

# Signalrekonstruktion in der Laser-Doppler-Anemometrie

Universität Rostock, Fachbereich Elektrotechnik, Institut für Nachrichtentechnik und Informationselektronik

Bearbeiter: cand. ing. Holger Nobach  
 Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. E. Müller (Universität Rostock)  
 Prof. Dr.-Ing. habil. C. Tropea (Universität Erlangen-Nürnberg)

## Meßverfahren

Die wesentlichen Eigenschaften der Laser-Doppler-Anemometrie als Geschwindigkeitsmeßverfahren

- berührungslos, indirekt optisch,
- absoluter, linearer Zusammenhang zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und der Signalfrequenz als elektrische Meßgröße,
- geometrisch definierte Richtungsabhängigkeit im Raum,
- hohe räumliche und zeitliche Auflösung,
- Erweiterbarkeit zur simultanen Mehrkomponentenmessung

führen zu einem verbreiteten Einsatz bei der Untersuchung der Strömungsmechanik. Das Meßverfahren beruht darauf, daß kleine Teilchen vom strömenden Medium mit einem vernachlässigbaren Schlupf mitgeführt werden und diese eingestrahle elektromagnetische Wellen streuen.

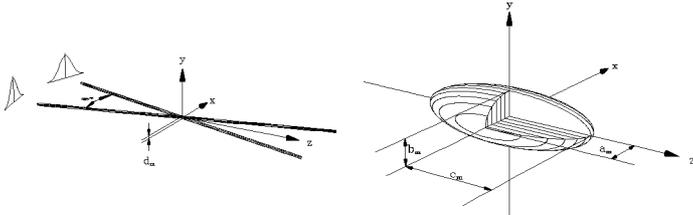


Abbildung 1: LDA-Koordinatensystem

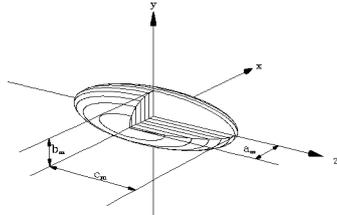


Abbildung 2: LDA-Meßvolumen

Im Kreuzungspunkt zweier kohärenter Laserstrahlen (Abb. 1) entsteht ein räumliches Interferenzfeld, dessen Wechselanteil nur durch die  $x$ -Komponente bestimmt wird. Dadurch entstehen im Raum Interferenzflächen mit konstantem Abstand  $\Delta x$ . Durch den  $e^{-2}$ -Abfall der Maximalintensität des elektromagnetischen Feldes werden die Meßvolumengrenzen definiert (Abb. 2). Passiert ein Teilchen das Meßvolumen, so streut es das elektromagnetische Feld und bildet so den räumlichen Intensitätsverlauf auf einem Fotoempfänger zeitlich ab, der das optische in ein elektrisch meßbares Signal (Burst) überführt. Die Information über die Geschwindigkeit des Teilchens ist in der Frequenz des Burstes enthalten. Die Geschwindigkeit ist dabei über den Interferenzflächenabstand direkt proportional zu der gemessenen Frequenz.

## Meßwertensemble

Sind die Streuteilchenkonzentration und die Meßvolumenabmessungen so klein, daß mit großer statistischer Sicherheit ein auftretendes Meßsignal von genau einem Streuteilchen stammt (Burstbetrieb), so ist die Wahrscheinlichkeit, daß sich überhaupt ein Teilchen im Meßvolumen befindet, so gering, daß die Messung der Strömungsgeschwindigkeit nicht zu jedem Zeitpunkt möglich ist. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt zeitlich stochastisch verteilt, zu Zeitpunkten, die durch den untersuchten Prozeß vorgegeben sind. Das aufgenommene Geschwindigkeits-Zeit-Meßwertensemble ist somit eine Funktion, deren Abtastzeitpunkte durch die räumliche Teilchenverteilung und deren momentane Amplitude durch die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt sind. (Abb. 3). Die statistischen Eigenschaften der Abtastfunktion

- zufällige, exponentialverteilte Abtastintervalle
- Korrelation der Abtasthäufigkeit mit der Meßgröße

führen zu systematischen Fehlern (Bias) bei der Bestimmung statistischer Kenngrößen der untersuchten Strömungsgeschwindigkeit.

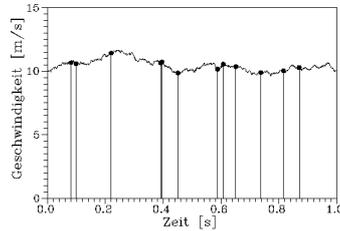


Abbildung 3: LDA-Meßwertensemble

## Meßwertverarbeitung

Das LDA-Meßwertensemble ist Ausgangspunkt für die Bestimmung

- der Wahrscheinlichkeitsdichte,
- der Momente,
- der Korrelationsfunktion und
- der spektralen Leistungsdichte

der untersuchten Strömung. Die Analyse kann dabei grundsätzlich auf zwei Wegen erfolgen:

- Auswertung des Meßwertensembles direkt, mit Methoden, die die statistischen Kenngrößen der Abtastfunktion berücksichtigen
- funktionale Rekonstruktion des Geschwindigkeits-Zeit-Verlaufs der untersuchten Strömung aus dem Meßwertensemble und anschließende Analyse der kontinuierlichen Geschwindigkeits-Zeit-Funktion mit klassischen Verfahren.

Für die direkte Verarbeitung des nicht äquidistant abgetasteten LDA-Datensatzes werden die Einzelmeßwerte durch

- Zeitdifferenzwichtung
- Aufenthaltszeitwichtung
- Geschwindigkeitswichtung
- Sample-and-Hold-Wichtung

bewertet. Zur Bestimmung statistischer Kenngrößen der Strömung sind dann spezielle Algorithmen nötig, die die Verarbeitung nichtäquidistant abgetasteter, gewichteter Daten erlauben.

Durch die Rekonstruktion des kontinuierlichen Geschwindigkeits-Zeit-Verlaufs der Strömung ist es möglich, durch Reabastung einen äquidistant abgetasteten Datensatz für die Verarbeitung mittels klassischer Analyseverfahren zu erstellen. Hierzu werden vorwiegend Polynominterpolationen wie

- Sample-and-Hold-Rekonstruktion
- lineare Rekonstruktion

sowie nichtlineare Methoden wie

- Zeitdehnung mit anschließender Shannon-Rekonstruktion
- Projektion auf konvexe Mengen
- fraktale Rekonstruktion

eingesetzt.

## Untersuchungsaufgabe

Die systematischen und zufälligen Fehler bei der Schätzung statistischer Kenngrößen der untersuchten Strömung hängen auf komplexe Weise von verschiedenen Prozeß-, Meß- und Verarbeitungsparametern ab. Für den Einsatz der Laser-Doppler-Anemometrie in der Strömungstechnik ist eine Abschätzung von Varianz und Bias der Kennwertermittlung unter bestimmten Meßbedingungen erforderlich, um heraus zu find, für die gegebenen Meßbedingungen, beste Methode der Signalverarbeitung auszuwählen. Hierzu sind Aussagen über den Einfluß jedes einzelnen Prozeß-, Meß- und Verarbeitungsparameters auf die Schätzung der Kenngrößen der Strömung zu machen.

## Untersuchungskonzept

Für die Untersuchung des Einflusses einzelner Prozeß-, Meß- und Verarbeitungsparameter auf die Schätzung statistischer Kenngrößen der Strömung sind die Voraussetzungen

- Entkopplung der Prozeß-, Meß- und Verarbeitungsparameter,
- Informationen über tatsächliche Größen,
- Stationarität über lange Meßzeiten

zu gewährleisten. Hierzu sind aufwendige Meßanlagen nötig, die die Variation einzelner Parameter in weiten Grenzen ermöglichen, unter Beibehaltung aller anderen. Die Strömungen müssen über lange Zeiten stabil und von bekanntem Verlauf sein.

Eine kostengünstige und leicht realisierbare Alternative ist die numerische Abbildung des Meßprozesses durch eine Rechnersimulation. Sie erfolgt in drei Schritten:

- Strömungssimulation
- Simulation der räumlichen Teilchenverteilung
- Simulation der Meßereignisse und der Berwertung durch die Meßtechnik.

Das Simulationsergebnis ist zu einem LDA-Datensatz kompatibel, wodurch wahlweise die simulierten sowie die real gemessenen Daten zum Vergleich verarbeitet werden können.

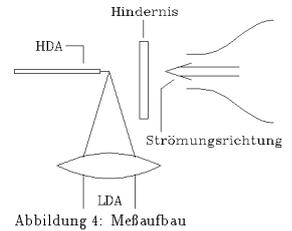


Abbildung 4: Meßaufbau

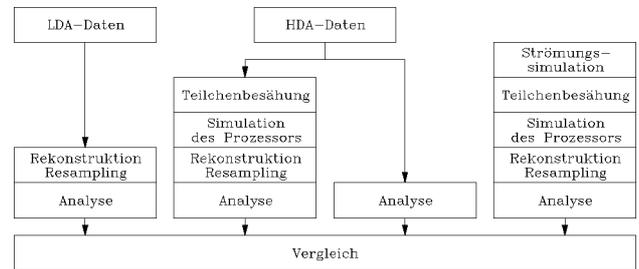


Abbildung 5: Untersuchungsablauf

Die Vorteile der Simulation gegenüber der realen Messung sind:

- einfache Realisierbarkeit, durch Abbildung der physikalischen Wirkprinzipien,
- keine Kopplung der Prozeß-, Meß- und Verarbeitungsparameter untereinander,
- Kenntnis über die statistischen Kenngrößen der simulierten Strömung als Referenz,
- Stationarität über lange Meßzeiten.

Zur experimentellen Verifikation wird die Strömungsgeschwindigkeit in einem Windkanal hinter einem Hindernis parallel mit einem LDA-System und mit einem Hitzdraht-Anemometer als Referenz gemessen (Abb. 4). Das Referenzsignal wird zunächst direkt verarbeitet. Die ermittelten Kenngrößen dienen nun als Referenz für die simulierten und die real LDA-Daten (Abb. 5).

## Untersuchungsergebnisse

In Abbildung 6 sind exemplarisch die Abhängigkeit der Qualität der Schätzung der Autokorrelationsfunktion und der spektralen Leistungsdichte bei Verwendung verschiedener Rekonstruktionsverfahren am Beispiel einer sehr geringen Teilchenrate und die Abhängigkeit des Mittelwert- und des Varianzbias von der Teilchenrate dargestellt. Zusammenfassend gelten folgende Aussagen zu den Rekonstruktionsverfahren:

- Rekonstruktionsverfahren haben Tiefpaßcharakter, mit abnehmender Teilchenrate verringert sich die Grenzfrequenz.
- Bei geringer Teilchenrate nähern sich die Schätzungen der Korrelationsfunktion und der spektralen Leistungsdichte einem, für die verwendete Rekonstruktion spezifischen, aber vom untersuchten Prozeß unabhängigen Verlauf an.
- Die Rekonstruktion macht bei hoher Teilchenrate die Kenngrößen-schätzung unabhängig von der Verteilungsfunktion der Abtastintervalle.
- Die Korrelation von Abtastrate und Intervall wird von der Rekonstruktion nicht berücksichtigt.
- Die Turbulenzgradabhängigkeit von Mittelwert- und Varianzbias wird durch die Rekonstruktion nicht aufgehoben.

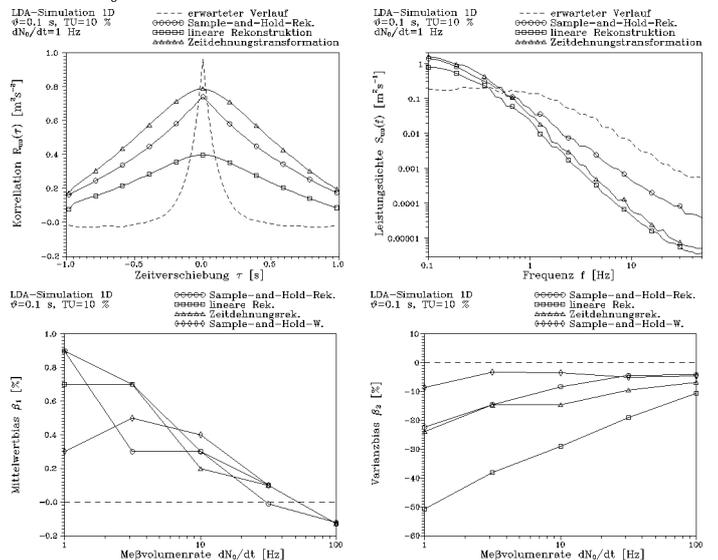


Abbildung 6: Ausgewählte Ergebnisse