



Thorsten-Michael Buschmann (Autor)
**Faseroptischer Liniensensor mit hoher Ortsauflösung
für die Durchflussmesstechnik**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2529>

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Kapitel 1

Einleitung und der Stand der Forschung

1.1 Einleitung

Mit der Realisierung des ersten Lasers durch Maiman [1.1] stand der optischen Messtechnik aufgrund der kohärenten und intensiven Strahlung ein äußerst vielseitiges Werkzeug zur Verfügung, mit dem seither in den verschiedensten Bereichen der Wissenschaft und Industrie sehr effektive Messverfahren realisiert worden sind. Eines dieser Messverfahren ist die Laser-Doppler-Anemometrie. Die Laser-Doppler-Anemometrie ist eine kontaktlose Methode zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten in Gasen und Flüssigkeiten, die für die verwendete Laserwellenlänge transparent sind. Seit der Entdeckung der Laser Doppler Anemometrie von Yeh und Cummins [1.2] sind verschiedenste Bauarten von Laser-Doppler-Anemometern (LDA) entwickelt worden. Laser-Doppler-Anemometer sind zu einem unverzichtbaren Werkzeug der Strömungsmesstechnik geworden.

In der PTB ist die Laser-Doppler-Anemometrie seit über 25 Jahren ein etabliertes Messverfahren sowohl für die Darstellung und Weitergabe der Einheit Strömungsgeschwindigkeit als auch für die Klärung unterschiedlichster Fragestellungen im Bereich der Durchflussmessung. Zur Verbesserung der Durchflussmessung von Gasen werden Prüfstände auf der Basis traversierbarer LDA-Systeme betrieben. Dabei handelt es sich insbesondere um ein Primärnormal zur Durchflussmessung von Gasen unter atmosphärischem Druck [1.3] als auch ein Primärnormal zur Erdgasdurchflussmessung bei hohem Druck [1.4] und eine Messeinrichtung zur Untersuchung installationsbedingter Messabweichungen von Turbinenradgaszählern [1.5]. Bei beiden Prüfständen werden Strömungsgeschwindigkeitsprofile über den Querschnitt einer LDA-Messdüse bzw. eines Rohres mit hoher Präzision gemessen, wobei die LDA-Systeme mit LDA-typischen Messvolumenabmessungen (Durchmesser 200 μm , Messvolumenlänge 1 mm) schrittweise traversiert werden müssen, um Punkt für Punkt die Geschwindigkeitsprofile abzutasten [1.6 - 1.9].

Kapitel 1: Einleitung und der Stand der Forschung

In dieser Arbeit wird ein neuartiger LDA-Liniensensor vorgestellt, der ohne die sonst aufwendige Traversierung herkömmlicher LDA-Systeme mit punktförmigem Messvolumen die Messung von Strömungsgeschwindigkeitsprofilen innerhalb eines linienförmigen Messvolumens erlaubt. Das Prinzip des neuartigen Sensors, der künftig auch als Durchflusssensor eingesetzt werden soll, beruht auf der gleichzeitigen Erfassung der Geschwindigkeit und der lokalen Position von Streupartikeln mit einem im Vergleich zu konventionellen LDA-Systemen extrem vergrößerten Messvolumen. Auf diese Weise lassen sich Strömungsgeschwindigkeitsprofile in Rohren von der Wand bis zur Rohrmitte ohne Traversierung messen, indem die Streuteilchen nacheinander an unterschiedlichen Orten innerhalb des Messvolumens das linienförmige Messvolumen in statistischer Folge durchqueren und so das Geschwindigkeitsprofil abtasten.

Der vorgestellte miniaturisierte Liniensensor basiert auf der LDA-Referenzstrahltechnik und nutzt äußerst kompakte und unempfindliche faseroptische Komponenten. Ein fokussierter durch das Rohr geführter Laserstrahl bildet das linienförmige Messvolumen. Das durch den Doppler-Effekt in der Frequenz verschobene Streulicht von in der Strömung mitgeführten Partikeln wird mit einer Doppelpfängeranordnung detektiert. Die Auswertung der Empfängersignale mittels Korrelations- und Heterodyntechniken erlaubt die Messung von Geschwindigkeitsprofilen mit Auflösungen innerhalb des LDA-Messvolumens bis in den Mikrometerbereich. Kernströmung und Rohrgrenzschicht werden so lokal hochauflösend erfasst. Auf der Empfängerseite werden gezielt Einmodenfasern sowohl im Hinblick auf die Realisierung kleiner Empfangsaperturen zur Streulichtdetektion über große Messvolumenlängen von bis zu 100 mm als auch im Hinblick auf die Implementierung neuer Faservertärker zur effizienten rauscharmen optischen Vorverstärkung der mit den kleinen Empfangsaperturen zwangsläufig schwachen Streulichtsignale, eingesetzt.

Da sich bis auf den LDA Beleuchtungsstrahl die gesamte LDA-Optik in faseroptische Elemente integrieren lässt, kann ein vielseitig einsetzbarer Liniensensor vorgestellt werden, der für die Durchflussmessung verwendet werden soll.

1.2 Stand der Forschung

Die Durchflusssensorik spielt in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen wie der Regelungs- und Prozesssteuerungstechnik, der Diagnosetechnik und der Medizintechnik eine wesentliche Rolle und besitzt insbesondere in der Erdgasindustrie mit den jährlich in Deutschland umgesetzten 100 Milliarden Kubikmetern Erdgas eine nicht zu unterschätzende volkswirtschaftliche Bedeutung.

Alle bekannten Durchflussmessgeräte wie Turbinenradgaszähler [1.10 bis 1.13], Ultraschallgaszähler [1.14 bis 1.43] und Zähler nach magnetisch-induktiven und thermischen Wirkprinzipien, reagieren vergleichsweise empfindlich auf Verformungen des Anströmprofils. Daher sollten zur Minimierung von Messabweichungen stets definierte Anströmbedingungen vorliegen. Im Idealfall sind dies ungestörte Geschwindigkeitsprofile, die denen einer voll ausgebildeten turbulenten Strömung entsprechen. Gaszähler sollten darüber hinaus vorzugsweise unter den Bedingungen eingesetzt werden, unter denen sie kalibriert bzw. geeicht worden sind, da durch die Installation veränderte Anströmbedingungen prinzipiell zu Messabweichungen führen können.

Aus den im Literaturverzeichnis aufgeführten Arbeiten [1.44] bis [1.54] ist zu entnehmen dass viele Problemstellungen im Bereich der Durchflussmessung bei Kenntnis der Wirkungsweise des Zählers und der jeweiligen Anströmbedingungen anhand der Rohrströmungsprofile beschrieben und gelöst werden können. Ein Lösungsansatz ist in den Arbeiten [1.55] bis [1.59] dokumentiert. Hier werden Zusammenhänge zwischen den Messabweichungen von Messblenden und der Größe sowie der Verteilung der Wandschubspannungen auf den Rohrumfang aufgezeigt. Damit sind Möglichkeiten eröffnet worden, Installationseffekte zu bewerten, ohne das Strömungsprofil in seiner Gesamtheit zu kennen.

Bei Ultraschallverfahren beispielsweise werden 2 bis 5 verschiedene Schallpfade verwendet, um Unsymmetrien im Geschwindigkeitsprofil zu bestimmen und durch Mittelung auszugleichen. Dies setzt jedoch umfangreiche experimentelle Untersuchungen an unterschiedlichen Rohrströmungen voraus, deren Ergebnisse für die Durchflussbestimmung in den betreffenden Zähler einprogrammiert werden.

Derartige Untersuchungen sind in [1.5] vorgenommen worden. Hier wurde ein Katalog von Strömungsprofilen nach Vorstörungskonfigurationen und den dazu gehörenden Messabweichungen von Turbinenradgaszählern erarbeitet. Es wurden Ergebnisse umfangreicher Untersuchungen dokumentiert, die für das Verständnis der Gesamtproblematik „Rohrleitungskonfiguration - gestörtes Strömungsprofil - Messabweichung“ und für die Beurteilung der Effizienz verschiedener Strömungsgleichrichter eine fundierte Grundlage bilden. Die Messungen fanden an einer Anlage in der PTB statt, mit der die Einflüsse unterschiedlicher Installationseffekte auf die Messabweichung von Turbinenradgaszählern ermittelt werden können. Dabei ermöglicht der Einsatz eines in der PTB entwickelten Halbleiter-LDA-Systems [1.6 und 1.7] über eine berührungslose „quasipunktförmige“ Messung von Strömungsgeschwindigkeiten die hochauflösende Erfassung von Strömungsprofilen. Die Erfassung eines Strömungsprofils erfolgt durch eine Traversierung des Messvolumens. Um eine effiziente Erfassung von Geschwindigkeitsprofilen über den gesamten Rohrquerschnitt bei unterschiedlichen Installationskonfigurationen und Durchflüssen durchführen zu können, wurde in der PTB ein Prüfstand zur automatisierten 2-Komponenten-Strömungsgeschwindigkeitsmessung konzipiert und aufgebaut [1.8]. Dieser Prüfstand ermöglicht einerseits mit Hilfe der eingesetzten LDA-Messtechnik eine detaillierte Erfassung der Strömungsgeschwindigkeitsprofildaten der Gasströmung und andererseits eine direkte Anbindung an die PTB-Normale für die Gasmengenmessung, um Aussagen über das Messverhalten der zu untersuchenden Zähler im Hinblick auf unterschiedliche Anströmbedingungen zu erhalten. Die Automatisierung erleichtert die umständliche und zeitaufwendige Messprozedur der Traversierung des Messvolumens erheblich.

Auf die Traversierung des LDA-Messvolumens kann verzichtet werden, wenn man das Messvolumen um Größenordnungen linienförmig verlängert und innerhalb des Messvolumens sowohl die Geschwindigkeit als auch den Ort des Streuteilchens erfasst. Auf diese Weise lassen sich LDA-Profil/Liniensensoren realisieren. LDA-Profilesensoren auf der Basis des Doppler-Referenzverfahrens mit zwei in Vorwärtsrichtung angeordneten Streulichtempfängern wurden bereits 1992 [1.57] beschrieben und im Hinblick auf die Untersuchung von Grenzschichten [1.58] weiterentwickelt und eingesetzt.

Interessant sind auch die von J. Czarske et al. publizierten Verfahren [1.60 bis 1.62] zur Geschwindigkeitsprofilmessung nach dem Doppler-Differenzverfahren mit zwei ineinander verlaufenden chromatisch unterscheidbaren Messvolumina mit unterschiedlich variierenden Streifenabständen. Bei einer geeigneten Kalibrierung sind nach diesem Prinzip Ortsauflösungen von wenigen Mikrometern bei Messvolumenlängen vom mm- bis in den cm-Bereich realisierbar, wobei die Messunsicherheit für die Geschwindigkeitsmessung gegenüber konventionellen Halbleiter-LDA-Systemen um eine Größenordnung reduziert werden kann.

Hier soll der in der PTB bereits seit 1992 verfolgte auf dem Doppler-Differenzverfahren basierende Ansatz aufgegriffen werden, bei dem sich der über eine Verkleinerung der Photoempfängeraperturen eine Messvolumenverlängerung erzielen lässt.

Ein interessanter Ansatz ist in [1.9] vorgestellt worden. Durch die hier vorgenommene Verringerung der Empfangsapertur des Streulichtempfängers eines Referenzstrahl-LDAs ist eine Messvolumenlänge von 10 mm erreicht worden. Mit diesem LDA ist eine vollständige Erfassung des örtlichen Geschwindigkeitsverlaufs innerhalb von Grenzschichten möglich. Ein derartiger Sensor kann zur Durchflussmessung in Rohrleitungen herangezogen werden. Allerdings ist die Messvolumenverlängerung begrenzt, da mit abnehmender Apertur zwar eine Messvolumenvergrößerung einsetzt, andererseits aber auch immer weniger Streulicht für die Signalbildung auf der Empfängerfläche zur Verfügung steht. Somit kann ein derartiger Sensor nur für kleine Rohrdurchmesser verwendet werden.

In dieser Arbeit wird die Idee von [1.9] aufgegriffen und die Verwendung von faseroptischen Verstärkern mit hohen Kleinsignalverstärkungen von über 40 dB als LDA-Streulichtempfänger mit sehr kleinen Empfangsaperturen und der damit verbundenen Messvolumenvergrößerung vorgestellt.

1.3 Gliederung der Arbeit

Die Dissertation gliedert sich in folgende Schwerpunkte:

Für das Verständnis des LDA-Liniensensors werden in **Kapitel 2** zunächst die Grundlagen der LDA-Technik behandelt. Dazu gehört die Dopplershift, die zur Auswertung notwendige Überlagerung mit einer Referenzfrequenz, dem Heterodynverfahren und die Einführung des Interferenzstreifenmodells. Im Hinblick auf die Generierung eines vergrößerten Messvolumens für den Liniensensor wird die Signalbildung auf der Streulichtempfängerfläche eines Referenzstrahl-LDAs beschrieben und die Notwendigkeit kleiner Empfangsaperturen vorgestellt

Kapitel 3 stellt den Aufbau eines Referenz-LDAs mit linienförmigem Messvolumen zur Durchflussmessungen in einer Rohrleitung vor. Die zur Generierung von großen Messvolumina notwendigen kleinen Empfangsaperturen in der Größenordnung des Modenfeldes von Einmodenfasern führen zu sehr geringen *SNR*-Werten (*SNR*: signal to noise ratio) bei der Signalauswertung. In Kapitel 3 wird daher die Einmodenfaser als Streulichtempfänger diskutiert, da durch die Verwendung der Faser auch gleichzeitig die Nutzung der sehr weit fortgeschrittenen Faserverstärkertechnologie zur optischen Aufbereitung des Streulichtes möglich wird.

Dass die Verwendung eines Faserverstärkers als LDA-Streulichtempfänger tatsächlich eine Verbesserung gegenüber einem konventionellen Empfänger, wie einer APD (Avalanche-Photodiode), darstellt, wird ausführlich in **Kapitel 4** gezeigt. Die Grundlagen, der Aufbau und die Eigenschaften des bei 1064 nm arbeitenden Neodym³⁺-dotierten Faserverstärkers werden hier erörtert. Die anschließenden Ergebnisse von *SNR*-Berechnungen zeigen eindeutig, dass das Empfangssystem bestehend aus einem Faserverstärker mit abschließender PIN-Photodiode im Vergleich zu einer APD bei gleich großen Empfangsaperturen ein deutlich verbessertes *SNR* aufweist, wodurch ein Liniensensor wie er in Kapitel 3 vorgestellt wurde, technisch erst realisierbar ist.

Der komplette Liniensensor bestehend aus der Empfangsfaser und dem anschließenden Faserverstärker wird in **Kapitel 5** diskutiert. Neben der Einempfänger-

Kapitel 1: Einleitung und der Stand der Forschung

anordnung, die sich zur integralen Durchflussmessung eignet, wird hier auch die Zweiempfängeranordnung präsentiert, mit der sowohl die Geschwindigkeit von Streuteilchen, als auch deren Ort innerhalb des langgezogenen Messvolumens messbar wird.

Messungen mit diesem Geschwindigkeitsprofilsensor in einer Rohrströmung werden im **Kapitel 6** im Detail erörtert. Die Messungen wurden in einem Rohrstück bei verschiedenen Durchflüssen, sprich Geschwindigkeiten, durchgeführt. Die Messergebnisse des Liniensensors werden mit bekannten Messergebnissen konventioneller Verfahren verglichen und diskutiert.

Die Zusammenfassung in **Kapitel 7**, das Literaturverzeichnis in **Kapitel 8** und ein Bildanhang schließen die Arbeit ab.

Kapitel 2

Laser-Doppler Anemometrie

Die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) ist zum unverzichtbaren Werkzeug der Strömungsmesstechnik geworden. Sie arbeitet als optisches Messverfahren berührungslos und rückwirkungsfrei und eignet sich besonders zur Untersuchung komplizierter Strömungsvorgänge in Gasen und Flüssigkeiten. Die Geschwindigkeit wird indirekt anhand von in der Strömung mitgeführten Streupartikeln gemessen, die hinreichend klein sein müssen, um dem Fluid schlupflos folgen zu können. Das Messprinzip beruht auf dem Dopplereffekt. Die Tracerteilchen werden mit einem gebündelten Laserstrahl beleuchtet und senden Streulicht aus. Dieses Streulicht ist in seiner Frequenz aufgrund der Bewegung des Tracerteilchens gegenüber der Laserfrequenz verschoben. Diese Dopplerverschiebung kann mit entsprechenden Maßnahmen ausgewertet und somit die Teilchengeschwindigkeit berechnet werden. Für das Verständnis des LDA-Liniensensors, mit dem Geschwindigkeitsprofile von Rohrströmungen ohne Traversierung eines punktförmigen Messvolumens gemessen werden können, sollen in diesem Kapitel die für das Verständnis notwendigen Grundlagen der LDA-Technik erläutert werden. Zunächst wird der Dopplereffekt vorgestellt und die Messung der Dopplerverschiebung mittels optischem Heterodyning beschrieben. Anhand eines in der LDA-Messtechnik weit verbreiteten Zweibeleuchtungsstrahl-Zweistreustrahl-LDAs wird das Heterodyning erläutert. Aufgrund der erreichbaren kleinen Messvolumina kann die Strömungsgeschwindigkeit quasi punktförmig gemessen werden und mit einer Traversierung des Messvolumens ein Geschwindigkeitsprofil erstellt werden. Anschließend wird das dem Liniensensor zugrunde liegende Referenzstrahlverfahren vorgestellt, welches eine orts aufgelöste Geschwindigkeitsmessung innerhalb des Messvolumens zulässt.

2.1 Die Dopplerfrequenz

Abbildung 2.1 verdeutlicht das Doppler Messverfahren. Der Beleuchtungsstrahl eines Lasers, der monochromatisches Licht mit der Wellenlänge λ abstrahlt, trifft auf ein von der Strömung mitgeführtes Tracerteilchen mit der Strömungsgeschwindigkeit \vec{u} und wird von diesem gestreut. Aufgrund der jeweiligen Relativbewegungen des Teilchens bezüglich des Laserstrahls \vec{s} und des Empfängers \vec{r} wird der Dopplereffekt zweifach wirksam. Bezüglich des Lasers wirken die Streuteilchen als bewegte Empfänger und bezüglich des Empfängers wirken sich die Streuteilchen als bewegende Sender aus. Der Streulichtempfänger sieht dann die durch den Dopplereffekt hervorgerufene Frequenzshift oder Dopplerfrequenz [2.1]

$$\Delta f = \frac{\vec{u}(\vec{r} - \vec{s})}{\lambda}. \quad (2.1)$$

Mit den in Abbildung 2.1 eingezeichneten Winkeln Ψ und φ ergibt sich für die Frequenzshift

$$\Delta f = \frac{u}{\lambda} \sin(\varphi + \Psi) + \frac{u}{\lambda} \sin \varphi. \quad (2.2)$$

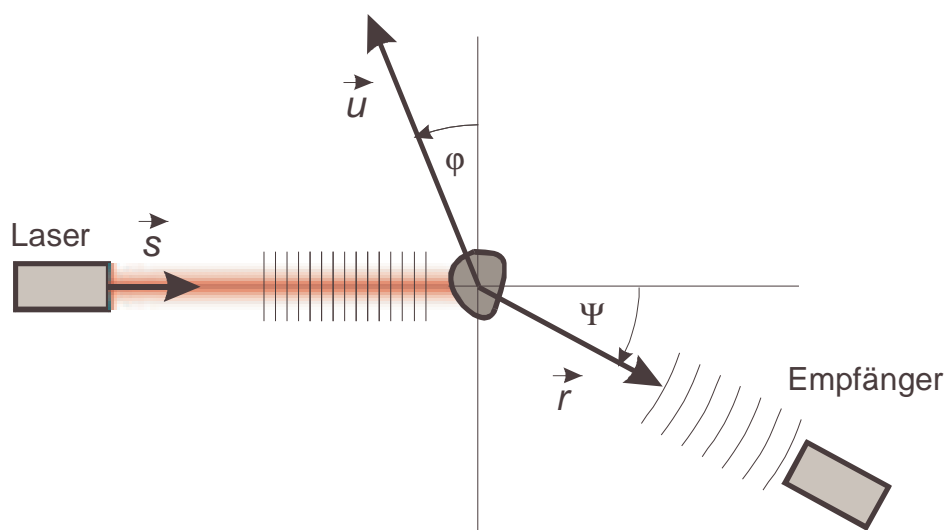


Abbildung 2.1: Doppler Effekt bei einem Laser-Doppler-Anemometer