

OPTISCHES DURCHFLUSSNORMAL FÜR HD-ERDGAS: PRÄZISE DURCHFLUSSMESSUNG MIT DEM LASER-DOPPLER-PROFILSENSOR

Lars Büttner¹, Andreas Voigt¹, Christian Bayer¹, Katsuaki Shirai¹,
Jürgen Czarske¹, Norbert Pape², Volker Strunck², Harald Müller²

¹ Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Prüftechnik
Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden

E-Mail: Lars.Buettner@tu-dresden.de, Internet: <http://eeemp1.et.tu-dresden.de/>

² Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich Gase
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Kurzfassung

Dieser Beitrag berichtet über den Einsatz des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors für die präzise Durchflußmessung von Hochdruck-Erdgas. Die wirtschaftliche Bedeutung der Großgasmengenmessung wird allein an der in Deutschland pro Jahr zum Endkunden geleiteten Erdgasmenge von ca. 100 Milliarden Kubikmetern deutlich. Der Darstellung und Weitergabe der Volumeneinheit für Hochdruck-Erdgas kommt somit eine große volkswirtschaftliche Bedeutung zu. Diese Aufgabe wird von der PTB auf dem Prüfstand „pigsar“ bei der E.ON-Ruhrgas AG wahrgenommen. Mit der Realisierung eines optischen Durchflußnormal als einer weiteren unabhängigen Darstellung des Erdgaskubikmeters soll langfristig die Präzision der Durchflußmessung durch optische Verfahren auf einer breiten meßtechnischen Basis sichergestellt werden. Bei ersten Messungen mit einem konventionellen Laser-Doppler-Anemometer (LDA) wurde eine Meßunsicherheit von ca. 0,5 % erreicht. Eine genauere Durchflußbestimmung setzt die präzise Kenntnis des Grenzschichtverlaufs der Düsenströmung voraus. Aufgrund des durch die Größe des Meßvolumens verursachten Mittelungseffektes kann das Geschwindigkeitsprofil der Grenzschicht mit konventionellen LDA jedoch nur unzureichend aufgelöst werden. Als Lösung wird hier erstmalig der Einsatz des Laser-Doppler-Profilsensors vorgeschlagen, der das Grenzschichtprofil mit einer Auflösung im Mikrometerbereich aufzulösen vermag. Es wird über die Kalibrierung und den Einsatz eines Laser-Doppler-Profilsensors am pigsar-Prüfstand berichtet.

1.) Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland werden derzeit ca. 22,5 % des Gesamtenergieverbrauchs durch die Verbrennung von Erdgas bereitgestellt. Allein ca. 53 % aller bundesdeutschen Haushalte werden mit Erdgas geheizt. Es wird erwartet, daß die Bedeutung des Erdgases am Energiemix auch in Zukunft weiter ansteigen wird. Aktueller Beleg dafür ist der Bau der nordeuropäischen Gasleitung („Ostseepipeline“), mit der ab 2010 Erdgas von Rußland über die Ostsee direkt nach Deutschland geleitet werden soll.

Derzeit werden ca. 110 Milliarden Kubikmeter Erdgas jährlich in der Bundesrepublik an die Endkunden weitergeleitet, so daß der Darstellung und Weitergabe der Volumeneinheit für Hochdruck-Erdgas eine große volkswirtschaftliche Bedeutung zukommt. Diese erfolgt durch den Prüfstand „pigsar“ der E.ON Ruhrgas AG in Kooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) [1,2], der eine Schlüsselposition in Europa einnimmt.

43.2

Als nationales Normal der Bundesrepublik Deutschland für Hochdruck (HD)-Erdgas schafft es die Voraussetzungen für geringst mögliche Meßunsicherheiten in der Energiemessung und somit für die korrekte Abrechnung und Bilanzierung der transportierten Gasmengen. Bei der Bestimmung des Durchflusses lassen sich hier mit nicht-optischen Methoden Meßunsicherheiten von 0,15 % bis 0,25 % erreichen.

Es besteht das Ziel, durch optische Verfahren Meßunsicherheiten im Bereich von 0,1 % zu erreichen.

Für die optische Durchflußmessung ist zunächst die Geschwindigkeitsverteilung $u(r, \varphi)$ über den Rohrquerschnitt bestimmen, woraus sich durch Integration der Durchfluß als Volumenstrom ergibt:

$$Q_v = \dot{V} = \frac{dV}{dt} = \int_F u(r, \varphi) dF \quad (1)$$

Für die flächenhafte Vermessung des Geschwindigkeitsprofils bieten sich kamerabasierte Meßverfahren wie Particle-Image-Velocimetry (PIV) oder Doppler-Global-Velocimetry (DGV) an, die bereits mit einer Einzelmessung das komplette Geschwindigkeitsfeld erfassen. Problematisch sind jedoch die Meßunsicherheiten, die bei PIV einige Prozent betragen. Bei konventionellen DGV-Systemen wurden in optimierten System Meßunsicherheiten von 0,5 m/s erreicht, jedoch können diese in Grenzschichten durch Bildausrichtungsfehler bis auf 20 m/s ansteigen [3]. In aktuellen DGV-Entwicklungen ohne Referenzkamera konnte die Meßunsicherheit bis auf 0,02 m/s verringert werden [3,4]. Beide Verfahren, PIV und DGV, erfordern jedoch eine Beobachtung senkrecht zur Lichtschnittebene und damit in Strömungsrichtung, was den praktischen Einsatz erschwert. DGV ist zudem auf Mehrpartikelstreuung angewiesen, was hohe Tracerpartikeldichten erfordert.

Alternativ kann das Strömungsprofil mit dem etablierten Verfahren der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) erfaßt werden. Dieses zeichnet sich zwar gegenüber den bildgebenden Verfahren durch geringere erreichbare Meßunsicherheiten bis zu 0,1 % aus, jedoch ist die Messung zunächst nur (quasi-) punktförmig. Für die Erfassung des kompletten Geschwindigkeitsprofils über dem Rohrquerschnitt ist eine zweiachsige mechanische Traversierung notwendig, was den Zeitaufwand für eine Messung beträchtlich erhöht und zeitlich stabile Strömungsbedingungen voraussetzt.

Die Komplexität der Aufgabenstellung kann deutlich verringert werden, wenn die Strömung rotationssymmetrisch vorliegt, wie es bei pigsar realisiert wurde. In diesem Fall vereinfacht sich das Flächenintegral zu:

$$Q_v = 2\pi \int_{r=0}^{R_{\max}} u(r)r dr \quad (2)$$

Zur Bestimmung des Volumenstromes ist damit die Kenntnis des radialen (eindimensionalen) Geschwindigkeitsprofils $u(r)$ ausreichend und der Aufwand für LDA-Messungen verringert sich beträchtlich. Bei ersten Messungen mit einem konventionellen Laser-Doppler-Anemometer (LDA) wurde eine Meßunsicherheit von ca. 0,5 % erreicht [2]. Es zeigt sich, daß für eine genauere Durchflußbestimmung eine präzise Kenntnis der Grenzschicht erforderlich ist. Aufgrund des durch die Größe des Meßvolumens (typ. $0,1 \times 0,1 \times 1 \text{ mm}^3$) beim konventionellen LDA verursachten Mittelungseffektes kann das Grenzschichtprofil jedoch nur unzureichend aufgelöst werden.

Abhilfe kann hier der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor [5,6,7] schaffen, der das im Meßvolumen vorherrschende Geschwindigkeitsprofil $u(r)$ und damit insbesondere die wichtige Grenzschicht mit hoher Ortsauflösung im Mikrometerbereich zu vermessen vermag. Im folgenden wird über dessen Anwendung berichtet.

2.) pigsar-Versuchsstand

pigsar ist einer der weltweit führenden Hochdruck-Gaszählerprüfstände der E.ON-Ruhrgas AG in Kooperation und unter Kontrolle der Physikalisch Technischen Bundesanstalt. Er ist als Primärnormal für Hochdruck-Erdgas konzipiert für Drücke bis zu 50 bar. Abb. (1) a) zeigt das optische Durchflußnormal schematisch. Das Herzstück bildet das Modul mit Düse und Meßfenster für den LDA-Einsatz, siehe Abb. (1) b), das sich hinter einer 20 m langen Einlaufstrecke befindet. Das Modul besteht aus einer kreisrunden Düse mit einem Düsenaustrittsdurchmesser von 63,6 mm und einem Kontraktionsverhältnis von 49:1 und zwei unmittelbar dahinter liegenden diametral angeordneten optischen Zugängen für die LDA-Sende- und Empfangsoptik. Die Düsenkontur wurde so konzipiert, daß am Austritt ein möglichst kastenförmiges Geschwindigkeitsprofil mit minimaler Grenzschicht auftritt. Der optische Zugang für die Sende- und Empfangsoptik erfolgt jeweils durch ein 4 cm dickes, in einen Stahlring eingeschmolzenes Borsilikatglasfenster.

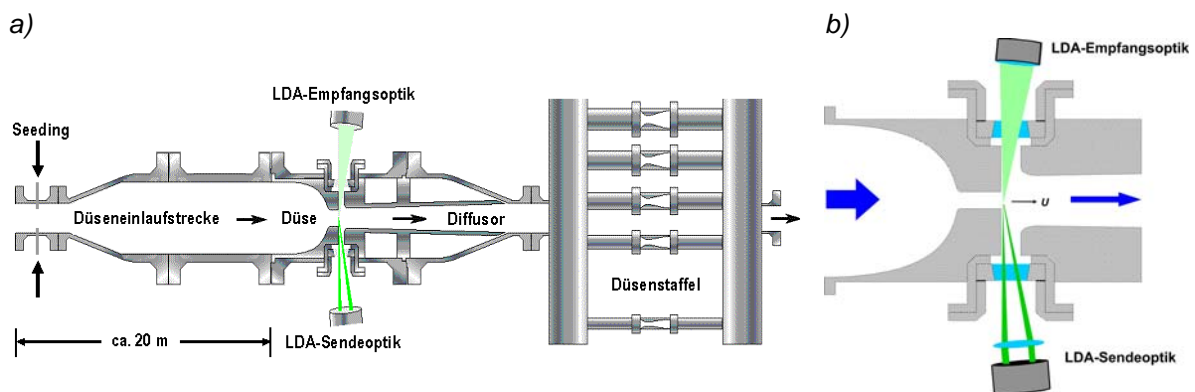


Abb. (1): a) Schematische Anordnung des optischen Durchflußnormals. b) Vergrößerte Ansicht der Meßdüse und der folgenden Anordnung des LDAs. Um eine optimale Meßposition zu erreichen, müssen LDA-Sende- und Empfangsoptik leicht verkippt werden.

Hinter der Düse kann die expandierende Strömung zunehmend von Effekten wie Rezirkulation und auftretenden Sekundärwirbeln gestört werden. Mit wachsendem Abstand vom Düsenaustritt verbreitert sich damit der Düsenfreistrah, die Grenzschichtdicke steigt an und es liegen weniger definierte Strömungsverhältnisse vor. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Messung so nah wie möglich am Düsenaustritt vorzunehmen. Mit einem LDA ist dieses nur möglich, wenn es derart verkippt wird, daß nicht mehr die optische Achse senkrecht zur Strömungsrichtung steht, sondern der LDA-Teilstrahl (beim hier vorgestellten Profilsensor: der äußere Teilstrahl), siehe dazu Abb. (1) b). Der Verkipfung der optischen Achsen muß durch eine detaillierte Kalibrierung Rechnung getragen werden, da es zu nachteiligen Strahlverzerrungen kommen kann, siehe dazu den Abschnitt 5.

Eine tiefergehende Beschreibung des Prüfstandes pigsar und auch der für LDA-Messungen benötigten Seedingvorrichtung kann [1,2] entnommen werden.

Eine Abschätzung zeigt, daß unter den bei pigsar vorherrschenden Randbedingungen (Düsenaustrittsdurchmesser 63,6 mm, Grenzschichtdicke ca. 1 mm) die Strömung in der Grenzschicht mit ca. 4 % zum Gesamt-Volumenstrom beiträgt. Um die geforderte Meßunsicherheit von 0,1 % zu erreichen, ist es folglich unbedingt erforderlich, das Grenzschichtprofil mit hoher Auflösung zu erfassen.

3.) Messung mit einem konventionellen LDA

Am pigsar-Prüfstand wurden zunächst Messungen mit einem konventionellen LDA durchgeführt; für Details der LDA-Sonde siehe [2]. Abb. (2) a,b) zeigen die Ergebnisse dieser Messungen. Das vollständige Geschwindigkeitsprofil zeigt in der Tat den erwarteten kastenförmigen Verlauf, siehe Abb. (2) a). In Abb. (2) b) sind vergrößert die Grenzschichtprofile für zwei verschiedene Abstände ($x=15$ mm, $x=25$ mm) zum Düsenaustritt dargestellt. Die Messungen bestätigen die oben getroffene Aussage, nach der die Grenzschichtdicke mit zunehmendem Abstand zum Düsenaustritt ansteigt.

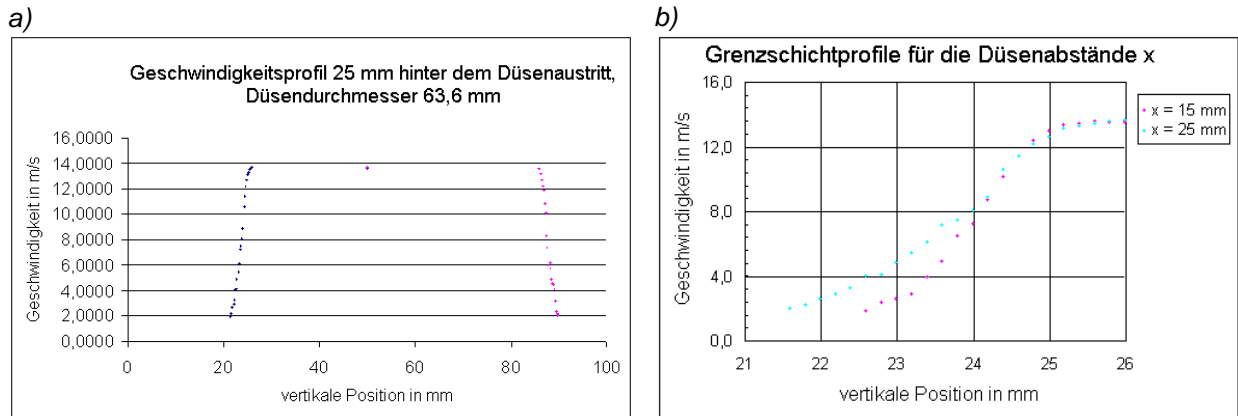


Abb.(2): Mit konventionellem LDA gemessenes Geschwindigkeitsprofil. a) Gesamtes Geschwindigkeitsprofil, b) Grenzschichtprofil für zwei Abstände x zum Düsenaustritt.

Da allgemein die LDA-Meßvolumengröße mit dem Arbeitsabstand, d.h. mit dem Abstand Meßvolumen – Frontlinse, skaliert, ergeben sich bei dem geforderten Arbeitsabstand von 500 mm bereits Meßvolumenlängen im Millimeterbereich (lange Achse des Meßvolumenellipsoids). In der vorgestellten Messung wurde, um eine verbesserte Ortsauflösung zu erhalten, mit der kurzen Achse des Meßvolumenellipsoids gemessen, deren Ausdehnung hier ca. 300 μ m betrug. Dennoch liegt die Ortsauflösung in der Größenordnung der Grenzschichtdicke, was bei der Messung berücksichtigt werden muß. Im einfachsten Fall entspricht das gemessene Grenzschichtprofil der Faltung zwischen tatsächlichem Profil und der Meßvolumenfunktion. In Abb. (3) ist der Einfluß eines Meßvolumens endlicher Ausdehnung auf das gemessene Grenzschichtprofil dargestellt. Wird eine mit der Flugzeit gewichtete Faltung, die größere Partikelmeßraten bei höheren Geschwindigkeiten annimmt, verwendet, so wird das gemessene Grenzschichtprofil dem tatsächlichen ähnlicher, jedoch sind die gemessenen Grenzschichtdicken (mit oder ohne Wichtung) immer deutlich größer als die tatsächlichen.

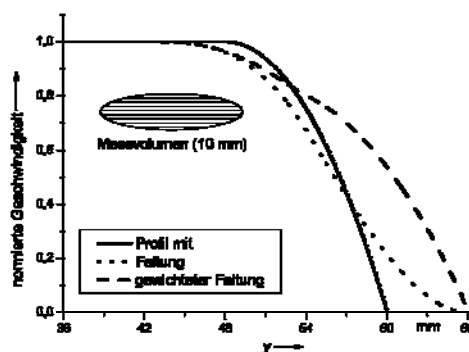


Abb. (3): Simulierte Grenzschichtprofile für den Fall, daß die Ausdehnung des LDA-Meßvolumens in der gleichen Größenordnung wie die Grenzschichtdicke liegt. Durch die endliche Ausdehnung des Meßvolumens wird die Grenzschichtdicke immer zu groß bestimmt.

Vergleicht man das gemessene Grenzschichtprofil aus Abb. (2) b) mit der gefalteten (nicht gewichteten) Funktion aus Abb. (3), so stellt man eine qualitative Übereinstimmung fest. Offenbar ist das Meßvolumen für diese Messung noch zu groß und daher die Ortsauflösung ist nicht ausreichend, so daß das Grenzschichtprofil zu groß bestimmt wurde.

Zwar existieren Korrekturalgorithmen, die es erlauben, aus der gemessenen Grenzschichtdicke die tatsächliche zu bestimmen, jedoch setzen diese a priori die Kenntnis des Grenzschichtprofils voraus. Im vorliegenden Fall ist das Grenzschichtprofil zunächst nicht bekannt, so daß entsprechende Algorithmen hier nicht verwendet werden können.

Dieser Sachverhalt bildet die Motivation für den Einsatz des Laser-Doppler-Profilsensors, der eine gegenüber einem konventionellen LDA deutlich verbesserte Ortsauflösung bietet.

4.) Der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor

Der Laser-Doppler-Profilsensor [5,6,7] stellt eine Erweiterung des konventionellen Verfahrens dar. Anstatt eines Interferenzstreifensystems mit nahezu parallelen Interferenzstreifen werden zwei überlagerte Streifensysteme verwendet, deren Streifen in entgegengesetzter Richtung fächerförmig auseinanderlaufen, siehe Abb. (4). Pro Streupartikel werden zwei Dopplerfrequenzen $f_{1,2}$ ausgewertet, deren Betrag dann neben der Geschwindigkeit auch noch zusätzlich von der axialen Position z abhängt. Für den Fall der Messung bei pigsar wird die optische Achse z entlang der radialen Richtung r ausgerichtet: $z \parallel r$.

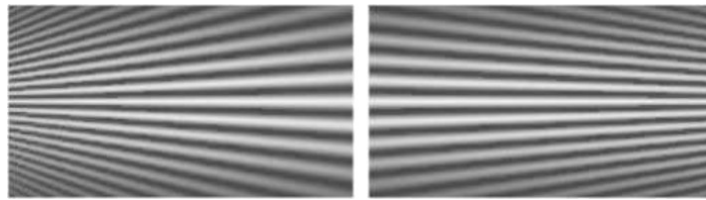


Abb. (4): Entgegengesetzt-fächerförmige Streifensysteme, deren Überlagerung das Meßvolumen des LD-Profilsensors ergeben.

Der Quotient $q(z)$ der beiden Dopplerfrequenzen hängt nun nicht mehr von der Partikelgeschwindigkeit, sondern nur noch von der axialen Position des Streupartikels im Meßvolumen ab; dadurch wird es möglich, diese anhand des Quotienten zu bestimmen:

$$q(z) = \frac{f_2(v_x, z)}{f_1(v_x, z)} = \frac{v_x / d_2(z)}{v_x / d_1(z)} = \frac{d_1(z)}{d_2(z)} \quad (3)$$

Die Partikelgeschwindigkeit ermittelt sich wie auch beim konventionellen LDA aus dem Produkt aus Dopplerfrequenz und Streifenabstand, wobei diesmal der lokale Streifenabstand an der Position z verwendet wird:

$$v_x(z) = f_1(v_x, z) d_1(z) = f_2(v_x, z) d_2(z) \quad (4)$$

Da die Meßunsicherheit der Ortsbestimmung im Submikrometerbereich liegen kann [7], wird eine deutlich höhere Ortsauflösung als beim konventionellen LDA erreicht. Durch Auswerten einer großen Anzahl von Streuteilchen, die statistisch verteilt in der Strömung vorliegen, kann das im Meßvolumen vorherrschende Geschwindigkeitsprofil reproduziert werden. Für die Erfassung der Strömungsgrenzschicht am Austritt der pigsar-Düse ist das Verfahren daher prädestiniert.

Die beiden Interferenzstreifensysteme müssen prinzipiell physikalisch unterscheidbar sein. Im vorliegenden Fall wurde Frequenzmultiplexing (FDM: frequency division multiplexing)

43.6

verwendet. Von den vier Teilstrahlen, die die beiden Interferenzstreifensysteme bilden, wird ein LDA-Teilstrahl direkt verwendet, während die anderen Teilstrahlen mittels akustooptischer Modulatoren (AOM) in ihrer Frequenz erhöht werden. Die Shiftfrequenzen sind so gewählt, daß jedem Streifensystem eine andere Trägerfrequenz zugeordnet ist. Tab. (1) zeigt die verwendeten Shift- und Trägerfrequenzen. Durch Mischen der LDA-Burstsignale mit der jeweiligen Trägerfrequenz und anschließender Tiefpaßfilterung erhält man die beiden Doppelfrequenzen f_1 und f_2 im Basisband. Ausführliche Darstellungen des verwendeten Frequenzmultiplexings finden sich in [8,9].

| LDA-Strahl | rel. Frequenz | Streifensystem | Trägerfrequenz |
|------------|---------------|-----------------|----------------|
| 1. Strahl | 0 | 1. (konvergent) | 120 MHz |
| 2. Strahl | + 120 MHz | | |
| 3. Strahl | + 60 MHz | 2. (divergent) | 20 MHz |
| 4. Strahl | + 80 MHz | | |

Tab. (1): Darstellung des Frequenzmultiplexing (FDM) durch unterschiedliche Shiftfrequenzen der LDA-Teilstrahlen.

Für die Messung am pigsar-Prüfstand wurde ein spezieller Meßkopf entwickelt, der den gestellten Anforderungen und zusätzlich den speziellen Sicherheitsbestimmungen am Prüfstand gerecht wird. Der Meßkopf soll einen Arbeitsabstand von 500-600 mm besitzen und als rein passiver optischer Meßkopf, d.h. ohne elektrische Komponenten, ausgelegt sein. Als Lichtquelle diente ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser im single-frequency Betrieb mit 5 W optischer Ausgangsleistung und 532 nm Wellenlänge (Verdi V5, Fa. Coherent). Da sich der Laser und die Frequenzshift-Einheit im dem zum Prüfraum benachbarten Kontrollraum befinden müssen, ist der Einsatz von 25 m langen Lichtleitfasern erforderlich. Die Fasern sind polarisationserhaltend, um defekt- oder spannungsbedingten Polarisationsdrehungen auf der 25 m langen Strecke entgegenzuwirken und im Meßkopf einen definierten Polarisationszustand zu erhalten. Eine Verschlechterung des Interferenzsignals aufgrund ungünstiger Polarisationszustände wird damit vermieden. Der Meßkopf selbst besteht aus vier einzelnen Auskoppereinheiten, die Linsen zur Strahlfokussierung und Elemente zur Strahljustierung enthalten. Abb. (5) zeigt ein Foto des optischen Meßkopfes. Gegenwärtig wird an einer Erweiterung zur Detektion in Rückwärtstreueichtung gearbeitet.

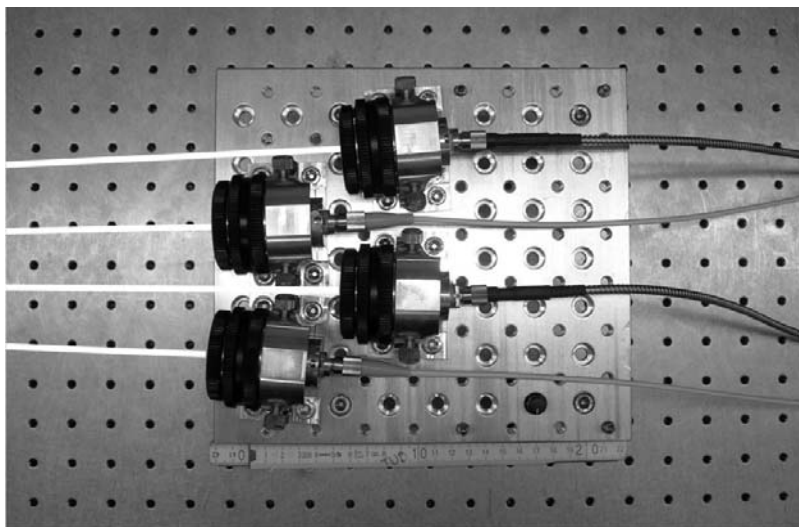


Abb. (5): Faseroptischer Meßkopf mit angedeuteten Laserstrahlen.

Der Meßkopf wurde nicht, wie sonst üblich mit einer großen Sammellinse, die alle Strahlen gleichzeitig fokussiert, sondern mit 4 Einzellinsen ausgestattet. Der Vorteil dieser Anordnung besteht darin, daß Linsenfehler wie sphärische Aberration oder Koma, die bei einem nicht-zentrischen Durchgang durch die Linsen entstehen, vermieden werden. Die gemessenen Beugungsmaßzahlen M^2 der Strahlen liegen im Bereich 1,0 ... 1,3, was eine scharfe, beugungsbegrenzte Fokussierung ermöglicht und den Vorteil dieser Anordnung bestätigt. Die Strahlen verlaufen in einer Ebene (planare Anordnung), schneiden sich 560 mm vor Kante des Meßkopfes (Arbeitsabstand) und bilden dort das Meßvolumen. Als Kalibrierung der Streifenysteme zunächst ohne das Glasfenster sind in Abb. (6) a) die Streifenabstandskurven $d_{1,2}(z)$ dargestellt sowie in Abb. (6) b) die gemäß Gleichung (3) daraus berechnete Quotientenfunktion für die Positionbestimmung.

Die Länge des nutzbaren Meßvolumens beträgt ca. 1 mm. Mit der Steigung der Kalibrationskurve von $0,04 \text{ mm}^{-1}$ läßt sich die Ortsauflösung zu $\sigma_z \approx 13 \text{ }\mu\text{m}$ abschätzen [5].

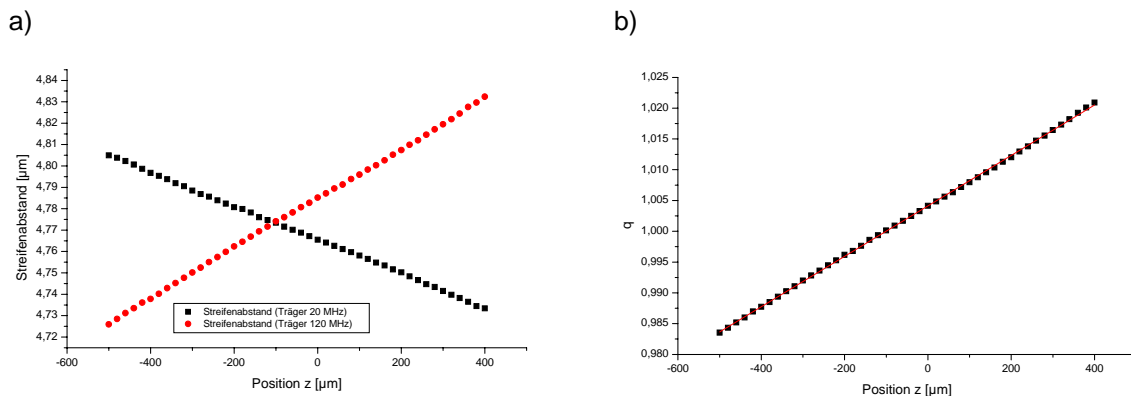


Abb. (6): Kalibrierdaten des Sensors ohne Glasplatte. a) Streifenabstandsfunktion $d_{1,2}(z)$, b) Quotientenfunktion $q(z)=d_1(z)/d_2(z)$ für die Ortsbestimmung.

5.) Einfluß des Glasfensters

Der Kalibrierung des Sensors beim Einsatz am pigsar-Prüfstand kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu, da es beim Durchgang durch das 4 cm dicke Glasfenster zu Strahlverzerrungen und damit zu einer Verschlechterung der Meßeigenschaften kommen kann.

Zur Untersuchung dieses Einflusses wurde eine CCD-Strahlanalysekamera eingesetzt, die vor dem Meßvolumen plazierte wurde. Ohne Glasfenster erscheinen dort die Strahlen als vier separate Punkte, deren Schwerpunkte auf einer Linie liegen. Dieses bestätigt die planare Justage der Laserstrahlen. Führt man das Glasfenster zwischen Meßvolumen und Meßkopf ein, so ist zu erkennen, daß die Strahlschwerpunkte nun nicht mehr auf einer Linie liegen und die Strahlen somit nicht mehr planar verlaufen, siehe Abb. (7)a).

Als Ursache werden fabrikationsbedingte Abweichungen von der Planität des Glasfensters vermutet. Die Verzerrungen können aber offenbar toleriert werden, da Verschiebungen der Strahlen nur gering sind und eine ausreichende Überlappung der Strahlen weiterhin besteht. In der Tat zeigt sich bei der Charakterisierung des Meßvolumens des Profilsensors, daß die Interferenzstreifenysteme insgesamt nur gering beeinflusst werden. Abb. (7)b) zeigt die Kalibrierfunktion $q(z)$ für den Fall ohne Glasfenster, mit gerade in den Strahlengang gestelltem Glasfenster (opt. Achse senkrecht auf der Oberfläche) und mit schräg eingestelltem Glasfenster (äußerer Teilstrahl senkrecht auf der Oberfläche). Durch Einfügen des Glasfensters verschiebt sich das Meßvolumen in axialer Richtung um ca. 13 mm vom Meßkopf weg, was in Abb. (7)b) bereits herausgerechnet wurde. Zwar ändern sich die Verhältnisse der Streifenabstände durch Einfügen des Fensters geringfügig, jedoch bleibt die lineare Kalibrierkurve erhalten und auch deren Steigung (ohne Glasfenster $0,042 \text{ m}^{-1}$, mit geradem Fenster

43.8

$0,043 \text{ m}^{-1}$, mit schrägem Fenster $0,039 \text{ m}^{-1}$), so daß die Positionsbestimmung auch mit Glasfenster eindeutig möglich ist. Die Funktionalität des Profilsensors ist daher weiterhin gewährleistet.

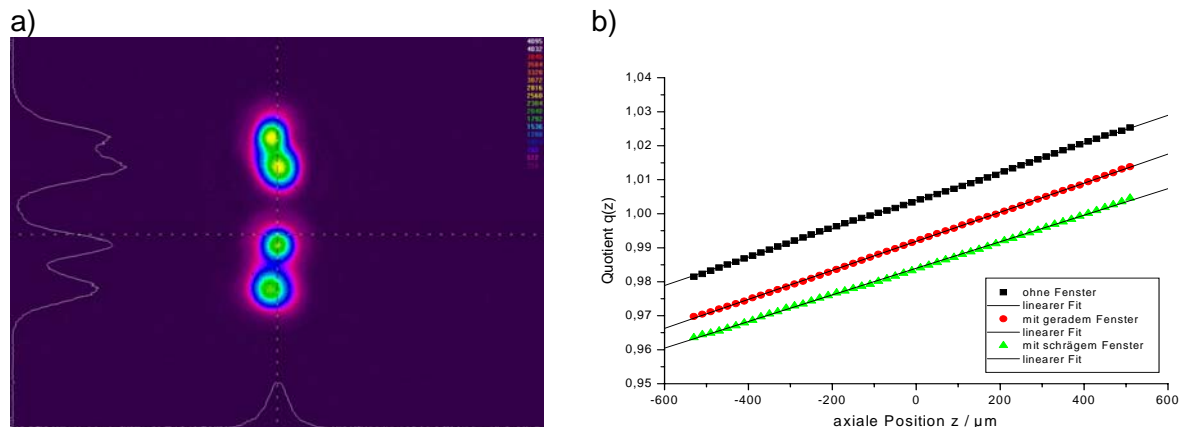


Abb. (7): a) Auftretende Strahlverzerrungen durch das Glasfenster, b) Einfluß des Glasfensters auf die Kalibrierfunktion des Profilsensors mit gerader und schräggestelltem Fenster

6.) Zusammenfassung

Auf dem pigsar-Prüfstand für Hochdruck-Erdgas soll der Durchfluß mittels optischer Meßtechnik mit einer Meßunsicherheit von etwa 0,1 % bestimmt werden. Bisherige Untersuchungen zeigen, daß mit konventionellen LDA diese Anforderung ohne Modellannahmen nicht erfüllt werden kann, da aufgrund der endlichen Meßvolumenausdehnung und der damit verbundenen geringen Ortsauflösung die nur wenige Millimeter breite Grenzschicht des Strömungsprofils nicht mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden kann.

In diesem Beitrag wurde der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor zur präzisen Durchflußmessung an Hochdruck-Erdgas vorgeschlagen. Es wurde ein Meßsystem konzipiert und aufgebaut, welches den gestellten Anforderungen hinsichtlich technischer Spezifikationen und Sicherheitsaspekten genügt. Das Meßsystem verwendet einen passiven, fasergekoppelten optischen Meßkopf, dessen vier Strahlen mit einzelnen Linsensystemen fokussiert und zur Überlagerung gebracht werden, so daß eine beugungsbegrenzte Formung des Meßvolumens erfolgt. Der erste Test des Meßkopfes ergab einen Meßbereich von ca. 1 mm und eine Ortsauflösung von ca. $13 \mu\text{m}$.

Bei der Anwendung wurden Strahlverzerrungen beim Durchtritt durch das Glasfenster festgestellt, die aber nur einen geringen Einfluß auf LDA-Meßvolumen haben. Da die Funktionalität des Profilsensors weiterhin gewährleistet ist, sind alle Anforderungen für einen erfolgreichen Einsatz am pigsar-Prüfstand erfüllt.

Danksagung

Die Autoren danken Andreas Woloschyn für die Konstruktion des Meßkopfes. Die Arbeiten wurden teilweise von Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Projekts CZ 55/18-1 gefördert.

Literatur

- [1] H. Müller, V. Strunck, B. Mickan, R. Kramer, D. Dopheide, H.-J. Hotze, „Optisches Durchflussnormal für HD-Erdgas: Voraussetzungen für einen LDA-Einsatz“, 11. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“, S. 8.1-8.6 , Braunschweig 9.-11. Sept. 2003
- [2] H. Müller, V. Strunck, B. Mickan, R. Kramer, D. Dopheide: “Einsatz der Laser Doppler Anemometrie zur Realisierung eines optischen Durchflussnormals für HD-Erdgas“, 12. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“, S. 58.1-58.6 , Karlsruhe 7.-9. Sept. 2004
- [3] A. Fischer, K. Shirai, L. Büttner, J. Czarske, M. Eggert, H. Müller, „Untersuchungen zur Messunsicherheit eines 2d3k-Doppler-Global-Velozimeters mit Laserfrequenzmodulation“, 14. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“, Beitrag 28, Braunschweig 5.-7. Sept. 2006
- [4] M. Eggert, H. Müller, D. Dopheide, A. Fischer, L. Büttner, J. Czarske, „DGV mit Selbstkalibrierung auf Basis neuer Modulationstechniken“, 14. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“, Beitrag 27, Braunschweig 5.-7. Sept. 2006
- [5] J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller: “Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution”, Meas. Sci. Techn. 13(12), S. 1979–1989, 2002
- [6] J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller, D. Dopheide, S. Becker, H. Lienhart, F. Durst, “Ortsaufgelöste Vermessung turbulenter Scherströmungen mittels Laser-Doppler-Profilesensor”, 11. GALA-Fachtagung “Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik”, S. 1.1-1.8, Braunschweig, 9.-11. Sept. 2003
- [7] L. Büttner, J. Czarske, „Miniaturisierbarer Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor auf der Basis von diffraktiver Mikrooptik“, 12. GALA-Fachtagung “Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik”, S. 1.1-1.7, Karlsruhe, 7.-9. Sept. 2004
- [8] T. Pfister, L. Büttner, K. Shirai, J. Czarske, „Monochromatic heterodyne fiber-optic profile sensor for spatially resolved velocity measurements with frequency division multiplexing“, Applied Optics Vol. 44, No. 13, S. 2501-2510, 2005
- [9] K. Shirai, T. Pfister, L. Büttner, J. Czarske, H. Müller, S. Becker, H. Lienhart, F. Durst, “Highly Spatially Resolved Velocity Measurements of a Turbulent Channel Flow by a Fiber-Optic Heterodyne laser-Doppler Velocity-Profile-Sensor“, Exp. Fluids 40, Nr. 3, S. 473-481, 2006