

Vollflächige Erfassung von ungestörten und gestörten Geschwindigkeitsverteilungen in Rohrleitungen mittels der Laser-Doppler-Velocimetrie

*Ulrich Müller, OPTOLUTION GmbH, Reinach, Schweiz,
Michael Dues, INTELLIGENT LASER APPLICATIONS GmbH, Jülich,
Henri Baumann, Schweizer Bundesamt für Metrologie (METAS), Bern-Wabern,
Schweiz*

Manuskripteingang: 22. Januar 2007; zur Veröffentlichung angenommen: 15. März 2007

In dem Beitrag werden Geschwindigkeitsverteilungen über dem gesamten Querschnitt von durchströmten Rohrleitungen vorgestellt, die mittels der berührungslosen Laser-Doppler-Velocimetrie (LDV) gemessen wurden. Das weitgehend automatisierte Messregime basiert auf der Nutzung spezieller modularer Fensterkammern zur Gewährleistung der optischen Zugänglichkeit bei minimaler Beeinflussung der Strömung und einer dreidimensionalen Strahlverfolgungsrechnung mit Iteration. Es werden die Primär- und Sekundärströmungen quasi-ungestörter und gestörter Strömungszustände erfasst. Die Messungen erfolgen im Rahmen von Untersuchungen zum Nachweis und zur Optimierung der Strömungsverhältnisse von Kalibrier-Prüfständen für Durchfluss-Sensoren sowie der Verringerung der Empfindlichkeit dieser Messgeräte gegenüber Installationseffekten.

Schlagwörter: Strömungsverhältnisse in Rohrleitungen, Laser-Doppler-Velocimetrie, Kalibrier-Prüfstände, Durchfluss-Sensoren, Installationseffekte

Completely Detection of Disturbed and Undisturbed Flow Conditions in Pipes with Laser Doppler Velocimetry

Velocity distributions of pipe flows acquired in cross sections by Laser Doppler Velocimetry (LDV) are presented. The mostly automated measuring system consists of a so called "window chamber" allowing an extensive optical access with minimum flow disturbance and a three-dimensional iterative beam calculation. Primary and secondary flow structures are presented for disturbed and undisturbed flow conditions. The measurements are part of investigations for the optimization of volume flow calibration test facilities. The minimization of the influence of installation effects on flow meters is as well part of the project.

Keywords: Flow conditions in pipes, laser Doppler velocimetry, test benches for calibration, flow sensors, installations effects

1 Einleitung

Informationen über die Strömungsverhältnisse in Rohrleitungen sind von vielfältigem Interesse. Zwei ausgewählte Gebiete aus dem Bereich der Durchfluss-Messtechnik sind der Nachweis und die Optimierung der Strömungsverhältnisse von Kalibrier-Prüfständen für Durchfluss-Sensoren sowie die Verringerung der Empfindlichkeit dieser Messgeräte gegenüber sogenannten Installationseffekten. Im ersten Fall sind quasi-ungestörte Geschwindigkeitsverteilungen, im zweiten Fall gestörte Geschwindigkeitsverhältnisse messtechnisch zu erfassen.

Die Laser-Doppler-Velocimetrie (LDV) ist ein bekanntes berührungsloses Messverfahren zur Erfassung lokaler Geschwindigkeiten von Fluiden. In Rohrleitungen werden aufgrund der beschränkten optischen Zugänglichkeit bisher häufig nur Profile der Geschwindigkeiten entlang von einzelnen Pfaden gemessen. Die örtlich hochaufgelöste Erfassung von Geschwindigkeitsfeldern zur Bewertung der Strömungsverhältnisse ist damit nur bedingt möglich. Es besteht daher das dringende Bedürfnis nach einem praxistauglichen Messregime zur effizienten Erfassung der Primär- und Sekundärströmung über dem gesamten Rohrquerschnitt.

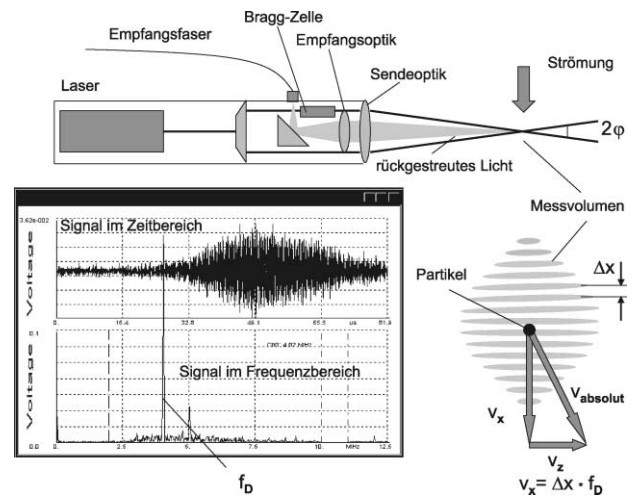


Bild 1: LDV-Messprinzip.
Figure 1: LDV measuring principle.

2 Messprinzip und Messregime

2.1 Messprinzip

Bei dem Messverfahren der Laser-Doppler-Velocimetrie werden mindestens zwei Laserstrahlen zum Schnitt gebracht. Im Schnittvolumen entsteht ein Interferenzstreifenmuster. Durchquert ein Partikel (Luftblase, Streuteilchen oder andere Inhomogenität) dieses Hell-Dunkel-Muster, wird das Laserlicht gestreut und moduliert. Die mit Photodetektoren empfangene Frequenz des gestreuten Lichtes ist direkt proportional zur Geschwindigkeit des Partikels im Messpunkt. Bei Schlupffreiheit zwischen Partikel und Fluidgeschwindigkeit kann somit die punktuelle Geschwindigkeit in Fluiden räumlich hochaufgelöst und mehrdimensional bestimmt werden. In Bild 1 ist das Messprinzip grafisch verdeutlicht, das Bild 2 zeigt ein vergrößertes Interferenzstreifenmuster im LDV-Messvolumen.

Die gemessene örtliche Geschwindigkeit ergibt sich gemäß Gleichung (1):

$$v = \Delta x \cdot f_D = \frac{\lambda}{2 \sin \varphi} \cdot f_D \quad (1)$$



Bild 2: Interferenzstreifenmuster im LDV-Messvolumen.
Figure 2: Pattern of interference fringes in the LDV measuring volume.

mit:

- v örtliche Geschwindigkeit
- Δx Interferenzstreifenabstand
- f_D Doppler-Frequenz
- λ Laserlicht-Wellenlänge
- φ halber Schnittwinkel der Laserstrahlen

Die Proportionalitätskonstante Δx entspricht dem Abstand der Interferenzstreifen im Messvolumen und lässt sich hochgenau berechnen und experimentell nachprüfen. Für weiterführende Informationen zum Messprinzip sei z. B. auf [1] verwiesen.

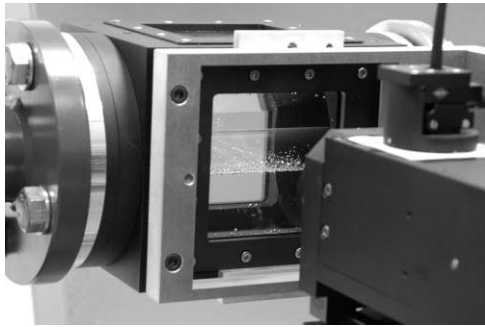


Bild 3: Fensterkammer mit druckentlastetem Glasrohr.
Figure 3: Window chamber with balanced glass pipe.

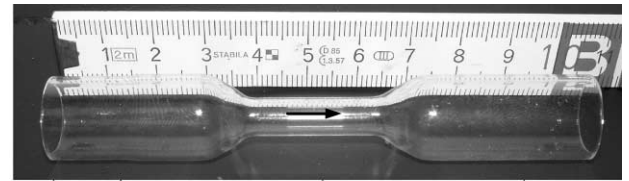


Bild 5: Glasrohr mit Venturi-Rohr-Kontur und Messpositionen.
Figure 5: Glass pipe with Venturi pipe shape and measuring positions.

$D = 13,5 \text{ mm}$
 $d = 5,4 \text{ mm}$
 $D/d = 2,5$

2.2 Messregime

Die Geschwindigkeitsverhältnisse der Primär- und Sekundärströmung werden vollflächig über dem gesamten Strömungsquerschnitt erfasst. Hierzu werden spezielle modulare Fensterkammern, eine geeignete dreidimensionale Strahlverfolgungsrechnung mit Iteration, ein spezielles Messregime zur aufwandsoptimierten Erfassung der Strömungsverhältnisse sowie ein zuverlässiges robustes LDV-System eingesetzt.

Die Fensterkammer besteht aus einem druckentlasteten Glasrohr, vier Planfenstern und dem Grundkörper mit den jeweiligen Flanschen. Das einzusetzende Glas-

rohr kann durch die gewählte Konstruktion exakt an den Durchmesser der Messstrecke angepasst werden. Die in Bild 3 gezeigte Fensterkammer ist so z. B. für Messstrecken von DN 15 bis DN 50 einsetzbar.

Die Strahlverfolgungsrechnung berücksichtigt den im Strahlengang vorhandenen Versatz, der durch die Brechungseffekte der gekrümmten Oberflächen und durch die unterschiedlichen Materialien im Strahlengang bedingt ist, sowie ggf. die Veränderung der Interferenzstreifenabstände. Die Messorte für die LDV-Messungen im Glasrohr können an beliebigen Stellen angeordnet werden, um eine zweckmäßige Optimierung der Signalverarbeitungsparameter und geringste Verfahrenswege

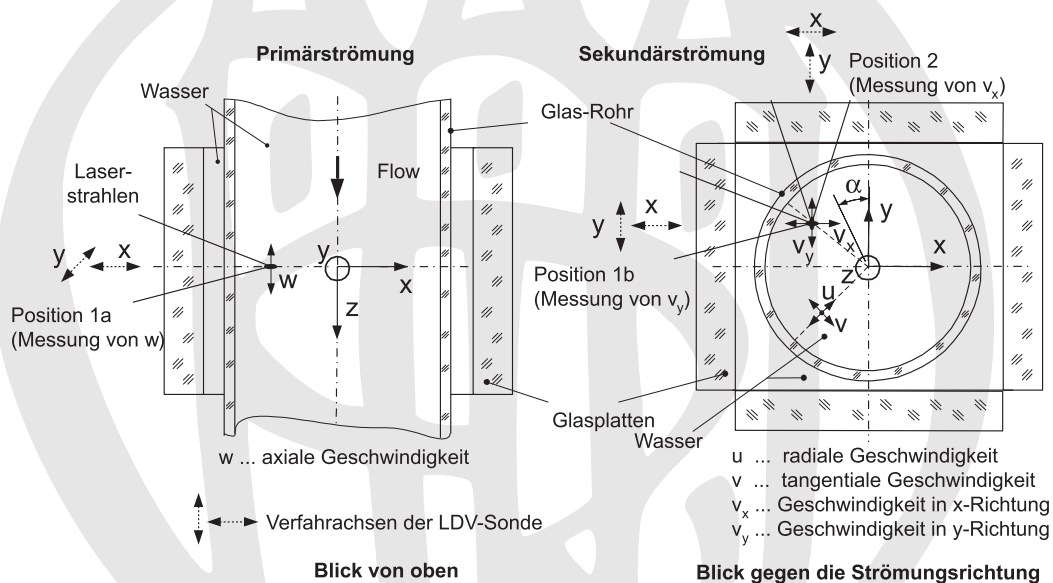


Bild 4: Messregime zur Erfassung der Primär- und Sekundärströmung.
Figure 4: Measuring sequence for the detection of primary and secondary flow.

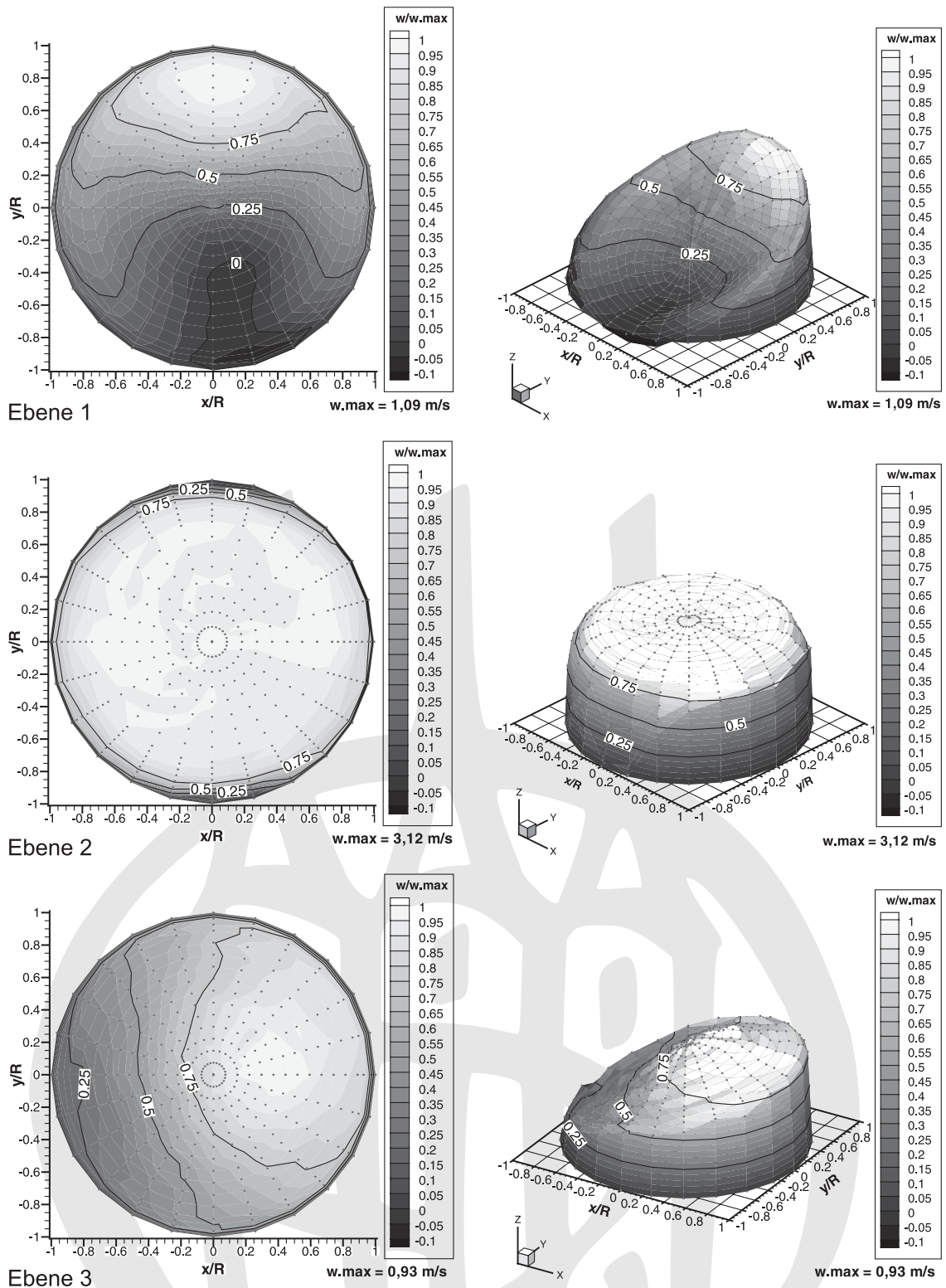


Bild 6: Verteilungen der axialen Geschwindigkeit in drei Messebenen der Venturi-Rohr-Geometrie (Fluid Wasser, $T_W = 10^\circ\text{C}$, $Re = 4800$, 385 LDV-Messpunkte im Strömungsquerschnitt).

Figure 6: Distribution of the axial velocity in the three measuring planes of the Venturi pipe geometry (Fluid Water, $T_W = 10^\circ\text{C}$, $Re = 4800$, 385 LDV measuring points in the flow cross-section).

der Traversierungen realisieren zu können. Die Anzahl der Messpunkte im Rohrquerschnitt ist frei wählbar, wird aber in der Praxis durch die Zeitdauer für die Messung begrenzt. Die örtliche Auflösung ist nur durch die Größe des LDV-Messvolumens in Relation zum Rohrquerschnitt limitiert.

Das Messregime basiert auf der Verwendung eines LDV-Systems zur Erfassung einer Geschwindigkeitskomponente (1D-System). Gemäß Bild 4 wird die Verteilung der axialen Geschwindigkeiten rechtwinklig zur Durchmessersebene durch seitliche Positionierung der LDV-Messsonde (Position 1a) und Verschiebung der Sonde (und somit des Messvolumens) in Richtung der optischen Achse (x -Achse) und in dazu rechtwinkliger Richtung (y -Richtung) gemessen. Somit entfällt der sonst übliche Wechsel der Position der Messsonde entlang dem Rohrumfang. Anschließend kann in gleicher Weise die Geschwindigkeitsverteilung in der Durchmessersebene in Querrichtung y unter Beibehaltung der seitlichen Sondenposition durch Drehung der LDV-Messsonde um 90° erfasst werden. Die Geschwindigkeitskomponente in Querrichtung x wird durch einen Wechsel der Position der Messsonde (Position 2) um 90° am Rohrumfang zugänglich. Aus den gemessenen v_x - und v_y -Komponenten können die tangentialen und radialen Geschwindigkeiten leicht berechnet werden.

Dieses Messregime bietet folgende wesentliche Vorteile:

- Traversierungen der LDA-Sonde nur noch in x - und y -Richtung
- erleichterte Erfassung des gesamten Rohrquerschnittes
- erhebliche Reduzierung von Messaufwand und Messzeit sowie
- gute Automatisierbarkeit.

Für die weitgehend automatisierten Messungen wird ein robustes LDV-Messsystem der Firma Intelligent Laser Applications (ILA) GmbH eingesetzt. Die LDV-Messsonde beinhaltet als Lichtquelle einen Nd-YAG-Laser und erlaubt die Erkennung des Richtungssinnes der Geschwindigkeit. Das gesamte Messsystem ist äußerst zuverlässig, kompakt und transportabel.

Die Bilder 5 und 6 zeigen eine Anwendung dieser weiterentwickelten LDV-Technologie bei Messungen in einer von Wasser durchströmten kleinen Venturi-Rohrkontur. In drei Messebenen des Glasrohres werden die Verteilungen der axialen Geschwindigkeiten nach einer vorgeschalteten Pumpe gemessen. Deutlich erkennbar sind die bekannte strömungskonditionierende Wirkung der Querschnittsverengung sowie die hohe erreichbare örtliche Auflösung selbst in kleinen Rohrdurchmessern mit großer Rohrwand-Krümmung.

3 Ungestörte Strömungszustände

Die Kalibrierung von Messgeräten für den Volumenstrom bzw. das Volumen (Durchfluss-Sensoren) erfolgt bei den Herstellern auf speziellen Prüfständen, die möglichst definierte Strömungsverhältnisse am Einbauort der Prüflinge in der Messstrecke aufweisen sollen. In der Regel werden rotationssymmetrische, voll ausgebildete und drallfreie Geschwindigkeitsverteilungen in der Messstrecke angestrebt. In neuen Normen für Durchfluss-Sensoren (z. B.: EN 1434-2006 für Wärmezähler [2]) werden für die Kalibrierungen derartige ideale Strömungsverhältnisse gefordert. Für die anschließende Analyse und die Bewertung der erfassten Geschwindigkeitsverhältnisse ist die Definition und Quantifizierung von Kennzahlen notwendig, wie sie beispielsweise in [3] konkret für diesen Anwendungsfall vorgeschlagen werden.

Nachfolgend werden als Beispiele für derartige LDV-Messungen ausgewählte Ergebnisse von Messungen am Wärmezähler-Prüfstand des Schweizer Bundesamtes für Metrologie (METAS) vorgestellt. Die Messungen erfolgen in warmwasserdurchströmten ($T_w = 50^\circ\text{C}$) Rohren der Dimension DN 20 ($d_i = 19,6\text{ mm}$). Das Bild 7 zeigt die Einbauverhältnisse in der Messstrecke. Vor der eigentlichen Messstrecke befindet sich eine aus vier nacheinander geschalteten *MITSUBISHI*-Gleichrichtern bestehende Baugruppe zur Strömungskonditionierung in DN 25 mit anschließender Reduzierung auf DN 20.

Das LDV-Messsystem weist für die Bestimmung der örtlichen Strömungsgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung des Turbulenzgrades in der Strömung und der Positionierung des Messvolumens (Länge 0,3 mm) eine Messunsicherheit von $u_{LDV} < 1\%$ ($k = 2$) auf. Die Unsicherheit für die zur Normierung herangezogene mittlere volumetrische Geschwindigkeit während der einzelnen Messungen schwankt anlagenbedingt zwischen 0,2% und 0,4%.

Die Ergebnisse werden jeweils in zweidimensionalen Darstellungen der Verteilungen der axialen Geschwindigkeit und des Turbulenzgrades sowie als dreidimensionale Darstellungen der Geschwindigkeiten zusammengefasst. Es werden die dimensionslosen geometrischen Größen x/R und y/R mit $R = 9,80\text{ mm}$ sowie die Geschwindigkeitsverhältnisse w/w_{vol} und die Turbulenzgrade Tu dargestellt. Im Bild 8 sind beispielhaft die Ergebnisdarstellungen für den Nenn-Volumenstrom 500 l/h enthalten. Im Vergleich mit anderen untersuchten turbulenten Strömungszuständen sind die Verteilungen grundsätzlich sehr ähnlich zueinander. Der Verlauf der Linien gleichen Turbulenzgrades im gezeigten Beispiel ist nahezu identisch mit

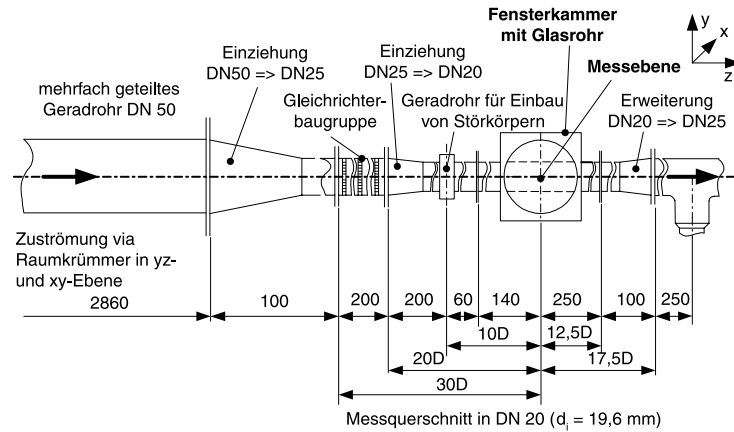


Bild 7: Einbauverhältnisse in der Messstrecke am METAS-Wärmezähler-Prüfstand.
Figure 7: Installation conditions in the measuring section on the METAS test bench for heatmeters.

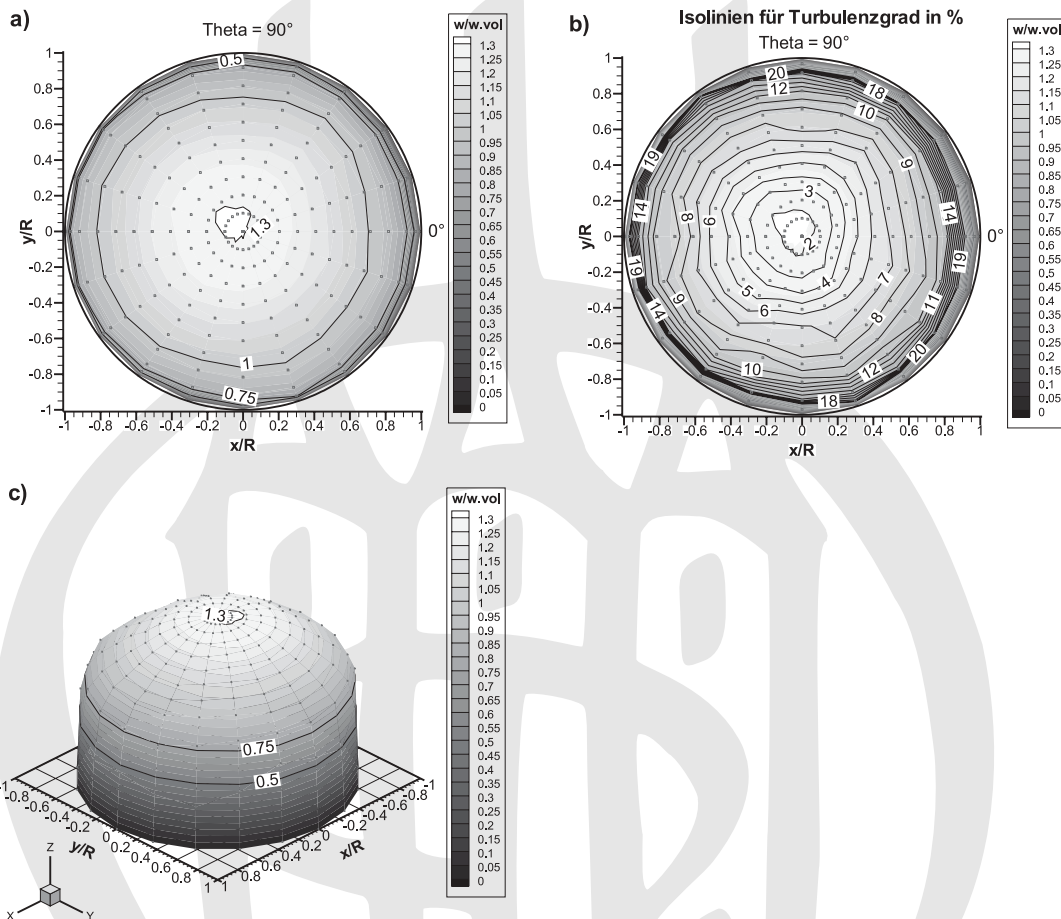


Bild 8: Verteilung der axialen Geschwindigkeit bei ungestörter Zuströmung für $Q_N = 500 \text{ l/h}$ (20D stromabwärts von Gleichrichter-Baugruppe; $w_{vol} = 0,47 \text{ m/s}$; $Re = 16\,500$; 221 LDV-Messpunkte im Strömungsquerschnitt).
Figure 8: Distribution of the axial velocity for undisturbed flow conditions for $Q_N = 500 \text{ l/h}$ (20D downstream from the flow conditioner package; $w_{vol} = 0,47 \text{ m/s}$; $Re = 16\,500$; 221 LDV measuring points in the flow cross-section).

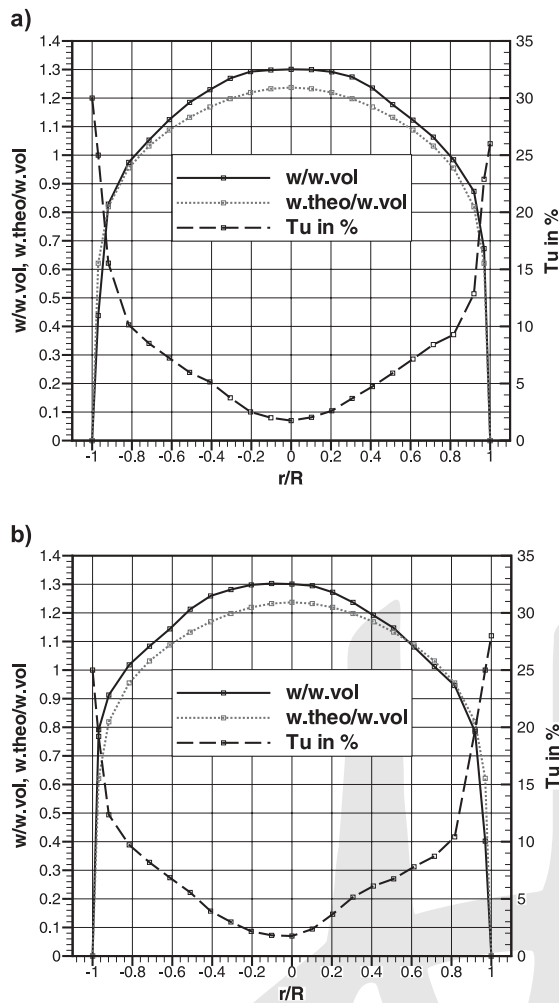


Bild 9: Ausgewählte Profile für $Q_N = 5001/h$ im Vergleich zum theoretischen Profil nach GERSTEN und HERWIG: a) $\Theta = 54^\circ$; b) $\Theta = 162^\circ$.
Figure 9: Selected profiles for $Q_N = 5001/h$ in comparison to the theoretical profile from GERSTEN and HERWIG: a) $\Theta = 54^\circ$; b) $\Theta = 162^\circ$.

dem der Isotachen (konzentrisch um das Maximum des Geschwindigkeitsverhältnisses). Die minimalen Turbulenzgrade betragen 1% und fallen mit den Orten für das maximale Geschwindigkeitsverhältnis w/w_{vol} zusammen. Aus Bild 9 ist zu erkennen, dass die Strömungszustände von den theoretischen, ausgebildeten Profilen nach GERSTEN und HERWIG [4; 5] je nach gewählter Winkelstellung der Profile mehr oder weniger abweichen.

4 Gestörte Strömungszustände

Die Messunsicherheiten der meisten Messgeräte zur Erfassung des Volumens bzw. Volumenstromes von Flüssigkeiten und Gasen (Durchfluss-Sensoren) sind auch von den am Einbauort vorliegenden Geschwindigkeitsverteilungen abhängig. Die Strömungsverhältnisse an den Einbauorten der Durchfluss-Sensoren werden durch anlagentechnische Gegebenheiten beeinflusst. Sie weichen daher oft von den bei der Kalibrierung auf den Prüfständen vorliegenden, idealerweise rotationssymmetrischen, voll entwickelten und drallfreien Geschwindigkeitsverteilungen ab, sodass die tat-

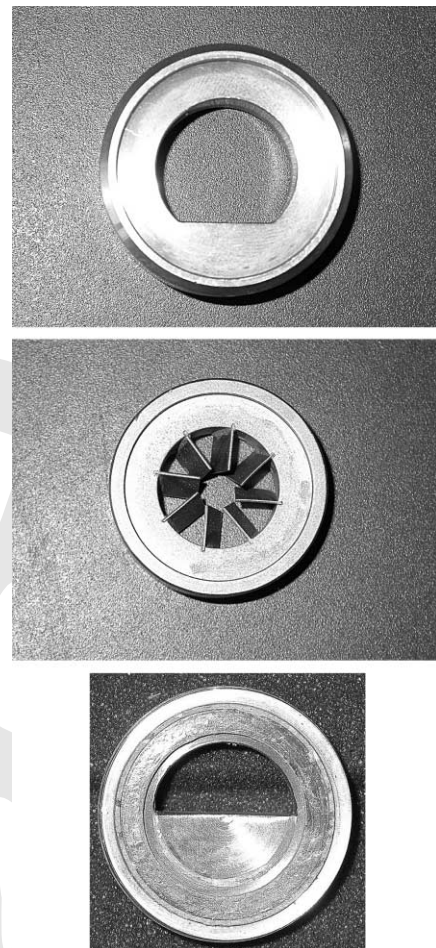


Bild 10: Verwendete Störkörper: Segmentblende nach EN 14154; Drallerzeuger nach EN 14154 und Halblende.
Figure 10: Used flow disturber: segment orifice compliant EN 14154; swirl generator compliant EN 14154 and half-closed orifice.

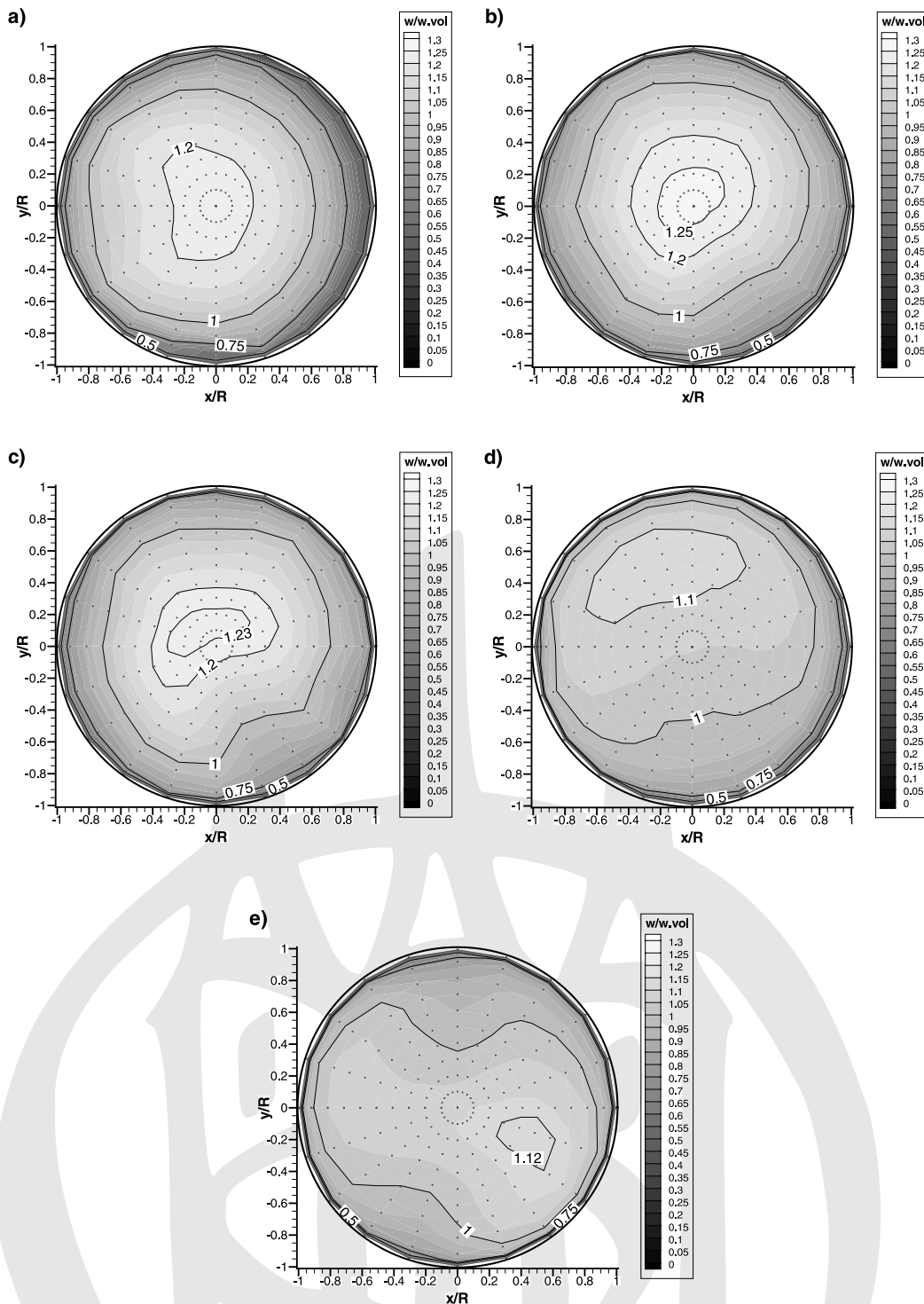


Bild 11: Verteilungen der axialen Geschwindigkeit für $Q_N = 2500 \text{ l/h}$ ($w_{\text{vol}} = 2,31 \text{ m/s}$, $Re = 80\,000$): a) ungestört (20D stromab von Gleichrichter-Baugruppe), b) 15D stromabwärts von Segmentblende, c) 10D stromabwärts von Segmentblende, d) 10D stromabwärts von Halbblende, e) 10D stromabwärts von linksdrehendem Drallerzeuger.
Figure 11: Distribution of the axial velocity for $Q_N = 2500 \text{ l/h}$ ($w_{\text{vol}} = 2,31 \text{ m/s}$, $Re = 80\,000$): a) undisturbed (20D downstream from the flow conditioner package), b) 15D downstream from the segment orifice, c) 10D downstream from the segment orifice, d) 10D downstream from the half-closed orifice, e) 10D downstream from the counterclockwise swirl generator.

sächlichen Messunsicherheiten der Messgeräte im Einbauzustand nur unzureichend bekannt sind. Die Empfindlichkeit von Durchfluss-Sensoren auf veränderte Strömungsverhältnisse ist daher grundsätzlich zu minimieren.

Mittels sogenannter Störkörper, die typische Einbaustörungen nachbilden sollen, können gezielt veränderte Strömungsverhältnisse zur Optimierung der Messgeräte realisiert werden. In den Normen und Standards für die verschiedenen Einsatzgebiete und Messprinzipien von Durchfluss-Sensoren sind dementsprechend spezielle Störkörper festgelegt, die zur Klassifizierung und Beurteilung bei der Bauartzulassung bzw. Konformitätsbewertung dienen. Die Charakteristiken der durch diese Störkörper veränderten Strömungsverhältnisse sind derzeit nur teilweise bekannt. Daher kann heute noch nicht ausreichend beurteilt werden, inwiefern die verwendeten Störkörper reale, in der Praxis auftretende Strömungsverhältnisse an den Einbauorten der Durchfluss-Sensoren widerspiegeln. Die Kenntnis der jeweiligen Geschwindigkeitsverteilungen ist somit eine wichtige Voraussetzung sowohl zur Optimierung der Durchfluss-Sensoren als auch zur Verbesserung der Praxistauglichkeit von Störkörpern.

Die nachfolgend vorgestellten Messergebnisse sind Teil von derartigen Untersuchungen am Wärmezähler-Prüfstand von METAS. Zur gezielten Veränderung der Strömungen werden eine Segmentblende, ein links- und ein rechtsdrehender Drallerzeuger nach EN 14154 [6] bzw. EN 1434 [2] sowie eine Halbblende verwendet (vgl. Bild 10). Die Blenden sind jeweils so eingebaut, dass die Verblockungen symmetrisch zur y-Achse im unteren Bereich der Rohrleitung erfolgen (negativer y-Bereich). Die Einbausituation für eine Entfernung von 10D zwischen der Austrittskante des jeweiligen Störkörpers und der Messebene zeigt das Bild 7. Zusätzlich werden Messungen bei einem Abstand von 15D vorgestellt.

Im Bild 11 sind die 2D-Plots der axialen Geschwindigkeiten für den ungestörten und vier gestörte Strömungszustände bei turbulenter Strömung zusammengefasst. Grundsätzlich ähneln sich die Ergebnisse für alle untersuchten turbulenten Strömungsverhältnisse. Bei einem Abstand von 10D zur Normblende und der Halbblende sind Verschiebungen der Gebiete der maximalen Geschwindigkeiten in die positive y-Richtung erkennbar. Diese Verschiebungen sind jedoch nicht, wie aufgrund des symmetrischen Einbaus der Blende zu erwarten wäre, symmetrisch zur y-Achse ausgebildet. Der Drallerzeuger führt zu wesentlich veränderten Strömungsverhältnissen.

Neben den Verteilungen der axialen Geschwindigkeiten zur Charakterisierung der Primärströmung ist auch die Sekundärströmung für die Beurteilung der Strömungsverhältnisse interessant. Insbesondere

die tangentielle Geschwindigkeit ist als Maß für den Drall in der Strömung aussagefähig. Daher werden für ausgewählte Strömungsverhältnisse die tangentialen Geschwindigkeiten entlang einem Messpfad auf einer Durchmesserebene durch Drehung der LDV-Messsonde um 90° gemessen.

Für die Quantifizierung des Dralls in einer Strömung kann nach YEH und MATTINGLY [7] der Drallwinkel als einfaches Maß für die Abweichung des Strömungsvektors von der idealen axialen Strömungsrichtung definiert werden:

$$\phi = \arctan(v/w_{vol}) \text{ bzw. } \phi_{max} = \arctan(|v|_{max}/w_{vol}) \tag{2}$$

Das Bild 12 zeigt die Messergebnisse. Der maximale Drallwinkel für den ungestörten Zustand bei $Q_N = 5001/h$ beträgt demnach 1,6°; die Strömung ist also nahezu drallfrei. Durchgeführte Überblicksmessungen bestätigen diese Drallarmut auch für die anderen Nenn-Volumenströme und alle Einbaukonfigurationen mit den Normblenden. Der linksdrehende Drallerzeuger führt bei $Q_N = 5001/h$ und $Q_N = 25001/h$ zu nahezu identischen Verläufen des Drallwinkels über dem Durchmesser, die maximalen Drallwinkel betragen jeweils 18,5°. Es bildet sich erwartungsgemäß ein Wirbel um den Rohrmittelpunkt aus. Der rechtsdrehende Drallerzeuger bewirkt bei $Q_N = 25001/h$ einen spiegelbildlichen Verlauf des Drallwinkels, erzeugt jedoch nur einen maximalen Drallwinkel von 12,3°. Die Ursache hierfür dürfte in der Strömungscharakteristik zu su-

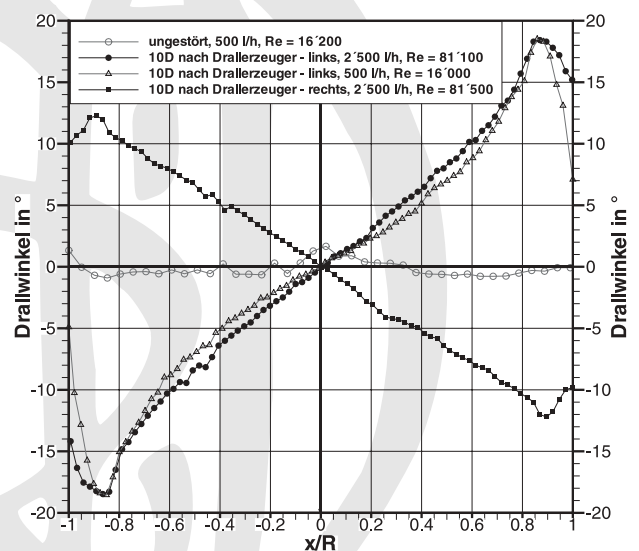


Bild 12: Drallwinkel entlang von Profilen.
Figure 12: Swirl angle profiles.

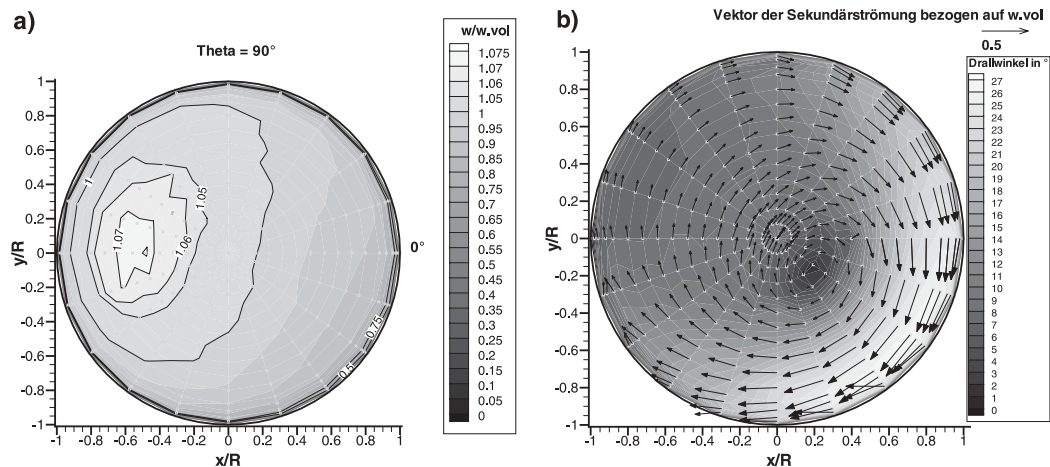


Bild 13: Strömungsverhältnisse 3,6 D stromabwärts von einem Mehrstrahl-Flügelradzähler der Baugröße q_p 3,5: (Blick gegen die Strömungsrichtung, $Q_N = 3500$ l/h; $w_{vol} = 1,96$ m/s; $Re = 90\,500$) a) Primärströmung, b) Sekundärströmung.

Figure 13: Flow pattern 3.6 D downstream of a multijet-vanewheel meter with q_p 3.5: (view against flow direction, $Q_N = 3500$ l/h; $w_{vol} = 1.96$ m/s; $Re = 90\,500$). a) primary flow, b) secondary flow.

chen sein, da Fertigungsunterschiede und Einbaufehler weitgehend ausgeschlossen werden können.

Ein Beispiel für die Erfassung der Sekundärströmung über dem gesamten Rohrquerschnitt zeigt das Bild 13b. Dargestellt sind die Strömungsverhältnisse nach einem Mehrstrahl-Flügelradzähler der Baugröße q_p 3,5 in einem Abstand von 3,6 D. Gut erkennbar ist der durch die Bauform des Zählers bestimmte, sich asymmetrisch ausbildende Wirbel mit Drallwinkeln bis zu 27° .

5 Ausblick

Augenblicklich werden im Rahmen der Arbeitsgruppe „Laseroptische Strömungsdiagnostik“ Forschungsvorhaben an den nationalen Metrologie-Instituten der Schweiz, Österreichs und Deutschlands in Zusammenarbeit mit den Firmen ILA GmbH (D – Jülich) und OPTOLUTION GmbH (CH – Reinach) durchgeführt. Das Ziel der Untersuchungen besteht in der Definition von praxistauglichen Kennzahlen und der Festlegung von Akzeptanzbereichen dieser Kennzahlen für die strömungstechnische Validierung von Kalibrierprüfständen für Durchfluss-Sensoren. Anschließend werden konkrete Anforderungen an die Strömungsverhältnisse von Kalibrier-Prüfständen für Durchfluss-Sensoren entwickelt. Ergänzende LDV-Messungen zur Entwicklung von praxisrelevanten Störkörpern für Durchfluss-Sensoren bilden einen weiteren Schwerpunkt in dieser internationalen Arbeitsgruppe.

Literatur

- [1] Albrecht, H. E., Damaschke, N., Borys, M., Tropea, C.: Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. 1. Aufl., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2003.
- [2] European Standard EN 1434: Wärmehähler – Teil 1 bis Teil 6, Ausgabe 2006.
- [3] Müller, U.: Richtlinie zur strömungstechnischen Validierung von Kalibrier-Prüfständen im Rahmen der EN 1434. Hrsg. von AG Laseroptische Strömungsmesstechnik, Berlin 2006.
- [4] Gersten, K., Herwig, G.: Strömungsmechanik. Grundlagen der Impuls-, Wärme- und Stoffübertragung aus asymptotischer Sicht. 1. Aufl., Vieweg-Verlag, Braunschweig Wiesbaden 1992.
- [5] Gersten, K.: Fully developed turbulent pipe flow. In: Merzkirch, W.: Fluid mechanics of flow metering. 1. Aufl., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2005.
- [6] European Standard EN 14154: Wasserzähler – Teil 1 bis Teil 3, Ausgabe 2005.
- [7] Yeh, T. T.; Mattingly, G. E.: Laser Doppler Velocimeter studies of the pipeflow produced by a generic header. In: NIST Technical Note 1409; National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg 1995.



1 Dr.-Ing. Ulrich Müller ist Geschäftsführer und Inhaber der OPTOLUTION GmbH,
Hauptarbeitsgebiete: laseroptische Strömungs- und Durchflussmesstechnik – Dienstleistungen und Gerätetechnik.
Adresse: OPTOLUTION GmbH, Christoph-Merian-Ring 11, 4153 Reinach, Schweiz,
E-Mail: mueller@optolution.ch

2 Dr.-Ing. Michael Dues ist Geschäftsführer und Inhaber der INTELLIGENT LASER APPLICATIONS GmbH,
Hauptarbeitsgebiete: laseroptische Strömungsmesstechnik – Konstruktion und Optik.
Adresse: INTELLIGENT LASER APPLICATIONS GmbH, Karl-Heinz-Beckurts-Str. 13, 52428 Jülich,
E-Mail: dues@ila.de

3 Dr. ès. sc. Henri Baumann ist Sektionschef am Schweizer Bundesamt für Metrologie METAS.
Hauptarbeitsgebiete: Prüfung von Energie-, Wasser- und Gaszählern. Ermittlung der metrologischen Einflüsse der Geschwindigkeitsprofile auf Zählertypen. Analyse des Messverhaltens von Zählern vor Ort.
Adresse: Schweizer Bundesamt für Metrologie, Lindenbergweg 50, 3003 Bern-Wabern, Schweiz,
E-Mail: henri.baumann@metas.ch