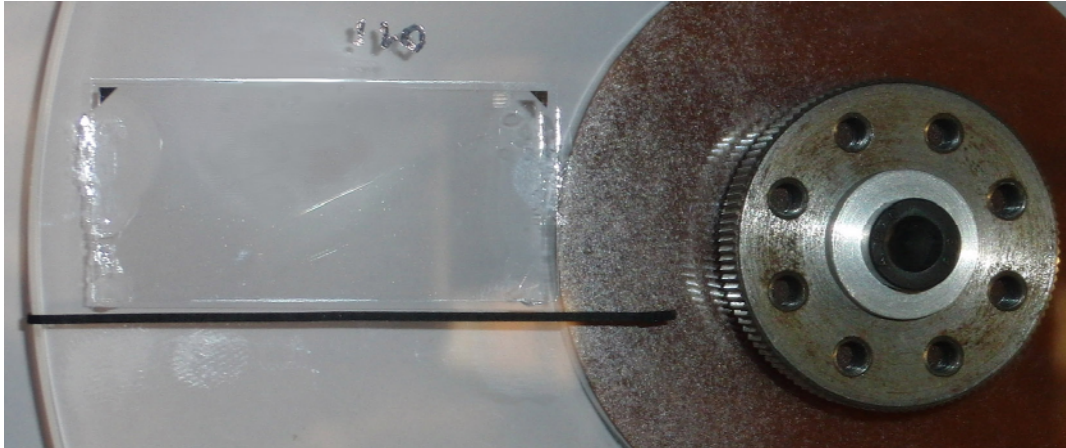


Abb. 1: Ausschnitt der rotierenden Scheibe mit Glasträger

Herstellung der Streuteilchen

Glasträger für die Mikroskopie sind eigentlich nicht das Zielsubstrat für den Lithographieprozess, der meist Silizium nutzt und eine gute Leitfähigkeit bevorzugt. Auf dem Glasträger wurde ein elektronenempfindlicher Lack aufgebracht. Dieser wurde mit einer leitfähigen Chromschicht überzogen, um Aufladungen während der Elektronenstrahlolithographie zu vermeiden. Nach der Belichtung durch einen Elektronenstrahlschreiber (Vistec, Typ EBP-5000+) wurde zuerst das Chrom nasschemisch entfernt und der Lack entwickelt. Danach wurde die Probe mit $150\ \text{nm}$ Chrom beschichtet. Der Lack wurde abschließend abgelöst und somit auch das Chrom aus dem unbelichteten Bereich entfernt.

Die Streuteilchen sollen Licht in die Rückwärtsrichtung und bevorzugt in die Empfangsoptik des LDAs streuen. Ebene Streuteilchen beugen zwar auch das Licht, spiegeln es aber hauptsächlich und sind damit nahezu unsichtbar für ein LDA und damit weniger geeignet. Da eine für LDA günstige Halbkugelform mit diesem Verfahren nicht erzeugt werden kann, wurden Nanostrukturierungen hergestellt, die die Streuleistung der flachen Teilchen erhöht. Folgende Grundmuster, siehe Abb. 2, wurden untersucht:

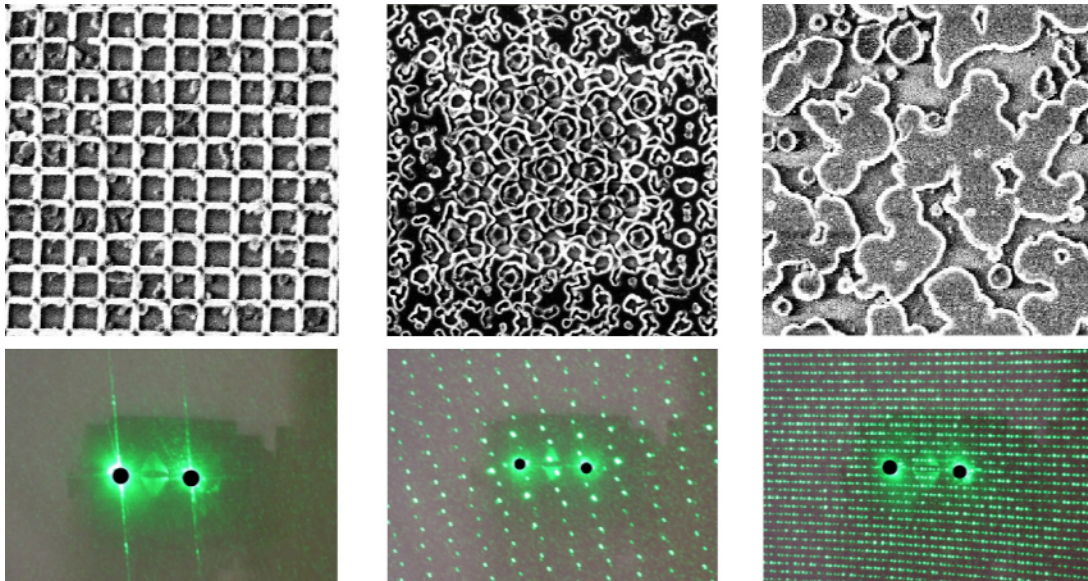


Abb. 2: Gitter-, Penrose- und Zufallsmuster mit Streubildern

Die mit dem Elektronenmikroskop abgebildeten Musterausschnitte in Abb. 2 haben jeweils eine Kantenlänge von $10\ \mu\text{m}$. Um die Rückstreuung zu untersuchen, wurden großflächige, sich wiederholende Muster von $0,5\ \text{mm} \cdot 0,5\ \text{mm}$ hergestellt, die mit einem LDA beleuchtet wurden. Ein Projektionsschirm mit Löchern für die hindurchtretenden Laserstrahlen wurde vor die Sende- und Empfangsoptik des LDA gestellt. In der unteren Reihe von Abb. 2 sind die so erhaltenen Streubilder zu sehen.

Der ideale Gitterabstand für eine Rückstreuung in die Empfangsoptik entspräche mindestens dem LDA-Streifenabstand und wäre damit größer als die gewünschten Streuteilchen. Daher streut das hier feinere Gittermuster (linke Abb. 2) kein Licht in Richtung der LDA-Empfangsoptik. Etwas wirkungsvoller zeigt sich das quasiperiodische Penrose-Muster (Parkettierung, die sich nicht exakt wiederholt) in der Mitte der Abbildung. Besonders kräftig streut das Zufallsmuster (rechte Abb.), welches dann auch im Weiteren benutzt wurde. Alle periodischen Muster erzeugen auch wieder periodische Streubilder. Ebenso führt die Digitalisierung für die Positionierung des Elektronenstrahls zu periodischen Strukturen. Unter dem Mikroskop mit Weißlichtbeleuchtung von oben ist das ausgewählte Streuteilchenmuster dunkel, da es das meiste Licht seitwärts streut. Bei schräg einfallendem Laserlicht (70° zur optischen Achse) ist das Streulicht gut zu erkennen (siehe Abb. 3 rechts).

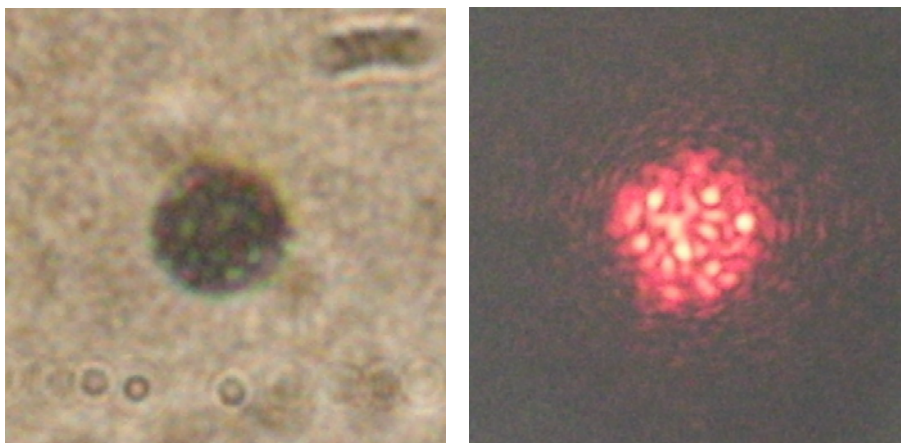


Abb. 3: Rückwärtsstreuung und seitliche Laser-Beleuchtung eines $10\ \mu\text{m}$ -Streuteilchens

Lokalisierung der Streuteilchen

Auf dem Glasträger sind jeweils 4 Reihen von Streuteilchen mit einem Durchmesser von 5 µm und 10 µm aufgebracht. Alle Streuteilchen haben einen Abstand von 2 mm zueinander. Zur besseren Auffindbarkeit sind die acht Reihen sind mit einem Rahmen umgeben. Bei einer festen Winkelstellung und einer Drehzahl von 3 Umdrehungen/s wurden die LDA-Signale auf dem Träger entlang des Radius aufgenommen. Weil das Messvolumen einen Durchmesser von 250 µm hat, haben auch die (quadrierten) LDA-Signale im Ortsbild diesen Durchmesser, siehe Abb. 4.

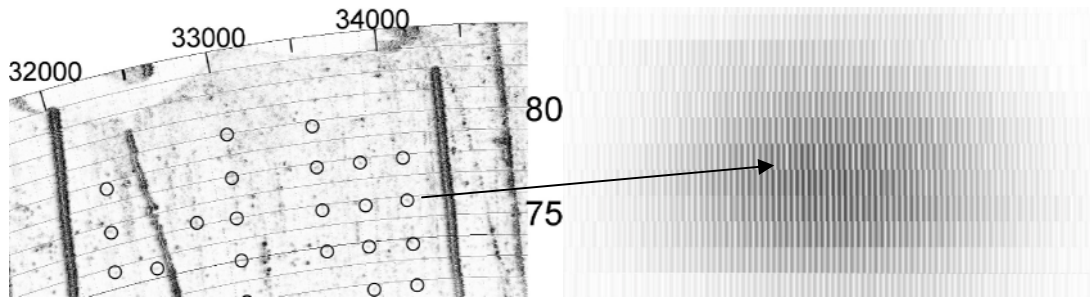


Abb. 4: Umrandete LDA-Signale auf dem Glasträger und einzelnes LDA-Signal

Von links nach rechts betrachtet sieht man einen Teil des linken Rahmens, schräg verlaufend dazu einen Kleberfaden, den rechten Rahmen und die rechte Kante des Glasträgers. Ist erst einmal ein von einem gedruckten Streuteilchen erzeugtes Signal gefunden (siehe in den Kreisen in Abb. 4 links), so können die Winkel- und Radialpositionen der übrigen aufgrund der bekannten Koordinaten berechnet und leicht wiedergefunden werden.

Außer den gewünschten Streuteilchen sind viele unerwünschte vorhanden, da der Träger nicht in einem Reinraum auf die Scheibe geklebt wurde. So befinden Staubteilchen zwischen Träger und Scheibe und auch auf der Außenseite des Trägers. Staub in der Nähe der Streuteilchen, Kleber und auch defekte Streuteilchen selbst reduzierten die Anzahl der nutzbaren Streuteilchen auf 25%.

Ändert man die Winkelstellung der Signalaufnahme um 180°, so lässt sich das gleiche Bild auf der gegenüberliegenden Seite der rotierenden Scheibe aufnehmen. Mittels Kreuzkorrelation beider Bilder kann so die Position der Scheibenachse mit etwa 20 µm Auflösung bestimmt und ausgerichtet werden.

Kalibrierung mit Nutzung der Position

Aus der Position eines ‚gefundenen‘ Referenzstreuteilchens nahe der Radiallinie und den vorgegebenen Koordinaten der anderen Streuteilchen auf dem Glasträger wird der radiale Abstand R eines jeden Streuteilchens berechnet.

Der Streifenabstand d ergibt sich dann zu

$$d = \frac{\omega R}{f} \quad \text{mit Dopplerdifferenzfrequenz } f, \text{ Drehgeschwindigkeit } \omega. \quad (1)$$

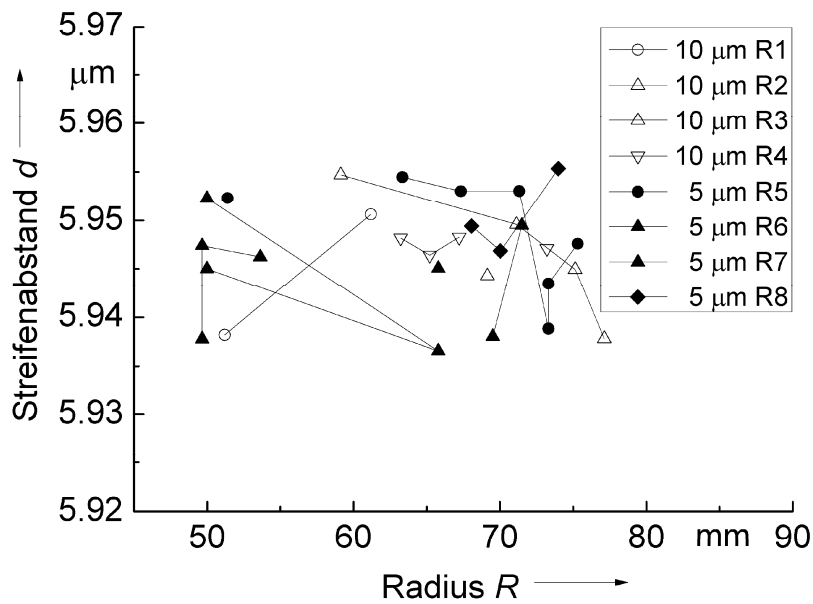


Abb. 5: Streifenabstand bei Nutzung der Position

Von den 36 Streuteilchen wurden nochmals 6 entfernt, deren Abweichungen vom Mittelwert größer als die der Standardabweichung war. Zurück blieben 30 Messwerte mit einer Standardabweichung von etwa 0,1 %.

Kalibrierung mit Nutzung der Streuteilchenabstände

Zator 2006 stellt eine Kalibriermethode vor, die mit einer Messung oberhalb und einer Messung unterhalb der Scheibenachse die Dopplerdifferenzfrequenz von zwei Streuteilchen misst. Es gilt wegen der Linearität:

$$f(R) = \frac{\omega}{d} \cdot R \Rightarrow \sum f_i = \frac{\omega}{d} \cdot \sum R_i \quad (2)$$

Für die oben genannten zwei Teilchen muss die Position der Scheibenachse nicht bestimmt werden. Nur der Abstand ΔY der Teilchen ist maßgeblich:

$$d = \omega \frac{\sum R_i}{\sum f_i} = \omega \frac{R_1 + R_2}{f_1 + f_2} = \omega \frac{\Delta Y}{f_1 + f_2} \quad (3)$$

Was für die Summe gilt, gilt auch für die Differenz, die hier genutzt werden soll, da die Abstände der Streuteilchen aufgrund der Lithographiemethode mit einer Auflösung von 25 nm vorgegeben sind. Ebenfalls ist der Ort der Scheibenachse für die Streuteilchenreihe, die parallel zu und nahe dem Radius angeordnet ist, von geringer Bedeutung. Für Streuteilchen mit größerem Abstand dazu ist eine Korrektur der radialen Differenz ΔR erforderlich.

$$d = \omega \frac{R_1 - R_2}{f_1 - f_2} = \omega \frac{\Delta R}{\Delta f} \quad (4)$$

Bei 30 Streuteilchen ergeben sich 435 radiale Differenzen. In Abb. 6 ist der Streifenabstand für radiale Differenzen größer als 2 mm dargestellt:

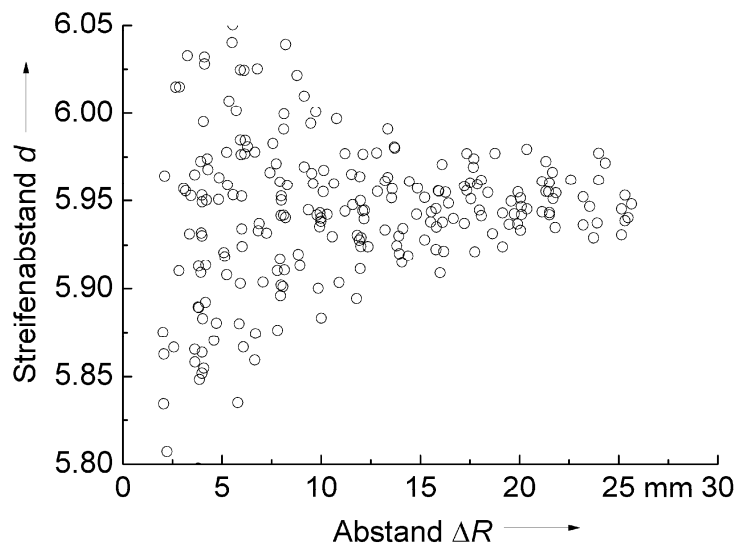


Abb. 6: Streifenabstand bei Nutzung der Abstände

Die Differenzenmethode ergibt einen Mittelwert von 5,947 mm mit einer Standardabweichung von 0,23%. Die Positionsmethode ergibt einen Mittelwert von 5,949 mm und eine Standardabweichung von 0,093%. Da die Abstandsmethode keine gemessenen Radien nutzt, hat die erhaltene größere Streuung der Messwerte ihren Ursprung in den Dopplerdifferenzfrequenzen und damit in den Formabweichungen der Streuteilchen. Die Erstellung eines verbesserten symmetrischen Streumusters anstelle eines Zufallsstreumusters ist daher vorgesehen.

Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt erste Messungen mit künstlich gefertigten Streuteilchen. Die Streuteilchen werden lithographisch auf einen Glaträger gedruckt und dieser auf einer rotierenden Glasscheibe angebracht. Zwei Methoden für die Kalibrierung des LDA-Streifenabstands wurden vorgestellt. Es zeigte sich, dass die gefertigten Streuteilchen zwar sehr gute Streueigenschaften haben, jedoch auch unterschiedliche Formen haben, bzw. solche Unterschiede aufweisen, wie sie auch bei unbekanntem Streuteilchen auf der Scheibe zu finden sind. Die Erzeugung identischer symmetrischer Streuteilchen könnte diese Abweichungen minimieren. Da die Positionen der gedruckten Streuteilchen unverändert bleiben, können alle weiteren optischen Geschwindigkeitsmessgeräte mit diesen Streuteilchen kalibriert werden, so dass die Weitergabe der Geschwindigkeit konsistent bleibt.

Literatur

V. Strunck, N. Pape, H. Müller, B. Mickan: "Messunsicherheit der Geschwindigkeitsdarstellung zur LDA-Kalibrierung mit rotierender Scheibe", 18. Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA 2010), BTU-Cottbus, 7. – 9. September 2010, ISBN 978-3-9805613-6-5, Beitrag 4.1 – 4.8

S. Zator: "Neue Kalibrierungsmethode für optische Geschwindigkeitsmessgeräte", 14. Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA 2006), Braunschweig, 5. – 7. September 2006, ISBN 3-9805613-3-X, Beitrag 21.1 – 21.6