

Hochauflösender Laser-Doppler-Profilsensor zur Durchflussmessung von Hochdruck-Erdgas

Andreas Voigt*, Lars Büttner*, Jürgen Czarske*, Harald Müller**

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

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

<mailto:Andreas.Voigt@tu-dresden.de>, Internet: <http://eeemp1.et.tu-dresden.de>

Wir berichten über den Einsatz eines fasergekoppelten Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors zur Vermessung von Erdgas-Strömungen bei einem Druck von 50 bar. Im Vergleich zu einem konventionellen Laser-Doppler-Anemometer weist der Profilsensor insbesondere eine deutlich geringere Messunsicherheit der Geschwindigkeit auf.

1 Einführung

In Deutschland gelangen jährlich 110 Milliarden Kubikmeter Erdgas zum Endkunden. Daher ist die präzise Durchflussmessung von Hochdruck-Erdgas von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Mechanische Methoden erreichen bei der Durchflussbestimmung einen Messfehler von 0,16 % und haben den Nachteil, dass sie invasiv sind. Es stellt sich die Frage, ob sich mit optischen Methoden eine ähnliche oder sogar höhere Genauigkeit erreichen lässt.

Doppler Global Velocimetry (DGV) und Particle Image Velocimetry (PIV) sind zwar optische Ganzfeldverfahren, aber die Geschwindigkeitsunsicherheiten (einige Prozent für PIV, ca. 0,5 m/s für DGV) reichen nicht aus.

Mit einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) lassen sich deutlich geringere Geschwindigkeitsunsicherheiten erreichen (ca. 0,5 %), allerdings reichen diese immer noch nicht an die bisher mit mechanischen Methoden erreichten Werte heran. Insbesondere treten beim konventionellen LDA folgende ungewollte Effekte auf:

1. Der Mittelungseffekt, der aus der endlichen Größe des Messvolumens resultiert. Dieser spielt insbesondere bei der Auflösung der Grenzschicht eine Rolle, da im Vergleich zur realen Strömung ein geglättetes Profil gemessen wird.
2. Der Effekt der virtuellen Turbulenz: Das Streifensystem wird idealisiert als parallel angesehen. Das reale Streifensystem ist aber aufgrund der Divergenz der verwendeten gaußschen Strahlen gekrümmt. Der Effekt dieser Krümmung ist eine erhöhte Streuung der Geschwindigkeit.

Der in diesem Beitrag präsentierte Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor ist nicht von diesen Effekten betroffen, da anstelle eines einzelnen

Streifensystems zwei fächerförmige Streifensysteme verwendet werden.

2 Aufbau des Profilsensors

Wie beim konventionellen Laser-Doppler-Anemometer (LDA) beruht die Strömungsmessung beim Laser-Doppler-Profilsensor auf der Detektion von Streulicht, welches von Streuteilchen, die das Messvolumen durchqueren, ausgesendet wird (*Burst-Signal*). Beim herkömmlichen LDA wird das Messvolumen durch das parallele Interferenzstreifensystem zweier sich kreuzender Laser-Strahlen gebildet. Die Geschwindigkeit v eines passierenenden Teilchens berechnet sich aus dem Streifenabstand d und der Frequenz f des Burst-Signals mit $v = f \cdot d$. Die Ortsauflösung ist durch die Größe des Messvolumens vorgegeben.

Der Laser-Doppler-Profilsensor [1] verwendet hingegen zwei unterscheidbare Paare von Laserstrahlen, die im Messvolumen überlagert sind. Die Strahltaillen sind dabei so positioniert, dass sich ein Interferenzstreifensystem mit konvergierenden Streifen und eines mit divergierenden Streifen ergibt (Abbildung 1).

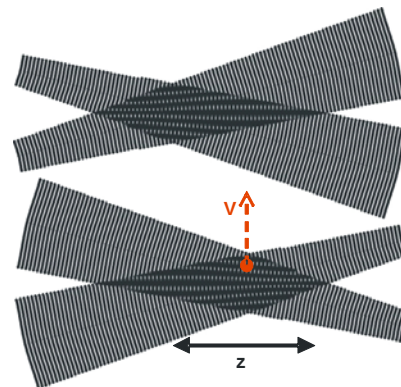


Abbildung 1: Divergierendes und konvergierendes Streifensystem beim Laser-Doppler-Profilsensor. Die Strahlenpaare sind hier getrennt dargestellt.

Ein Teilchen, das das Messvolumen passiert, sendet somit zwei Burstsignale der Frequenzen f_1 und f_2 aus. Aus f_1 und f_2 kann dann gleichzeitig die Geschwindigkeitskomponente v_x und der Ort z . Der Profilsensor ermöglicht somit im Gegensatz zum konventionellen LDA eine Ortsauflösung innerhalb des Messvolumens.

Im vorliegenden Fall musste der Profilsensor für einen Arbeitsabstand > 500 mm konzipiert werden. Aus Sicherheitsgründen musste der Sensorkopf komplett faseroptisch und ohne elektrische Komponenten aufgebaut werden. Das Licht stammte von einem frequenzverdoppelten Nd:YVO₄-Laser mit 5 W Leistung. Die Zuleitung des Lichts fand über vier 30 m lange polarisationserhaltende Fasern statt. Zur Trennung der beiden Streifensysteme wurde ein Frequenzmultiplexing-Schema unter Verwendung von akusto-optischen Modulatoren [2] benutzt. Die Messvolumenlänge betrug 900 μm . Bei der Kalibrierung mit einer Lochblende zeigte der Sensor eine Ortsauflösung von 13 μm und eine Geschwindigkeitsauflösung von $6 \cdot 10^{-4}$.

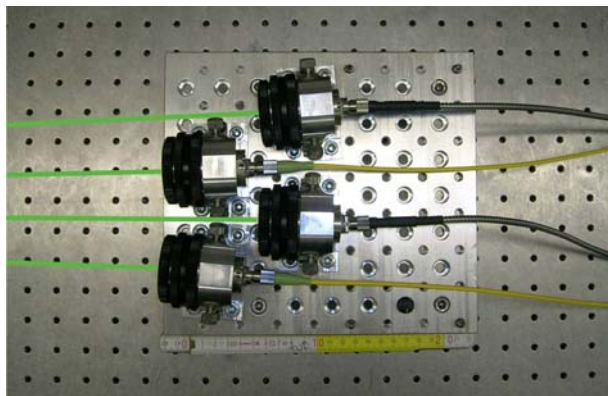


Abbildung 2: Der fasergekoppelte Messkopf. Eingezeichnet sind die vier Sendestrahlen.

3 Ergebnisse

Die Erdgas-Strömung wurde hinter einer Kontraktionsdüse mit einem Durchmesser von 63,6 mm vermessen. Als optischer Zugang dienten zwei gegenüberliegende Borosilikatgläser der Dicke 4 cm. Im selben Aufbau wurden Vergleichsmessungen mit einem konventionellen Laser-Doppler-Anemometer durchgeführt. In beiden Fällen wurde der Sensor mechanisch traversiert. Abb. 3 zeigt das gemessene Profil der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten. In Abb. 4 ist der Turbulenzgrad (relative Standardabweichung der Geschwindigkeit) zu sehen. Das konventionelle LDA ermittelt im inneren Bereich einen Turbulenzgrad, der um einen Faktor 20 höher ist, als der mit dem Profilsensor bestimmte Wert. Dies ist auf den oben genannten Effekt der virtuellen Turbulenz zurückzuführen und äußert sich bei der Bestimmung des Durchflusses in einer erhöhten Unsicherheit.

Die Bestimmung des Durchflusses ergab einen Wert von 153,8 m^3/h bei einer statistischen Mess-

unsicherheit von 0,65 %, wobei die systematische Abweichung vom mit mechanischen Sensoren bestimmten Referenzwert -0,33 % betrug.

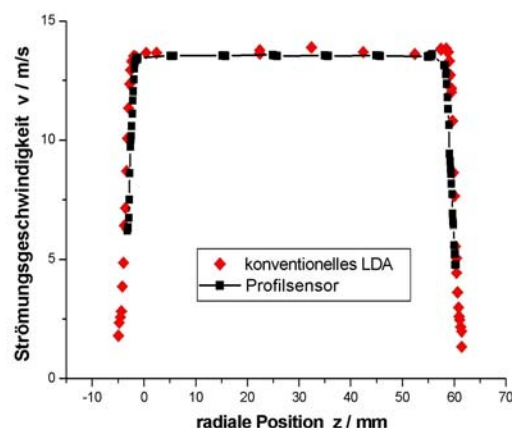


Abbildung 3: Gemessenes Geschwindigkeitsprofil der Düsenströmung

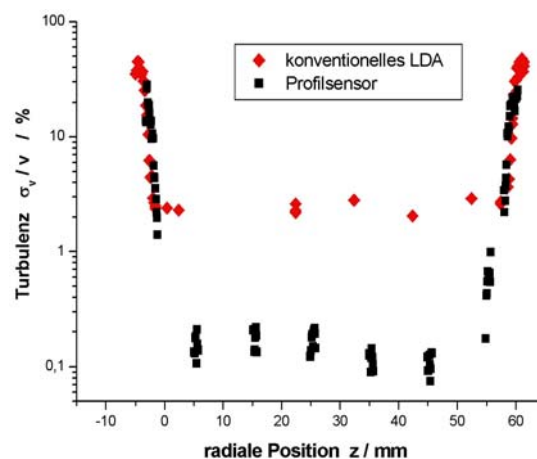


Abbildung 4: Gemessenes Turbulenzprofil der Düsenströmung

4 Zusammenfassung

Die Messung mit dem Profilsensor beseitigt im Vergleich zum konventionellen LDA zwei unerwünschte Effekte: Den Mittelungseffekt und den Effekt der virtuellen Turbulenz. Der geforderte Wert von 0,1 % für die Messunsicherheit mit optischen Methoden scheint erreichbar.

Literatur

- [1] 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): 1979–1989 (2002)
- [2] K. Shirai et al.: "Highly spatially resolved velocity measurements of a turbulent channel flow by a fiber-optic heterodyne laser-Doppler velocity-profile sensor", *Experiments in Fluids* **40**(3): 473 – 481 (2006)