

DURCHFLUSSMESSUNGEN AM OPTISCHEN NORMAL FÜR ERDGAS UNTER HOCHDRUCK

FLOWRATE MEASUREMENTS AT THE OPTICAL STANDARD FOR NATURAL GAS AT HIGH PRESSURE

Volker Strunck, Bodo Mickan, Norbert Pape, Harald Müller

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

LDA, Grenzschichtsensor, Düsenbeiwert, Erdgas, Durchfluss

LDV, boundary layer sensor, discharge coefficient, natural gas, flow rate

Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt die Verwendung verschiedener Laser Doppler Anemometer (LDA) für die Messung des Durchflusses am optischen Normal für Erdgas unter Hochdruck. Es werden die Messungen aus der Entwicklungsphase präsentiert. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass für die Volumenstrommessung im Standardbetrieb eine Strömungsgeschwindigkeitsmessung in der Kernströmung der LDA-Messdüse praktikabel ist. Mit der Kenntnis der Reynoldszahlabhängigkeit der Grenzschichtprofile durch vorangegangene Messungen und der Ebenheit der Kernströmung wird eine Volumenstrombestimmung mit einer Unsicherheit von ca. 0,3 % für die mittlere Düse von 60 mm Durchmesser und Durchflüsse bis 500 m³/h bereits durch eine Einpunktströmungsgeschwindigkeitsmessung erreicht.

Einleitung

Die Realisierung und Weitergabe der Einheit „Volumen“ für Erdgas unter Hochdruck erfolgt durch die PTB auf dem Prüfstand „pigsar“ der EON-Ruhrgas AG auf der Grundlage einer zwischen der PTB und der Ruhrgas-AG getroffenen Vereinbarung über die Bereithaltung und Verwaltung des nationalen Normals, siehe Mickan et al 2009. Die eingesetzte Rohrprüfstrecke (RPS) ist dabei das Primärnormal, das Durchflüsse bis 480 m³/h zu messen erlaubt. Das optische Normal ergänzt die RPS als staffelloses Verfahren mit Durchflüssen bis 500 m³/h für die mittlere und bis 1600 m³/h für die große Düse. Der Betrieb von LDA in der Ex-Schutzzone II an einer Messkammer mit Drücken von 50 bar bei geringen Messunsicherheiten verlangt spezielle Lösungen, die in diesem Beitrag dargestellt werden.

Prüfstrecke

Die etwa 30 m lange Prüfstrecke (Abb. 1) beginnt mit einer Seeding-Vorrichtung für die Erzeugung von DEHS-Partikeln mittels einer druckgekapselten Laskin-Düse, der eine Einlaufstrecke der Länge von 22 m und vom Durchmesser DN500 folgt, in der sich eine turbulente Strömung entwickelt, die für die Verteilung der Partikel sorgt. Daran angeschlossen wird ein Düsenmodul mit optischem Zugang (grau) für LDA, in das verschiedene Düsen eingesetzt werden können. Ein Sieb vor der Düse entfernt die turbulente Grenzschicht. Nach der Düse kommt ein Diffusor, der in ein Plenum mündet, das über eine Laval-Düsenstaffel das Gas in eine Niederdruckrohrleitung entsorgt. Die kritisch betriebene Düsenstaffel hat die

Aufgabe, den Durchfluss während der optischen Messung stabil zu halten und wird auch als Transfernnormal zur Rohrprüfstrecke genutzt.

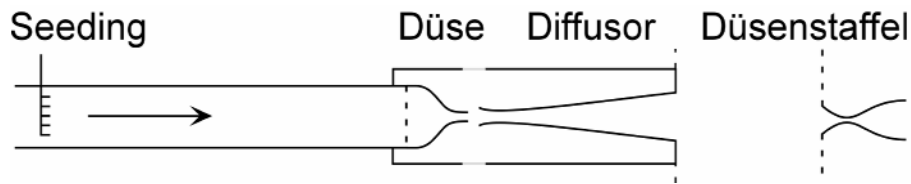


Abb. 1: Schema der Prüfstrecke

Aufbau der LDAs

In der Ex-Schutzzone II kann es vorkommen, dass entzündliche Gase entweichen. Daher musste während der Entwicklungsphase auf eine Elektrifizierung von LDA und Stellelementen verzichtet werden. Die Laserstrahlung reicht für eine Zündung bei der genutzten Leistung und Wellenlänge nicht aus.

Beidseitig der Fenster der optischen Messkammer sind die LDAs A und B auf den Hebebühnen V eines Gestells befestigt, die manuell über Spindeln in drei Achsen gleichzeitig bewegt werden können (Abb. 2). Da beide LDAs Kreuzstrahl-LDAs sind und ihre Messvolumina übereinander liegen, können sie sowohl das vorwärts gestreute Licht wie auch das zurück gestreute Licht aus dem gemeinsamen Messvolumen M empfangen. Die Signalfrequenzen jedoch unterscheiden sich selbst bei gleicher Wellenlänge der Strahlquellen, da das LDA A eine Sendelinse mit der Brennweite von 500 mm und das LDA B die Brennweite von 750 mm hat. Während die optische Achse des LDA B parallel zur Austrittsfläche der Düse ausgerichtet ist, ist das LDA A um den Halbwinkel der sich kreuzenden Strahlen geneigt, so dass ein Strahl auf der optischen Achse des anderen LDAs liegt. Dieser Strahl, der auch als Referenzstrahl genutzt wird, wird über zwei Spiegel S zum Grenzschichtsensor C reflektiert. Der geneigte Beleuchtungsstrahl I enthält 90 % der gesamten Lichtleistung dieses Referenz-Streustrahl-LDAs und verschwindet bei der Messung der Grenzschichten in der Düse.

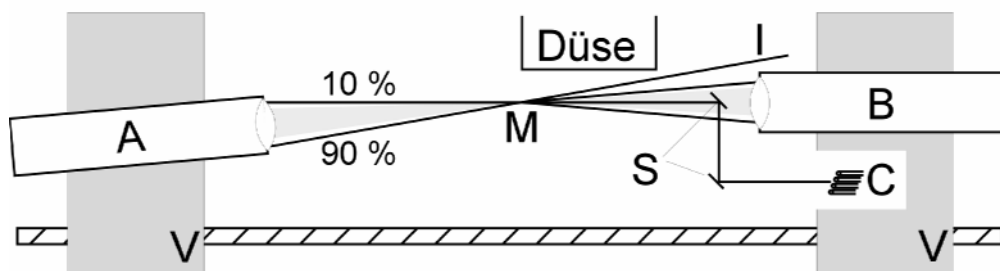


Abb. 2: Schema des LDA-Aufbaus am optischen Prüfstand

Das LDA B im Rückwärtsstreu-Betrieb dient als Kalibriersystem für das geneigte LDA A sowie für den Grenzschichtsensor. Aufgrund der Geometrie ist jedoch eine Strömungsmessung erst 15 mm stromab der Düsenaustrittsfläche möglich. Da sich die Kernströmung bis 20 mm hinter der Düse unverändert zeigt, werden mit diesem LDA auch die Mittengeschwindigkeitsmessungen durchgeführt. An diesem Ort werden das LDA A und der Grenzschichtsensor C kalibriert. Damit kann dann der Verlauf der Mittenströmung zur Düse hin bis 2 mm stromab des Düsenaustritts gemessen werden. Eine Verschiebung des Messvolumens zur Düsenkante hin erlaubt die Messung der Grenzschichten.

Die beiden LDAs werden von der 20 m entfernten Messkabine über einmodale polarisationserhaltende Fasern mit Laserlicht bei 830 nm versorgt. Eine zusätzliche Faser mit rotem Laserlicht ist bei der geometrischen Einrichtung der LDAs hilfreich. Zwei multimodale Emp-

fangsfasern mit einem Kerndurchmesser von $400\ \mu\text{m}$ übertragen die Signale in die Messkabine. Der Grenzschichtsensor nutzt drei Fasern mit einem Kerndurchmesser von $1\ \text{mm}$.

Da das Laserlicht polarisiert ist, muss beim Einsetzen der $42\ \text{mm}$ dicken BK7-Glasfenster darauf geachtet werden, dass das Licht ungedämpft passieren kann, siehe Abb. 3. Die Gewindelöcher für die Montage im Metallring des eingeschmolzenen Glases sind hier eine Ursache von Verspannungen, während sich der veränderbare Druck in der Düsenkammer dagegen nicht auswirkt.

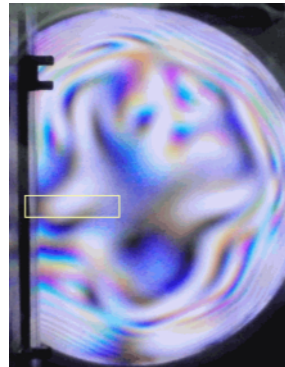


Abb. 3: Polarisationsabhängigkeit der Scheiben mit umrandetem Messbereich

Reduktion der Rohdaten des Grenzschichtensors

Der Grenzschichtsensor, siehe Borys et al, besteht aus vier Glasfasern mit einem Kerndurchmesser von $1000\ \mu\text{m}$, die in einer Reihe in einem Gehäuse vergossen sind. Der Abstand zwischen zwei Fasern beträgt $1035\ \mu\text{m}$. Der größere Kerndurchmesser hat den Vorteil, bei kleinerem Kohärenzkegel mehr Licht zu empfangen, sodass mehr Signale aus der Grenzschicht erhalten werden. Die absolute Phasendifferenz der Signale zweier benachbarter Fasern ermöglicht die eindeutige Ortsbestimmung des Teilchendurchgangs durch das Messvolumen im Bereich von $-\pi$ bis $+\pi$, entsprechend einer Länge von $6\ \text{mm}$. Eine zusätzliche Faser verbessert die Ortsauflösung um den Faktor 2, wobei die Phase dann von -2π bis $+2\pi$ reicht, aber durch die gröbere Phasendifferenz aufgelöst werden kann, siehe Abb. 4.

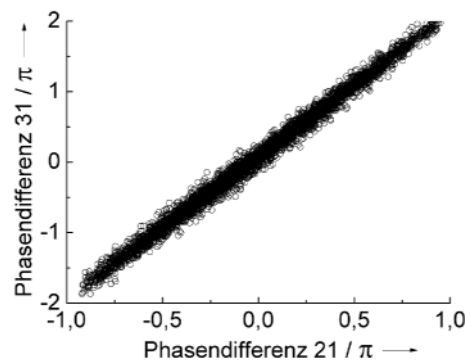


Abb. 4: Phasendifferenzen zwischen den drei Fasern

Außer den Kriterien für die Qualität der Signale wie SNR und Gleichheit der Geschwindigkeit für die drei Signale bietet sich das Phasendifferenzverhältnis zur Unterdrückung von Ausreißern an. Da sich entlang des Messvolumens der Streifenabstand um $0,2\ \%$ / mm ändert, muss dies zusätzlich berücksichtigt werden.

Auswertung der Grenzschichtmessungen

Ziel der Grenzschichtmessungen ist es, die Verdrängungsdicke und damit den Düsenbeiwert für den ausgewählten Durchfluss zu erhalten. Zur Anwendung kommt ein modifiziertes Tangens-Hyperbolicus-Profil:

$$u(y) = U_0 \cdot \tanh \left[k \cdot (y - y_0)^b \right]$$

y ist die Wandkoordinate, u die lokale Geschwindigkeit, U_0 die Mittengeschwindigkeit, k der Verdrängungsfaktor und b ein von H_{12} (Verhältnis von Verdrängungs- zu Impulsverlustdicke) abhängiger Formfaktor. Gegenüber einem Potenzgesetz hat das Profil keine Unstetigkeit im Scheitelpunkt und ist unabhängig vom Düsenbeiwert.

Für jeden Durchfluss wurden etwa 10000 Einzelmesswerte angestrebt, um genügend Werte aus der Grenzschicht zu erhalten. Die Datenrate in der Grenzschicht ist leider sehr gering. Da die Streuteilchen flüssig sind, ist außer der Migration auch eine Wandhaftung und damit Separation möglich. Turbulenz, Teilchenstatistik sowie die Detektionswahrscheinlichkeit des Sensors verhindern eine normale Regression für die Mittelung des Grenzschichtprofils, auch deshalb, weil Ausreißer ein zu großes Gewicht erhalten.

Anstelle eines gleitenden Mittelwerts oder eines Fits für den Geschwindigkeitsverlauf (siehe Abb. 5 links) wird zunächst der orthogonale Abstand der Messwerte (siehe Abb. 5 rechts. Die farbliche Hervorhebung dient nur der besseren Zuordnung der Werte zum Profil) zu einer Schätzfunktion (hier $c_D = 0,99$ und $H_{12} = 2$) ermittelt, siehe Boggs, Byrd und Schnabel 1987. Aus den N Messwerten werden jeweils \sqrt{N} Messwerte als Klasse entlang der Bogenlänge ausgewählt, aus denen durch wiederholten Versatz um $\sqrt{N}/2$ ein gleitender Mittelwert erzeugt wird. (braune Punkte).

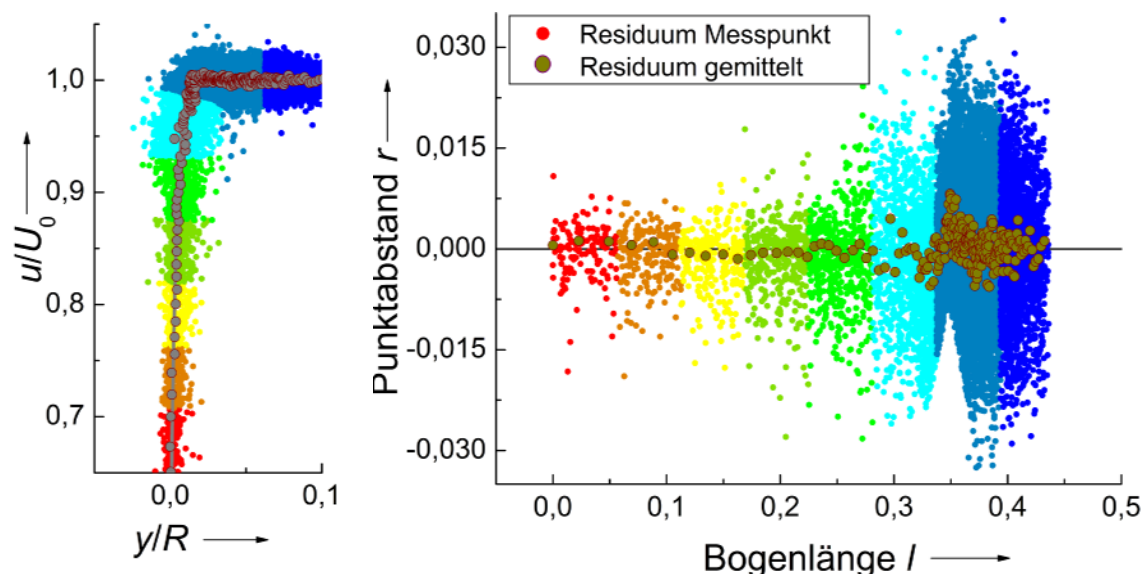


Abb. 5: Messwerte über dem Wandabstand und über dem Abstand zur Schätzfunktion

Die Minimierung der quadratischen Abweichung der Residuen (Least Squares) erwies sich als nicht so erfolgreich durch den großen Anteil an Ausreißern. Zur Minimierung wird daher die Summe

$$\min \sum r_i^2 \quad \text{durch den Median} \quad \min \text{med } r_i^2 \quad \text{ersetzt,}$$

sodass sich der neue Mittelwert aus dem kleinsten Median der quadratischen Residuen (LMS, siehe Rousseeuw 1984) zu diesem Mittelwert innerhalb einer Klasse ergibt. Dies hat außer dem Vorteil einer robusteren Statistik eine erhebliche Reduktion der Anzahl der Daten zur Folge.

Die verbleibenden Mittelwerte werden mit der Schätzfunktion zurück transformiert (dazu addiert), um anschließend mit der modifizierten Tangens Hyperbolicus Funktion gefittet zu werden, siehe Abb. 6).

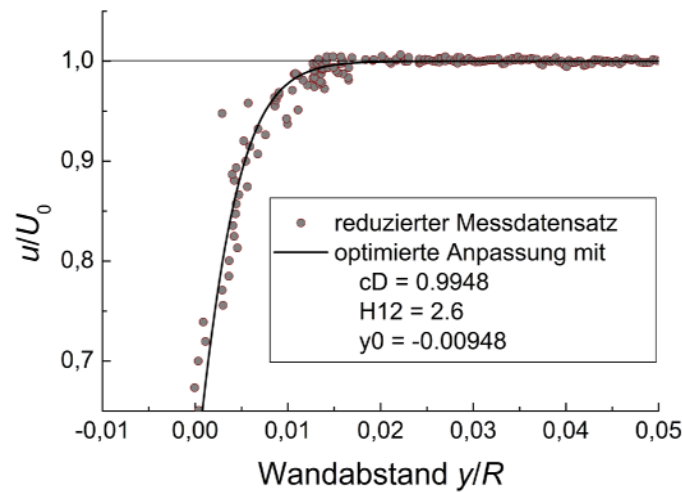


Abb. 6: Gemittelte Klassen über dem Wandabstand mit dem angepassten Profil

Weil der Wandpunkt y_0 mit dem Grenzschichtsensor nicht genau eingestellt werden kann und sich zudem mit dem Gasdruck durch die Änderung des Brechungsindex verschiebt, wurde für die Profile zu einem Druck ein gemeinsamer Wandpunkt bestimmt. Aus den vorläufigen Fits mit gemeinsamen Wandpunkt wurden die Formparameter $b = f(H_{12})$ entnommen und über der Reynoldszahl gefittet.

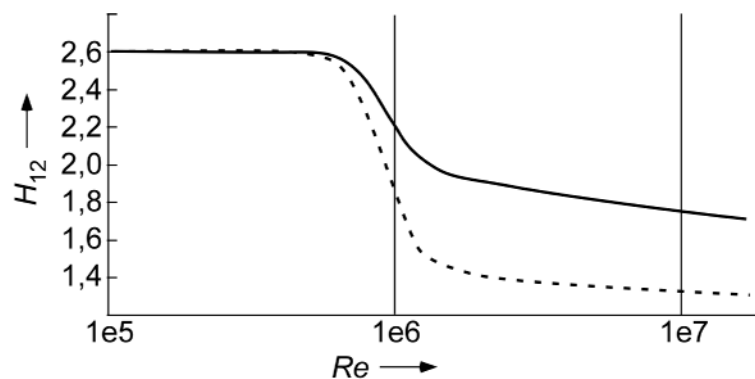


Abb. 7: Formparameter H_{12} über der Reynoldszahl

Im Vergleich zur theoretischen Kurve (gestrichelte Linie) nach Gersten 1997 ergibt sich für den turbulenten Bereich ein nicht so starker Abfall in H_{12} nach der Transition. Mit den nun vorgegebenen Werten für b und y_0 kann das Profil gefittet und der Verdrängungsfaktor k und auch der Düsenbeiwert c_D für die einzelnen Grenzschichten ermittelt werden.

Der Düsenbeiwert c_D vergleicht den gemessenen Durchfluss Q mit dem Durchfluss eines angenommenen zylindrischen Profils im Düsenquerschnitt $A = \pi R^2$ einer reibungsfreien Strömung der Mittengeschwindigkeit U_0 :

$$c_D = \frac{Q}{U_0 A} \text{ und } Q = \int_A u dA = 2\pi \int_0^R u(r) r dr = U_0 2\pi \int_0^{R-\delta_1} r dr = U_0 \pi (R - \delta_1)^2, \text{ wobei}$$

$$\delta_1 = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U_0}\right) dy \text{ und } \delta \text{ die Grenzschichtdicke ist.}$$

Die Annahme der Radialsymmetrie und die Einführung der Verdrängungsdicke δ_1 für einen effektiven Düsenquerschnitt reduzieren den Beiwert auf

$$c_D \approx 1 - 2 \frac{\delta_1}{R}$$

Es wurde eine weitgehende Konsistenz der c_D -Werte aus der LDA-Profilmessung und der Bestimmung über Mittengeschwindigkeit und Durchfluss von *pigsar* (Rückführung auf die RPS) im Bereich von 0,15% erreicht, siehe Abb. 8.

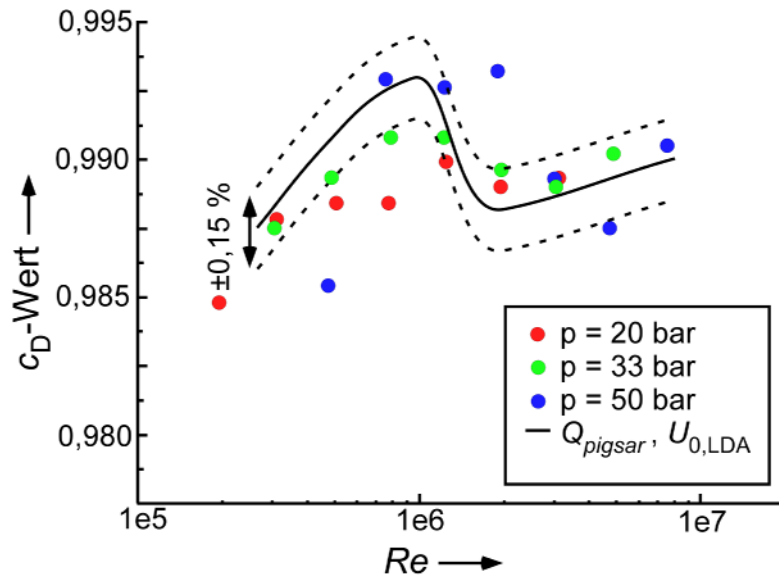


Abb. 8: c_D -Werte aus Profilmessung im Vergleich zu den Werten aus Mittengeschwindigkeitsmessung und Volumenstrom *pigsar*

Ausblick

Der Ansatz über die tanh-Funktion und der orthogonalen Regression auf der Basis des LMS-Schätzers hat sich als sehr effektiv und robust für die Grenzschichtauswertung erwiesen. Das hier benutzte Auswertekonzept hat noch nicht alle Möglichkeiten einer effektiven und stabilen Parametrisierung ausgeschöpft. Hierzu gibt es Ansätze, die aber mehr Rechenzeit benötigen. Diese stabileren Ansätze könnten noch besser begründete Verläufe für H_{12} und die Wandpunkte y_0 liefern. Die angestrebten Unsicherheiten wurden für den hier untersuchten Durchflussbereich erreicht.

Literatur

B. Mikan, B., Kramer, R., Müller, H., Strunck, V., Vieth, Hinze, H.-M., 2009: „Highest Precision for Gas Meter Calibration Worldwide: The High Pressure Gas Calibration Facility *pigsar*TM with Optimized Uncertainty“, 7th ISFFM, August 12 - 14 2009, Anchorage

Borys, M., Strunck, V., Müller, H., Dopheide, D., 2000: „Interferometrische Ortsauflösung der Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Meßvolumens eines Referenzstrahl-LDA“, Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik, 8. Fachtagung, Beitrag 2

Boggs, P.T., Byrd, R.H., Schnabel, R.B., 1987: „A stable and efficient algorithm for nonlinear orthogonal distance regression“, SIAM Journal of Sci. and Stat. Computing, 8 (1987), pp. 1052–1078

Rousseeuw, Peter J., 1984: „Least Median of Squares Regression“, Journal of the American Statistical Association, 79 (388) (1984), 871-880.

Schlichting, H., Gersten, K., 1997, „Grenzschicht-Theorie“, 9. erw. Auflage, Springer, Heidelberg