

Optisches Durchflussnormal für HD-Erdgas: Voraussetzungen für einen LDA-Einsatz

¹)Müller, H., ¹)Strunck, V., ¹)Mickan, B., ¹)Kramer, R., ¹)Dopheide, D. ²)Hotze, H.-J.

¹)Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich Gase
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

²)Ruhrgas AG, Betriebsstelle Dorsten, Prüfstand Pigsar
Haltener Strasse 125, 46284 Dorsten

e-mail: harald.mueller@ptb.de

Kurzfassung

Der Beitrag beschreibt den Einsatz der Laser Doppler Anemometrie für die Realisierung eines neuen optischen Durchflussnormals für die Hochdruck-Erdgasmessung. Es wird sowohl auf die Anforderungen an das neue Durchflussnormal als auch auf die notwendigen technischen Voraussetzungen für den Einsatz der Laser Doppler Anemometrie für diesen neuen Anwendungsbereich eingegangen.

1 Einleitung

Die wirtschaftliche Bedeutung der Großgasmengenmessung wird allein an der in Deutschland pro Jahr zum Endkunden geleiteten Erdgasmenge von ca. 100 Milliarden Kubikmetern deutlich. Bedenkt man, daß diese Gasmenge einem Geldwert von über 20 Milliarden Euro entspricht, so kommt der Realisierung und Weitergabe der Volumeneinheit für HD-Erdgas wie auch der Untersuchung von Messunsicherheiten, die selbst bei den besten Hochdruck-Erdgas-Prüfständen unter optimalen Versuchsbedingungen im Bereich von 0,15% bis 0,25% liegen, eine große volkswirtschaftliche Bedeutung zu.

Die Realisierung und Weitergabe der Volumeneinheit für Hochdruck-Erdgas erfolgt durch den Prüfstand "pigsar" der Ruhrgas AG auf der Grundlage einer 1999 zwischen der PTB und der Ruhrgas AG getroffenen Vereinbarung über die Bereithaltung und Verwaltung des nationalen Normals der Bundesrepublik Deutschland. Dieser Prüfstand nimmt aufgrund seines Durchfluss-Überlappungsbereichs mit allen anderen Hochdruck-Erdgasprüfständen in Europa eine Schlüsselposition ein (Bild 1).

Ein wesentlicher Schritt auf dem wissenschaftlichen und metrologischen Gebiet der Einheitenverkörperung besteht im Einsatz neuer wissenschaftlicher Methoden zur Ergänzung der bisher eingesetzten Messtechniken durch die Realisierung eines neuen unabhängigen Verfahrens für die Hochdruck-Erdgasmessung.

8.2

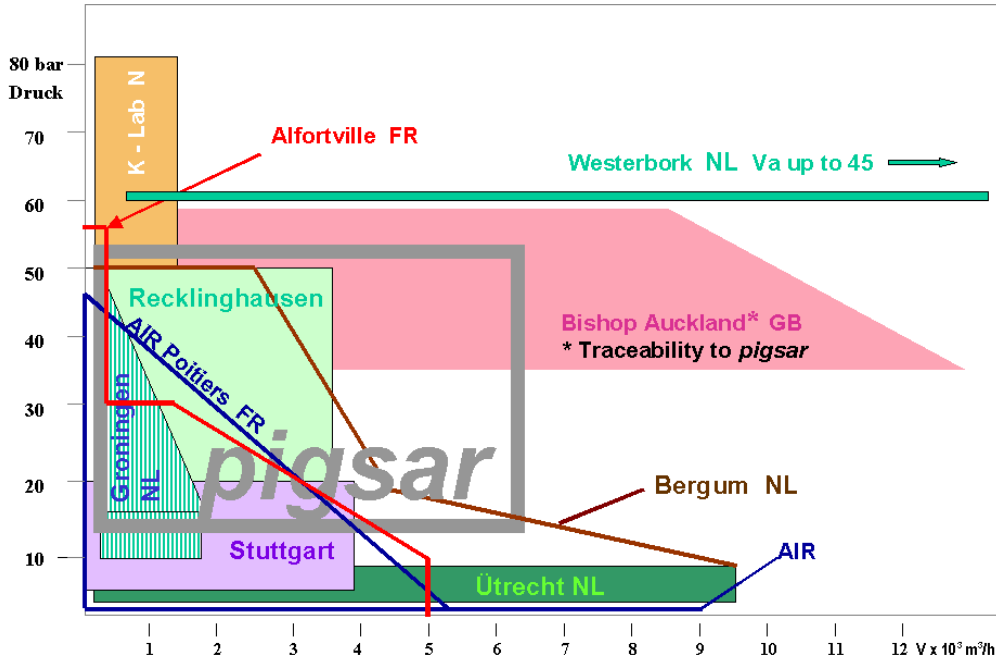


Bild 1: Durchfluss-Überlappungsbereich des Prüfstands "pigsar" mit anderen europäischen Hochdruck-Erdgasprüfständen

Als Ergänzung zu dem existierenden Nationalen Normal für Hochdruck-Erdgas "pigsar" mit konventioneller Messtechnik soll jetzt ein optisches Verfahren auf Basis der Laser-Doppler-Anemometrie eingeführt werden, welches es erstmals erlaubt, kleine und große Gasmengen in einem einzigen Schritt bei allen Druckstufen direkt mit einer angestrebten Unsicherheit von 0,1 % zu messen. Das neu aufzubauende optische Durchflussnormal soll weiterhin dazu beitragen, Messunsicherheiten bei der Darstellung und Weitergabe des "Erdgaskubikmeters" metrologisch unabhängig von den bisherigen Kalibrierschritten beurteilen und Diskrepanzen zwischen verschiedenen nationalen Erdgas-Normalen aufklären zu können.

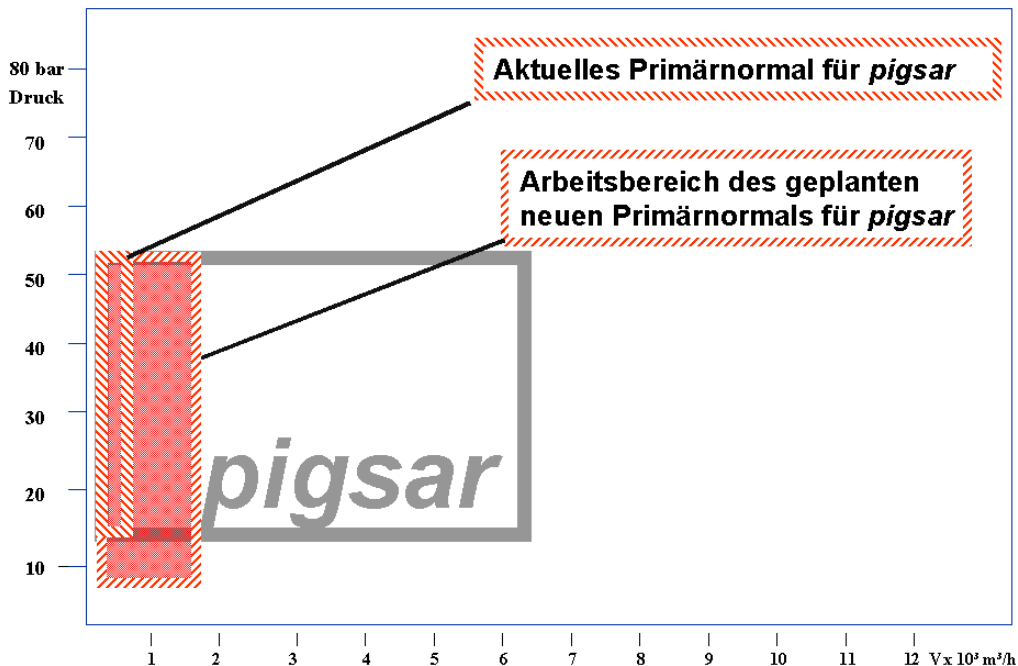


Bild 2: Erweiterung des aktuellen Primärnormals durch das neue optische Durchflussnormal

Im Vergleich zu der bisher eingesetzten Rohrprüfstrecke (RPS) [4, 5], die als Primärnormal das Bezugsnormal für die Weitergabe der Volumeneinheit von Hochdruck-Erdgas bei dem Nationalen Normal "pigsar" darstellt und Kalibrierungen für Durchflüsse über 480 m³/h nur über Staffelfverfahren erlaubt, soll das optische Durchflussnormal die Möglichkeit bieten, erstmals ohne Staffelfverfahren durch eine direkte Kalibrierung den Arbeitsbereich des Nationalen Normals "pigsar" für Durchflüsse über 480 m³/h und Drücke von 8 bis 50 bar zu erweitern (siehe Bild 2).

Bei der Auslegung des optischen Durchflussnormals wird von den Erfahrungswerten mit dem PTB-LDA-Forschungsprüfstand zur genauen Durchflussmessung (Volumen und Massedurchfluss) von Gasen (Luft unter atmosphärischem Druck) ausgegangen [1, 2, 3]. Die Übertragung dieses fundamentalen Messverfahrens auf die Hochdruck-Erdgas-Messung für Drücke bis 50 bar stellt für den LDA-Einsatz eine technische Herausforderung dar, die sich von der Auslegung eines geeigneten Hochdruck-Partikelgenerators über die Konstruktion der optischen Messkammer mit hochdruckfesten Messfenstern bis zur Kalibrierung des Laser-Doppler Anemometers unter Berücksichtigung von Messfenstereinflüssen erstreckt.

2 Grundprinzip

Das Prinzip der Durchflussmessung mittels Laser-Doppler-Anemometer (LDA) geht unmittelbar auf die Definition des Volumenstroms zurück: Ist in einem Querschnitt der Fläche F die Geschwindigkeitskomponente u des Gases senkrecht auf der Fläche F bekannt, ergibt sich der Volumenstrom q_v pro Zeiteinheit durch die Querschnittsfläche F aus der Integration der Geschwindigkeit über die Fläche F :

$$q_v = \int_F u \, dF \quad (1)$$

Zur messtechnischen Vereinfachung wird die Geschwindigkeit des Gases über der kreisförmigen Austrittsfläche einer rotationssymmetrischen Düse gemessen. Kann man die Rotationssymmetrie der Düsenströmung voraussetzen, läßt sich die Messung auf die Messung des Geschwindigkeitsprofils über einen Düsenradius r von der Düsenmitte bei $r = 0$ bis zum Düsenrand bei $r = R_{\max}$ beschränken: Die Integration des Volumenstroms nach Gleichung (1) vereinfacht sich zu:

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

Mit Hilfe des LDAs wird das Geschwindigkeitsprofils über einen Düsenradius gemessen werden. Ein entscheidender Vorteil des LDA-Einsatzes ist die Möglichkeit, *absolute* Geschwindigkeiten nach Grundgleichung (3) zu messen:

$$u = \Delta x f_D \quad (3)$$

8.4

Mit der Kalibrierung des LDAs (Messung des Interferenzstreifenabstandes Δx) und der Messung der Frequenz f_D der LDA-Signale erhält man absolute Werte für die Geschwindigkeit u . Damit liefert die Volumenstromberechnung nach Gleichung (2) ebenfalls absolute Werte, die keiner weiteren Kalibrierung bedürfen. Es handelt sich somit um ein Fundamentalverfahren, das die Volumenstrommessung auf die SI-Einheiten Länge und Zeit zurückführt.

Durch zusätzliche Erfassung der thermodynamischen Zustandsgrößen des Gases (Druck, Temperatur, Feuchte) kann die Dichte ρ berechnet und damit nach Gleichung (3) auch der Massestrom q_m des Gases bestimmt werden:

$$q_m = 2\pi \int_{r=0}^R u(r) \rho(r) dr \quad (3)$$

3 Technische Realisierung

Das Herzstück des neuen optischen Durchflussnormals bildet das LDA-Düsen-Messfenster-Modul (siehe Bild 5), das den optischen Zugang für die LDA-Geschwindigkeitsprofilmessung über einer kreisförmigen Düsenaustrittsfläche ermöglichen soll. Das Modul ist für drei Düseneinsätze mit unterschiedlichen Kontraktionsverhältnissen ausgelegt, um für unterschiedliche Durchflussbereiche am Düsenaustritt maximale Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 40 m/s zu erhalten. Dementsprechend wurden drei Düsen konzipiert (siehe Bild 3).

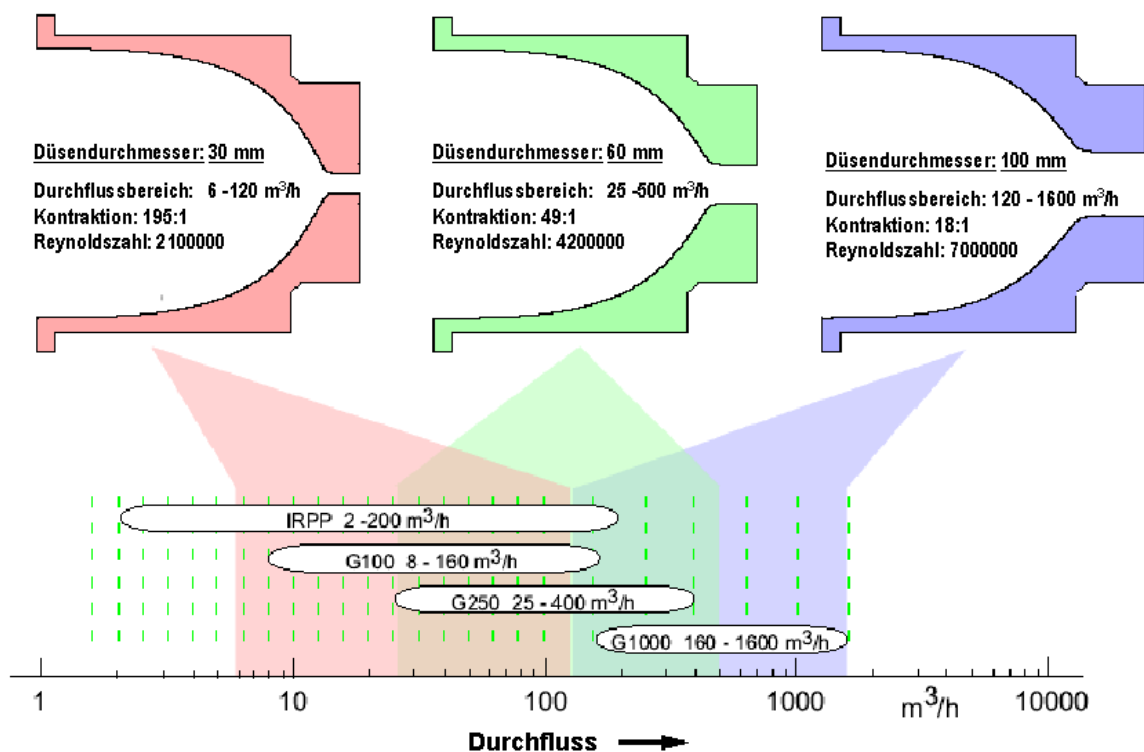


Bild 3: Für unterschiedliche Durchflussbereiche optimierte Düsen

Für die Berechnung der Düsenkonturen wurden modifizierte Börger-Düsen zugrunde gelegt, um in der Düsenaustrittsfläche möglichst kastenförmige Geschwindigkeitsprofile mit minimalen Grenzschichtdicken zu erhalten (siehe Bild 4).

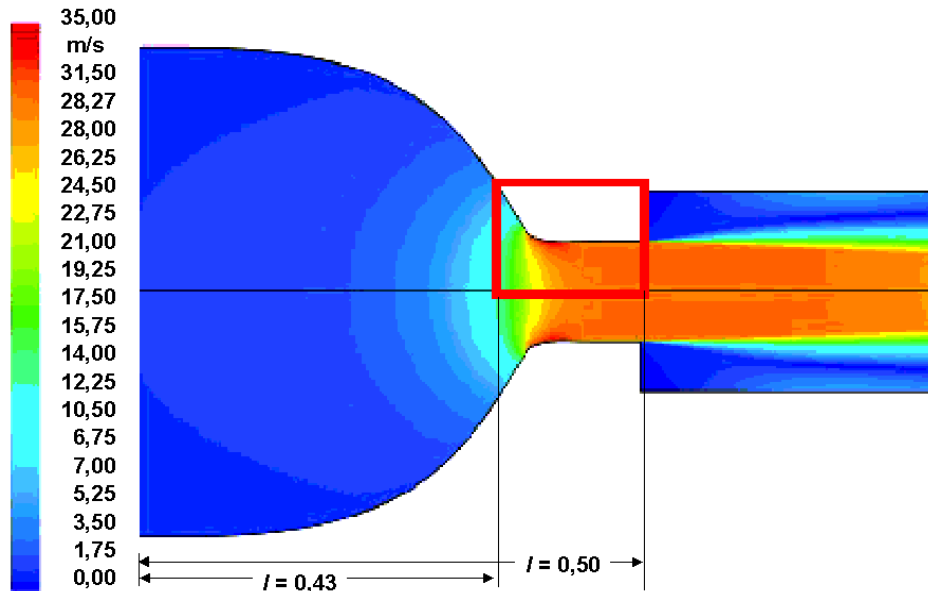


Bild 4: Strömungsgeschwindigkeitsfeld in der LDA-Düse (Dr. Schmücker, Ruhrgas AG)

Die Strömungsgeschwindigkeitsmessung soll zunächst mit einem punktwise messenden LDA-System erfolgen, das unter Berücksichtigung der Messfenserscheibeneinflüsse kalibriert wird (zu künftigen Kalibriermöglichkeiten siehe Gala-Beitrag: Strunck et al., "Interferometrische LDA-Messvolumenkalibrierung"). Bild 5 zeigt die schematische Darstellung des LDA-Messfenster-Moduls.

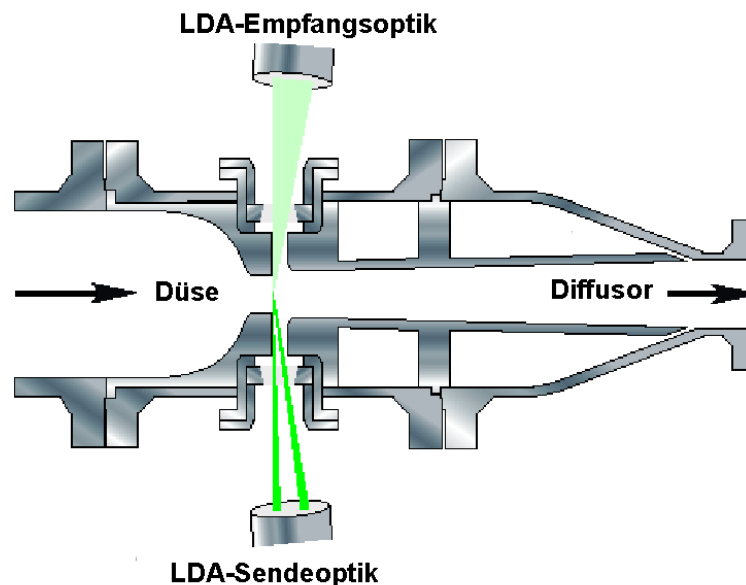
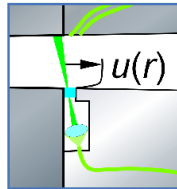


Bild 5: Schematische Darstellung des LDA-Düsen-Messfenstermoduls

8.6

Für künftige Strömungsprofilmessungen an der LDA-Düse sind auch neue LDA Techniken auf der Basis von faseroptischen Liniensensoren (siehe Gala Beitrag: Buschmann et. al. "Faseroptischer LDA-Liniensensor mit hoher Ortsauflösung") angedacht, die eine Messung des Strömungsprofils ohne Traversierung des LDA-Messkopfs bei vereinfachtem optischen Zugang ermöglichen (siehe Bild 6).

Empfänger: Monomode-Glasfasern



LDA-Sendeoptik

Bild 6: Konzept für einen LDA Profil-/Liniensensor mit rein faseroptischem Zugang für eine Profilmessung ohne LDA-Traversierung durch Auswertung der Phasenbeziehung der LDA-Signale zweier Monomode-Empfangsfasern

4 Zusammenfassung

Die Laser-Doppler-Anemometrie wird als Präzisionsmessverfahren für die Realisierung eines neuen optischen Durchflussnormals vorgestellt. Hierdurch stehen zwei voneinander unabhängige Fundamentalmesseinrichtungen für vergleichende Untersuchungen zur metrologischen Darstellung des Volumendurchflusses für Erdgas unter Hochdruck zu Verfügung. Insbesondere läßt sich durch das neue optische Durchflussnormal der Arbeitsbereich der derzeitigen Fundamentalmesseinrichtung des nationalen Durchflussnormals für Erdgas unter Hochdruck für die Darstellung und Weitergabe der Einheit Volumendurchfluss bezüglich Druck- und Durchflussbereich erweitern ohne Staffelfverfahren einsetzen zu müssen.

5 Literatur

- [1] D. Dopheide, G. Taux, E.-A. Krey: Entwicklung eines neuen fundamentalen Meßverfahrens zur genauen Durchflußmessung von Gasen mittels Laser-Doppler-Anemometrie, PTB-Mitteilungen 100 5/90, S. 333 - 342, 1990
- [2] D. Dopheide, V. Strunck, E.-A. Krey: Einsatz eines 3-Komponenten Laser-Doppler-Anemometers für die on-line Präzisionsdurchflußmessung von Gasen, PTB-Mitteilungen 102 4/92, S. 267 - 281, 1992
- [3] D. Dopheide: Neue Halbleitermessverfahren für komplexe Strömungen, Habilitationsschrift eingereicht beim Fachbereich Maschinentechnik Universität-Gesamthochschule Siegen, 1995
- [4] O. Brandt, G. Schmitz, J. Kämper: Erfahrungen mit der Rohrprüfstrecke als neues Urnormal der Bundesrepublik Deutschland zur Überprüfung von Gaszählern unter Hochdruck, gwf-gas/erdgas 133 (1992) Nr. 3, S. 168 - 174, 1992
- [5] M. Kronenberger, R. Erbeck: Einsatz der Fundamentalmeßapparatur Rohrprüfstrecke auf dem Hochdruckgaszählerprüfstand der Ruhrgas AG in Dorsten, Gas Wärme international, Band 43 (1994) Heft 10, S. 496 -504, 1994