

## **LDA-Kalibrierungen – verfahrensbedingte Grenzen der Vergleichbarkeit**

### **LDA-calibrations- procedure dependent limitations of comparability**

**H. Müller, N. Pape, V. Strunck**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Laser-Doppler-Anemometer, Kalibrierung  
Laser-Doppler-Velocimetry, calibration

### **Zusammenfassung**

Bisher gibt es keine Richtlinien für eine einheitliche Vorgehensweise zur Kalibrierung von Laser-Doppler-Anemometern, die als Bezugsnormale in Kalibriereinrichtungen eingesetzt werden. Die Darstellung und Bestimmung einer Geschwindigkeit mit Hilfe einer rotierenden Scheibe als Primärnormal und einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) als Messsystem ist für eine definierte Messposition im LDA Messvolumen mit einer erweiterten Messunsicherheit von  $< 0,6 \text{ ‰}$  möglich. Die für eine LDA-Kalibrierung notwendige Berücksichtigung des für die LDA-Messung relevanten Detektionsvolumens lässt unter dem Aspekt der Vergleichbarkeit von LDA-Kalibrierergebnissen Messunsicherheiten von unter einem Promille in der Regel nicht zu. Der Grund hierfür ist, dass das Kalibrierergebnis für ein und dasselbe LDA von den für die Kalibrierung gewählten Streuzentren, der zu Grunde gelegten Messvolumentiefe und der bestimmten relativen Lage der Messvolumenmitte abhängen kann. Diese Abhängigkeit kommt um so mehr zum Tragen, je stärker das zu kalibrierende LDA bedingt durch Laserquelle und Justage von einem optisch idealen System abweicht.

### **Einleitung**

Laser-Doppler-Anemometer werden in vielen Messeinrichtungen zunehmend als Bezugsnormale eingesetzt. Eine Voraussetzung hierfür ist die vorausgegangene Kalibrierung der Laser-Doppler-Anemometer mit möglichst kleiner Messunsicherheit. Die Angabe der Messunsicherheit einer LDA-Kalibrierung kann bei der Verwendung einer rotierenden Scheibe zur Primärdarstellung der Geschwindigkeit von den Eigenschaften der für die Kalibrierung ausgewählten Streuzentren wie auch von den Verfahren zur Bestimmung des Mittelwertes aus den Kalibrierdaten über das betrachtete Messvolumen des LDA-Systems abhängen, so dass insbesondere bei nicht optimal einjustierten LDA-Systemen unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Bewertung gleicher LDA-Kalibrierdaten zu unterschiedlichen Kalibrierergebnissen mit unterschiedlichen Messunsicherheiten führen können.

Uneinheitliche Vorgehensweisen und unvollständige Angaben zur messtechnischen Rückführung von LDA-Systemen können somit Kalibrierergebnisse zur Folge haben, die im Rahmen der angegebenen Messunsicherheiten keine Vergleichbarkeit mehr aufweisen.

Am Beispiel der Kalibrierdatensätze unterschiedlicher LDA-Systeme wird gezeigt, wie Abweichungen des Kalibrierergebnisses im Bereich einiger Promille auftreten können.

## Grundprinzip zur LDA-Messung und -Kalibrierung

Die für Kalibrieraufgaben üblicherweise eingesetzten Laser Doppler Anemometer (LDA) arbeiten nach dem Kreuzstrahlverfahren, das auch als Doppler-Differenz-Verfahren bezeichnet wird.

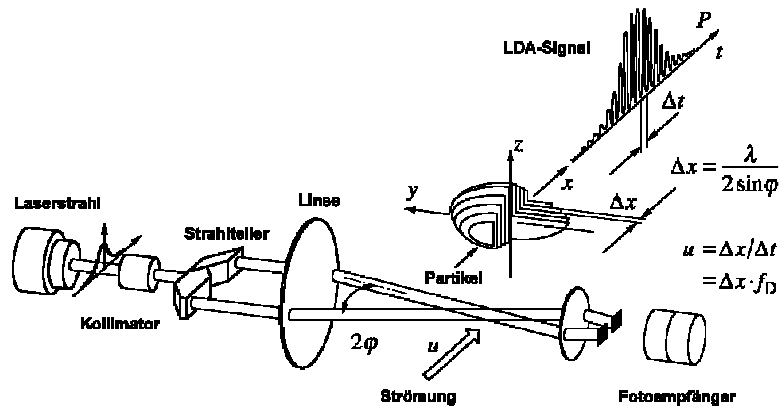


Abb. 1: Schematische Darstellung eines LDA-Systems nach dem Kreuzstrahlverfahren

Bei diesem Verfahren wird ein kollimierter Laserstrahl über einen Strahlteiler in zwei Teilstrahlen gleicher Intensität aufgeteilt. Diese beiden Teilstrahlen werden durch die Abbildungsoptik des LDA-Messkopfes im Messvolumen überlagert, wo sich ein Interferenzfeld mit dem Streifenabstand  $\Delta x$  ausbildet (Abb. 1). Durchquert ein von der Strömung mitgeführtes Teilchen P das Interferenzstreifenfeld mit der Geschwindigkeit  $u$ , so erzeugt das vom Teilchen aus dem Kreuzungsbereich beider Laserstrahlen gestreute Licht auf einem Fotoempfänger ein periodisch moduliertes Signal, dessen Modulationsfrequenz  $f_D$  direkt proportional zu der zu messenden Geschwindigkeitskomponente  $u$  ist. Mit der aus dem Photoempfängersignal ausgewerteten Doppler-Frequenz  $f_D$  und dem aus der Laser-Doppler-Anemometer-Kalibrierung bekannten Streifenabstand  $\Delta x$  lässt direkt die Strömungsgeschwindigkeit  $u$  mit einer durch die Messvolumengröße vorgegebenen örtlichen Auflösung bestimmen. Für konventionelle LDA-Systeme mit üblichen Arbeitsabständen im Bereich weniger Dezimeter erhält man Messvolumengrößen mit Längen von ca. 3 bis 5 Millimetern und Durchmessern von einigen 100 Mikrometern.

Genauere Geschwindigkeitsmessungen erfordern eine LDA-Kalibrierung, bei der der Streifenabstand  $\Delta x$  im LDA-Messvolumen als Kalibrierkonstante bestimmt wird, der von den eingesetzten LDA-Optiken, deren Justage und der Strahlcharakteristik des Lasers abhängt. Die LDA-Kalibrierung erfolgt mit einem Geschwindigkeitsprimärnormal, bei dem die Geschwindigkeit  $u_t$  einzelner auf der polierten Zylindermantelfläche einer rotierenden Glasscheibe selektierter Streuteilchen über die mit hoher Präzision vorgegebene Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  für den geometrisch exakt bestimmten Scheibenradius  $r$  vorgegeben ist.

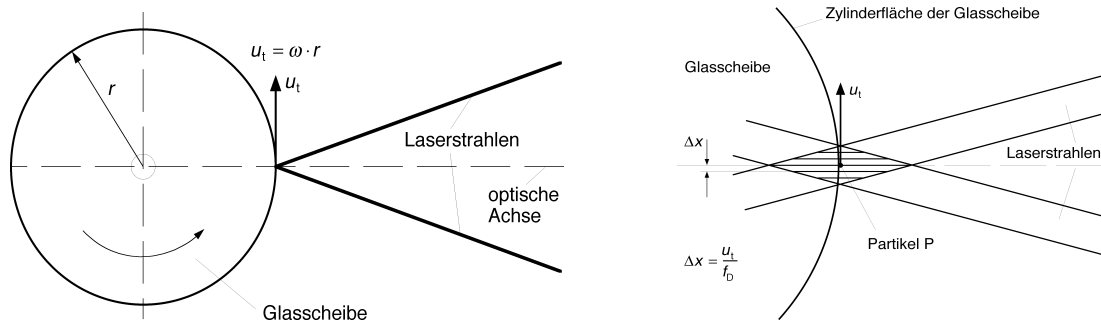


Abb. 2: Prinzip der LDA-Kalibrierung zur Bestimmung des Interferenzstreifenabstandes  $\Delta x$  über eine mittels rotierender Glasscheibe erzeugte definierte Partikel-Geschwindigkeit  $u_t$

Die untere Grenze der Messunsicherheit für LDA-Kalibrierungen ist im Wesentlichen durch die Unsicherheit der Geschwindigkeitsdarstellung mittels rotierender Glasscheibe als Geschwindigkeitsnormal gegeben. Einschließlich der Unsicherheitsbeiträge zu Installationsfehlern (Höhenfehler-/Winkelfehler) bei der Ausrichtung des LDA-Systems zur Glasscheibe kann die erweiterte Messunsicherheit für die Angabe des Streifenabstands bezogen auf eine Position im Messvolumen ohne Korrektur des Exzentrizitätsfehlers der Scheibe zu  $< 0,06\%$  und mit Korrektur der Exzentrizität sogar zu  $< 0,02\%$  abgeschätzt werden, siehe hierzu Strunck et al. 2010.

Wesentlich für die Kalibrierung eines LDA-Systems ist die Angabe des mittleren Streifenabstands als Kalibrierkonstante für das gesamte LDA-Messvolumen auf der Basis sukzessiv gemessener Streifenabstände an verschiedenen Positionen entlang der Längsachse des in der Regel elliptischen Messvolumens. Hierzu wird das auf einer Verschiebevorrichtung in Bezug auf die rotierende Glasscheibe einjustierte LDA-System schrittweise durch das Messvolumen verschoben, so dass für jede angefahrne Position ein Wert für den resultierenden Streifenabstand bestimmt werden kann.

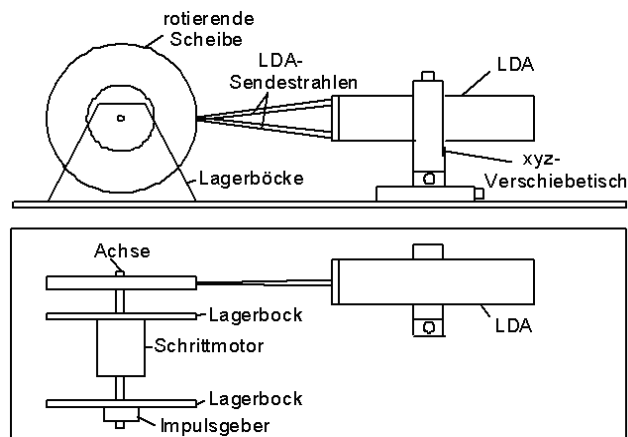


Abb. 3: Seitenansicht und Aufsicht zur schematischen Darstellung der Kalibriervorrichtung

Die Kalibrierung des Streifenabstandes erfolgt bei der PTB-Prozedur in der Regel über etwa 15 Positionierschritte innerhalb der gesamten Messvolumenlänge mit mindestens 10 zufällig auf der Scheibe verteilten, einzeln ausgewählten Streupartikeln. Dabei wird nacheinander für jedes einzeln selektierte Partikel Schritt für Schritt der LDA-Streifenabstand entlang der optischen Achse (vgl. Abb. 2) im Messvolumen (siehe Linien 001 bis 012 in Abb. 4) bestimmt.

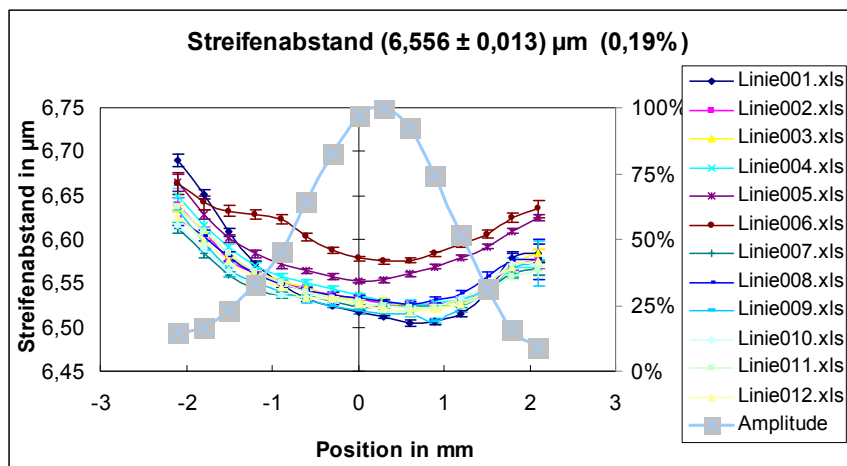


Abb. 4: Verlauf des Streifenabstands von einem Halbleiter-LDA-Systems innerhalb des Messvolumens für unterschiedliche selektierte Streupartikel

Dabei erfolgt die Bestimmung der Messvolumenmitte (Position 0 in Abb.4) aus den Messvolumenpositionen, bei denen die Signalamplitude eines einzelnen selektierten Streupartikels auf ca. 13 % ( $e^{-2}$ -Abfall) gegenüber der maximalen Signalamplitude abfällt.

Aus den am Beispiel eines kommerziellen Halbleiter-LDA-Systems in Abb. 4 dargestellten Messdatenreihen für selektierte Einzelpartikel werden über alle Messdaten innerhalb des Messvolumens ( $e^{-2}$ -Abfall der Signalamplituden) der mittlere Streifenabstand und die erweiterte Messunsicherheit berechnet.

Dabei lässt sich die erweiterte Messunsicherheit  $U_{\Delta x}$  aus der erweiterten Messunsicherheit für die Messgröße Partikelgeschwindigkeit  $U_{\text{Partikel}}$  der rotierenden Scheibe als Primärnormal und der aus den  $n \geq 10$  Einzelmessungen bestimmten Standardabweichung  $s_{\text{exp}}$  abschätzen:

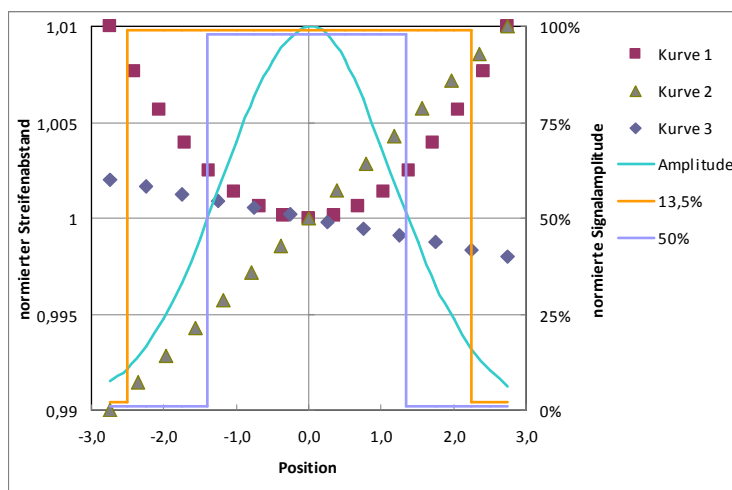
$$U_{\Delta x} = \sqrt{U_{\text{Partikel}}^2 + \left(2 \frac{s_{\text{exp}}}{\sqrt{n}}\right)^2}$$

Die relative Messunsicherheit  $U_{\text{Partikel}}$  wird als erweiterte Unsicherheit des Primärnormals angesetzt, aufgerundet und derzeit mit 0,1 % angegeben.

Bei kalibrierten Halbleiter-LDA-Systemen erhält man mit der üblicherweise erreichten Homogenität des LDA-Streifensystems als Längenmaßverkörperung für die Geschwindigkeitsmessung im LDA-Messvolumen typische Messunsicherheiten für den mittleren Streifenabstand im Bereich von 0,2 %.

Die in Abbildung 4 dargestellten Messdaten verdeutlichen, wie die für die Bestimmung des mittleren Streifenabstands im Messvolumen zu Grunde liegenden Messwerte von der Wahl einzelner Streupartikel abhängen kann und dass für die Bestimmung des mittleren Streifenabstands als Kalibrierkonstante eines LDA-Systems generell die Messvolumenlänge und die relative Lage der Messvolumenmitte eine Rolle spielen können und daher für einheitliche Kalibrierergebnisse spezifiziert werden sollten.

Dies soll am Beispiel dreier simulierter Streifenabstandsverläufe (Abb. 5, Kurve 1 bis 3) in einem normierten LDA-Messvolumen veranschaulicht werden, in dem über unterschiedliche Messvolumenlängen der mittlere Streifenabstand mit und ohne Mittenverschiebung um einen Positionierschritt bestimmt wurde.

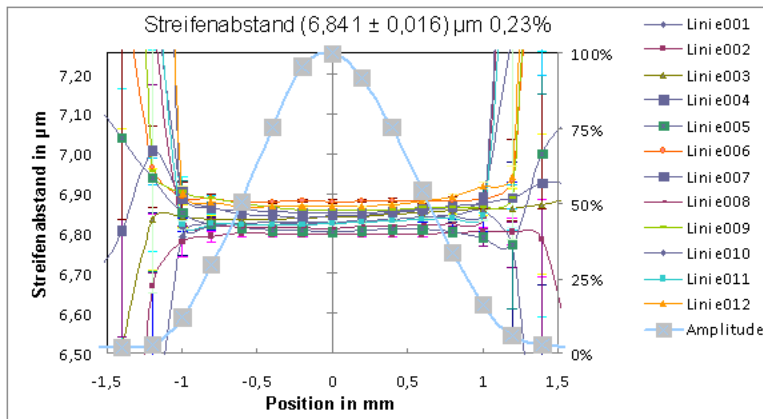


	Kurve 1	Kurve 2	Kurve 3
$1/e^2$	1,0026	1,0000	1,0000
50%	1,0006	1,0000	1,0000
50% -1Schritt	1,0008	0,9986	1,0004
50% +1 Schritt	1,0008	1,0014	0,9996

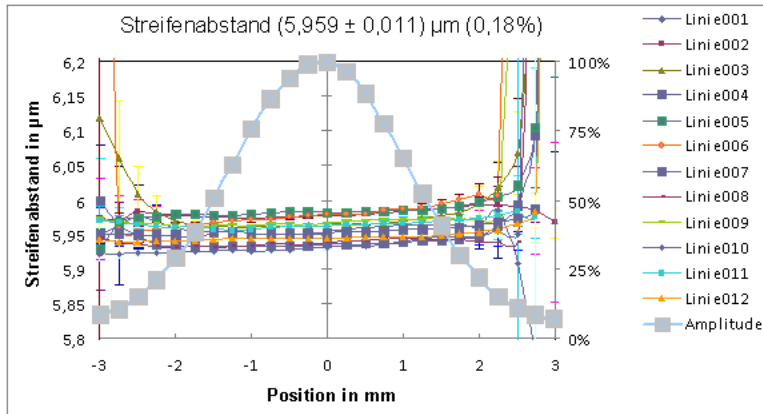
Abb. 5: Simulierte Streifenabstandsverläufe in einem LDA-Messvolumen und für unterschiedliche Messvolumenlängen und Mittenverschiebungen resultierende mittlere Streifenabstände (Tabelle)

Je nach dem von der Einjustierung eines LDA-Systems abhängigen Streifenabstandsverlauf im Messvolumen sind vom Auswerteverfahren der Kalibrierdaten abhängige Abweichungen bei der Bestimmung des mittleren Streifenabstand von einigen Promillen möglich.

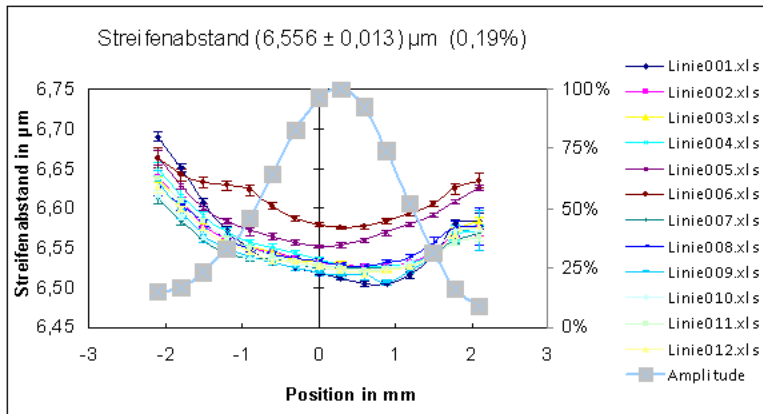
## Kalibrierdaten unterschiedlicher LDA-Systeme und Einfluss der Auswertung



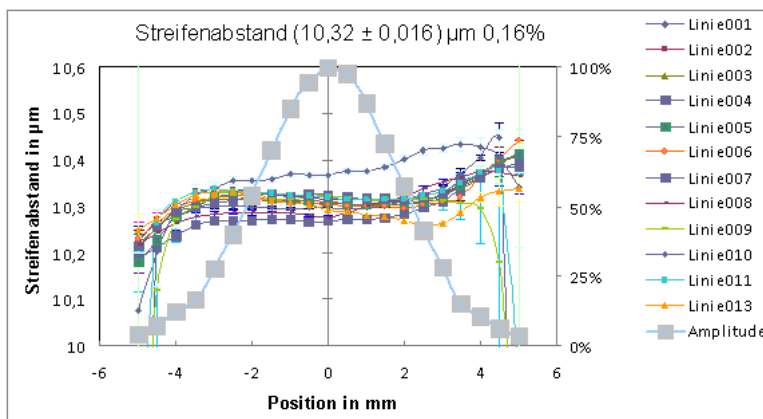
LDA1 (Halbleiter, PTB)



LDA 2 (Nd:Yag, kommerziell)



LDA 3 (Halbleiter, kommerziell)



LDA 4 (Halbleiter, PTB)

Abb. 6: Kalibrierdaten zu unterschiedlichen LDA-Systemen

Die in Abbildung 6 dargestellten Kalibrierdatensätze zu vier unterschiedlichen LDA-Systemen bilden im folgenden die Ausgangsbasis zur Bestimmung der mittleren Streifenabstände als Kalibrierkonstante für die einzelnen LDA-Systeme. In dem Standard-Kalibrierverfahren der PTB werden bis auf identifizierte Ausreißer alle Messdaten innerhalb des LDA-Messvolumens mit Signalamplituden oberhalb der  $e^{-2}$ -Schwelle ohne Amplitudengewichtung berücksichtigt. Der so erhaltene Wert bildet den Bezugswert in der Abbildung 7, in der für die verschiedenen LDA-Systeme die aus den unterschiedlichen Berechnungen des mittleren Streifenabstands resultierenden Abweichungen dargestellt sind. Betrachtet werden unterschiedlich berücksichtigte Messvolumenlängen wie zum Beispiel für das „Standard-Messvolumen“ für Signalamplituden  $> 1/e^2$  bezogen auf die Messvolumenmitte und ein verkürztes Messvolumen für Signalamplituden  $> 0,5$  bezogen auf die Amplitude in der Messvolumenmitte sowie der Einfluss der Messvolumenmittenbestimmung bezogen auf jeweils einen LDA-Positionierschritt. Darüber hinaus ist für die einzelnen Fälle der Einfluss einer Amplitudengewichtung bei den berücksichtigten Messdaten dargestellt.

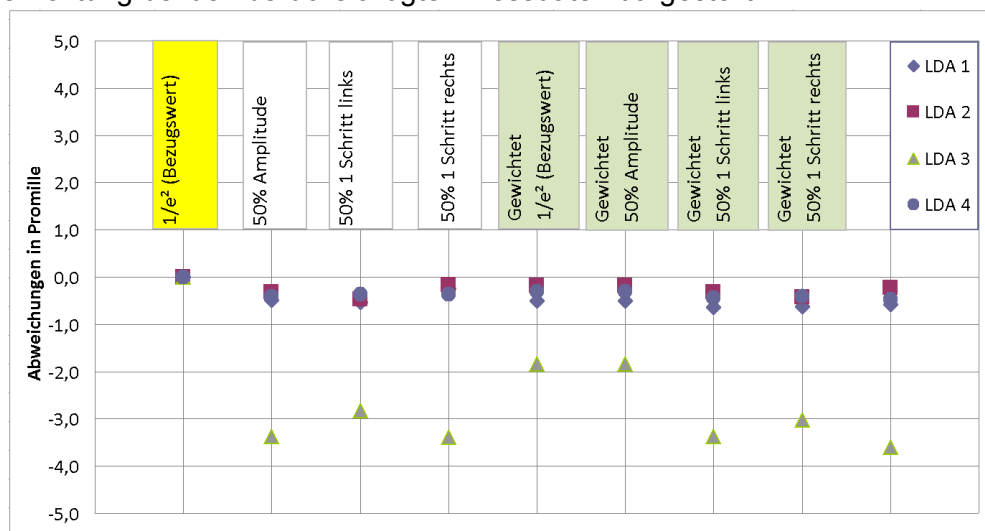


Abb. 7: Abweichungen der berechneten mittleren Streifenabstände für verschiedene LDA-Systeme in Abhängigkeit von Messvolumenlänge, Mittenversatz und Gewichtung

Der Abbildung 7 ist zu entnehmen, dass für drei der vier betrachteten LDA-Systeme die aus unterschiedlichen Berechnungen des mittleren Streifenabstands resultierenden Abweichungen lediglich im Bereich von 0,5 ‰ liegen, während bei einem der betrachteten LDA-Systeme Abweichungen bis zu 3 ‰ auftreten.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass für LDA-Kalibrierungen mit Messunsicherheiten im Bereich von 2 ‰ unabhängig von den hier betrachteten Vorgehensweisen zur Auswertung des mittleren Streifenabstands in der Regel eine Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen gegeben ist. Werden für LDA-Kalibrierungen jedoch Unsicherheiten von unter 1 ‰ angestrebt, so ist eine Vereinheitlichung genau spezifizierter Verfahrensweisen erforderlich.

## Literatur

Müller, H., Kramer, R., Strunck, V., Mickan, B., Dopheide, D.: „Laser-Doppler-Anemometer zur Darstellung und Weitergabe der Einheit Strömungsgeschwindigkeit“, 9. Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie (GALA 2001), Winterthur, 18. – 20. September 2001, ISBN 3-8265-9214-X, Beitrag 24.1 -24.8

Strunck, V., Pape, N., Müller, H., Mickan, B.: „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