

Messung von ungestörten Strömungsprofilen mittels ortsaufgelöster LDV – Vergleich mit konventioneller LDV und CFD Simulationen

Measurement of undisturbed velocity profiles by means of spatially high-resolving LDV –comparison with conventional LDV and CFD simulations

Andreas Swienty¹, Michael Dues², Frank Neuer¹ und Paul Uwe Thamsen¹

¹Technische Universität Berlin, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, Fachgebiet Fluidsystemdynamik, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

²ILA R&D GmbH, Karl-Heinz-Beckurts Str. 13, 52428 Jülich

Laser-Doppler- Velozimetrie, Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor, CFD, RANS
Laser Doppler Velocimetry, Laser-Doppler-Profile-Sensor , CFD, RANS

Zusammenfassung

Untersucht wurde eine vollausgebildete Rohrströmung mittels konventioneller und ortsaufgelöster Laser-Doppler-Velozimetrie (LDV). Der dafür verwendete Prüfstand hat eine 100 D lange, ungestörte Rohrstrecke, an deren Ende Ganzfeld-LDV-Messungen durchgeführt werden. Zusätzlich sind stationäre Strömungssimulationen mit RANS Turbulenzmodellen durchgeführt worden. Es wurde eine leichte Störung des Strömungsprofils durch eine Querschnittsaufweitung im Vorlauf der Messposition mittels konventionellen LDV-Messungen festgestellt. Durch die Kombination mit ortsaufgelösten LDV-Messungen wurde das gesamte Geschwindigkeitsprofil bis in den wandnahen Bereich bestimmt. Verglichen wurde das gemessene Geschwindigkeitsprofil mit einer in der Literatur verwendeten theoretischen Beschreibung.

Einleitung

Durch die Verwendung von LDV-Messungen können Volumenströme in Rohrleitungen mit einer sehr geringen Abweichung zum wahren Wert bestimmt werden. Dies wird zum Beispiel bei der Kalibrierung bereits verbauter Durchflussmessgeräte angewendet. Aufgrund der niedrigen Abweichung der LDV-Messungen kann der Volumenstrom bei ungestörten Geschwindigkeitsprofilen sehr genau bestimmt werden. Dies ist nötig, da durch den Unterschied der Mediumstemperatur bei der Werkskalibrierung und der Mediumstemperatur im Betrieb eine Abweichung bei der Bestimmung des Volumenstroms entsteht. Zusätzlich entsteht durch die Benutzungsdauer eine Messabweichung des Durchflussmessgerätes.

Am Fachgebiet für Fluidsystemdynamik der Technischen Universität Berlin existiert ein Prüfstand, an dem ungestörte, vollausgebildete Strömungsprofile untersucht werden. Durch die Verwendung einer Fensterkammer ist es möglich, Geschwindigkeitswerte auf dem gesamten Rohrquerschnitt mittels LDV zu messen. Hierbei werden Reynoldszahl bis 300.000 untersucht.

Prüfstandsbeschreibung

Der Prüfstand besteht aus einer Ringrohrleitung mit einer Pumpe, Steuerorganen und Messgeräten. Das verwendete Fluid ist Wasser bei Umgebungstemperatur.

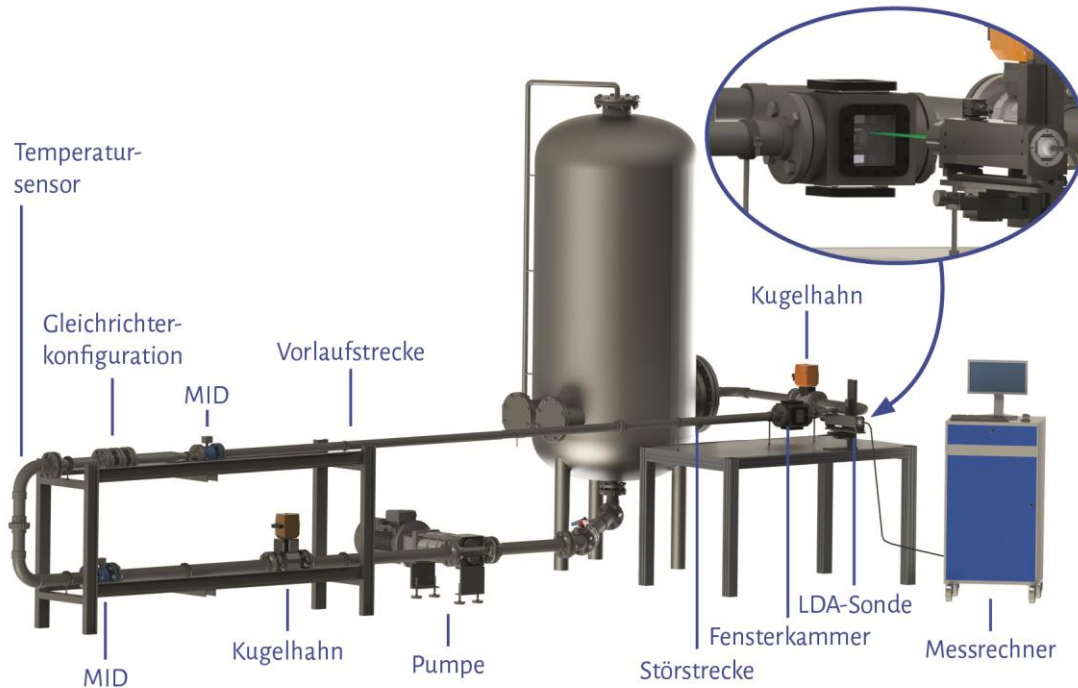


Abbildung 1: Prüfstand zur Untersuchung von Geschwindigkeitsprofilen mittels LDV

In der Abbildung 1 ist der Prüfstand mit den Bezeichnungen der Komponenten dargestellt. Das Wasser fließt von dem Tank durch ein Absperrventil, durch eine zweistufige Radialpumpe, gefolgt von einem Kugelhahn und einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) mit Nenndurchmesser 80 mm. Danach folgen zwei Krümmen, wobei im zweiten Krümmen ein Pt100-Temperatursensor zur Bestimmung der Fluidtemperatur integriert ist. Um die Störung des Strömungsprofils durch die Krümmen im darauffolgenden Abschnitt so gering wie möglich zu halten, sind Strömungsgleichrichter hinter den Krümmern platziert. Diese bestehen jeweils aus drei Lochplatten, einem Rohrbündel und einer Düse, welche über eine Lauflänge von 85 mm den Querschnitt von 80 mm auf 53,6 mm verringert. Vor der Vorlaufstrecke befindet sich ein weiterer MID mit Nenndurchmesser 50 mm. Die Vorlaufstrecke besteht aus einem 100 D langen, geraden Rohrabschnitt. Durch diese Lauflänge entwickelt sich ein vollausgebildetes, ungestörtes Strömungsprofil (vgl. Siekmann & Thamsen, 2008 und Prandtl, 2002). Eine Detailansicht der Gleichrichtereinbauten sowie der Vorlaufstrecke ist in der Abbildung 2 dargestellt.

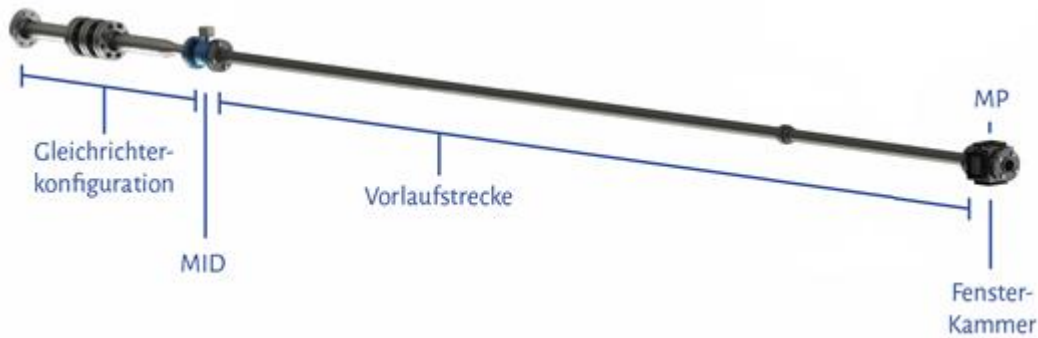


Abbildung 2: Detailansicht der ungestörten Rohrstrecke bis zur Messposition

Die Fensterkammer ermöglicht den für die LDV Messung benötigten optischen Zugang zur Rohrströmung. Dahinter befindet sich ein weiterer Kugelhahn, bevor das Wasser zurück in den Tank strömt. Die Rohre haben einen Innendurchmesser von 53,6 mm. Da der Innendurchmesser des Glasrohrs in der Messkammer 54,96 mm beträgt, wird in der Messkammer der Querschnitt vom Innendurchmesser des PVC-Rohrs zum Innendurchmesser des Glasrohrs durch einen Diffusor erweitert. Diese Aufweitung hat in z-Richtung (Strömungsrichtung) eine Länge von 34,5 mm (vgl. Abbildung 3). Dies entspricht einem Diffusor mit einem Öffnungswinkel von 2° .

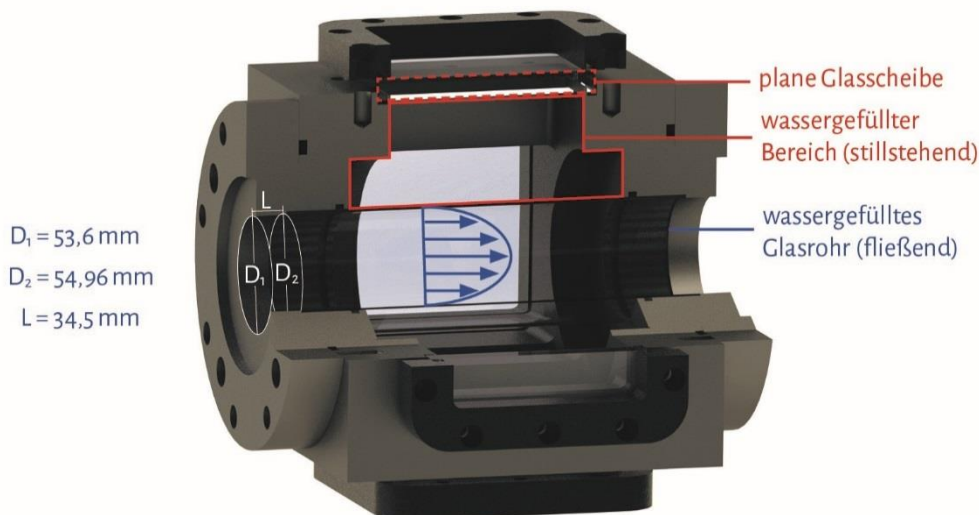


Abbildung 3: Messkammer zur LDV Messung auf dem gesamten Rohrquerschnitt

An den vier Seiten der Fensterkammer befinden sich vier ebene Glasscheiben. Die Fensterkammer ist mit Wasser gefüllt, d.h. zwischen Glasrohr und Glasscheiben befindet sich ruhendes Wasser. Dies ist von Vorteil, da die Brechung des Laserstrahls beim Übergang von Luft in Glas leichter an einer planen Glasscheibe zu berechnen ist als am gekrümmten Glasrohr.

Mit konventioneller LDV gemessenes Strömungsprofil

Verwendet wurde ein fp50-shift LDV-System der ILA GmbH mit einer Laserleistung von 75 mW. Mit der verwendeten Brennweite von 120 mm und einem Laserstrahlendurchmesser von 0,005 mm ergibt sich eine Breite des Messvolumens von 0,2 mm. Zur Messung des Strömungsprofils auf dem gesamten Rohrquerschnitt werden einzelne Positionen im Rohr durch eine automatische Traversierung angefahren. Das kontinuierliche Strömungsprofil wird

durch 461 Messpunkte auf 10 Durchmesserpfaden diskretisiert. Der Abstand zwischen den Messpunkten wird zur Rohrwand hin kleiner. Damit die Messung nicht von der Rohrwand beeinflusst wird, ist der letzte Messpunkt an der Wand so gewählt, dass das gesamte Messvolumen sich noch in der Strömung befindet. An jedem Messpunkt werden Geschwindigkeitsmesswerte aufgenommen bis entweder 60 s Messzeit oder 1000 Messwerte erreicht worden sind. Im Anschluss wird ein Geschwindigkeitswert statistisch bestimmt. In der folgenden Abbildung 4 ist das Messergebnis des Strömungsprofils bei einer ungestörten Rohrströmung dargestellt. Gemessen wurde das Profil bei einer Reynoldszahl von $RE = 200.000$. Auf der linken Seite ist das 3D Profil gezeigt. Der 2D Plot auf der rechten Seite zeigt die Mittelung aller 10 gemessenen Pfade. Verglichen wird dieses Profil mit einer analytischen Formulierung eines turbulenten Geschwindigkeitsprofils nach (Merzkirch, 2005). Die Anwendbarkeit dieses Profils wird von (McKeon, et al., 2003) belegt. Die Geschwindigkeitswerte werden mit der volumetrischen Geschwindigkeit normiert dargestellt.

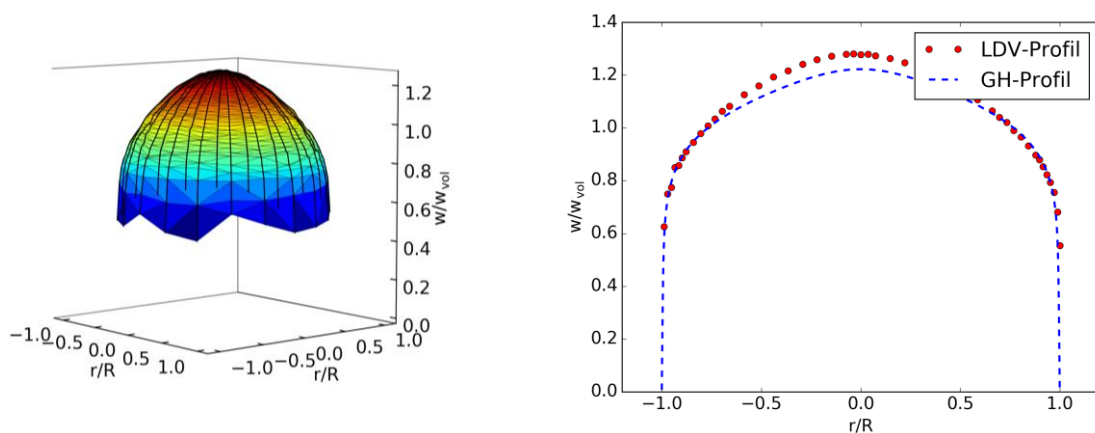


Abbildung 4: Messergebnisse einer ungestörten Rohrströmung, mit einem konventionellen LDV System gemessen

Es ist zu erkennen, dass das gemessene Geschwindigkeitsprofil in der Form mit dem theoretischen Profil übereinstimmt. In der Mitte läuft das gemessene Geschwindigkeitsprofil spitzer zu. Dies zeigt auch der Profilfaktor nach Yeh & Mattingly, 1994. Die Obergrenze des Profilfaktors zur Prüfstandbewertung nach Müller, 2007 wird aber nicht überschritten. Eine Aussage über dem Profilverlauf im Wandbereich kann auf Grund der Größe des Messvolumens nicht erfolgen. Da bei beiden Profilen derselbe Volumenstrom zu Grunde liegt, wird erwartet, dass in diesem Bericht die gemessenen Werte unter den theoretischen Werten liegen.

Vergleich mit CFD-Simulationen

Um weitere Informationen über den wandnahen Bereich zu bekommen, werden stationäre CFD Simulation durchgeführt. Diese werden ebenfalls bei einer Reynoldszahl von $RE = 200.00$ durchgeführt. Es wird der 100 D lange Vorlauf und die Rohraufweitung mitbetrachtet. In der Abbildung 5 ist das Rechengitter dargestellt. Es ist ein hexadominantes Gitter, welches auch Prismen und Tetraeder beinhaltet. Durch die Verwendung von Wandschichten wird ein dimensionsloser Wandabstand von $y^+ \leq 1$ erreicht. Untersucht wurden die folgenden Turbulenzmodelle:

- k-omega Turbulenzmodell
- k-epsilon Turbulenzmodell
- k-omega SST Turbulenzmodell.

Zusätzlich wurden unterschiedliche Elementgrößen beim Rechengitter untersucht. Beim hier dargestellten Gitter unterscheidet sich die Lösung zu einer Lösung mit einer feineren Elementgröße marginal.

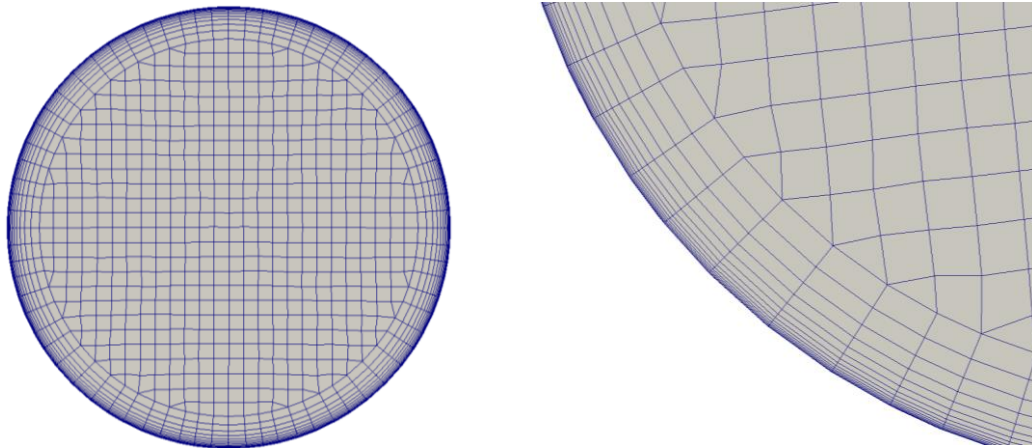


Abbildung 5: Rechengitter

In der Abbildung 6 ist das Rechenergebnis dargestellt. Es zeigt das Profil mit der besten Übereinstimmung durch die Berechnung mit dem k-omega Turbulenzmodell. Dieses wird analog zur Messung mit dem theoretischen Profil verglichen. Um den wandnahen Bereich besser erkennen zu können, sind die Profile in einer dimensionslosen u^+ und y^+ Darstellung mit logarithmischen Abszissen Skalierung gezeigt.

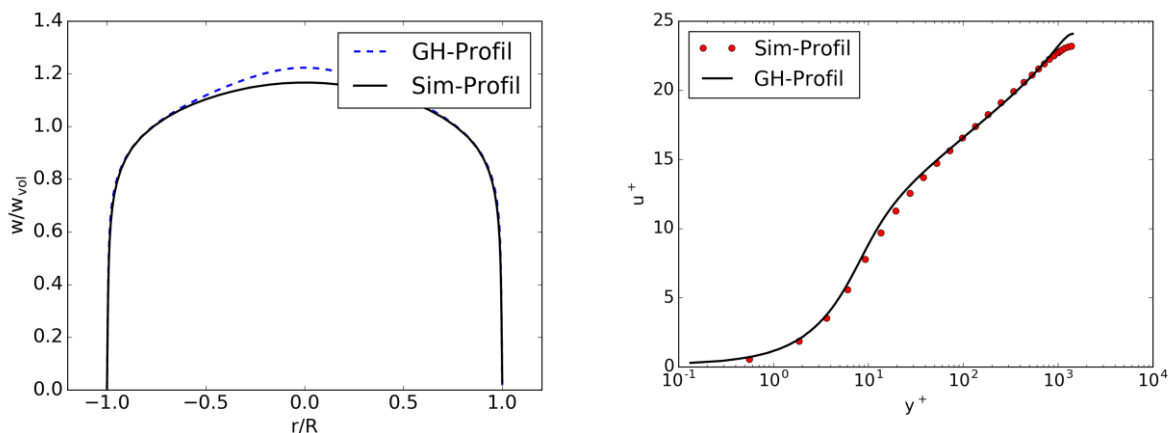


Abbildung 6: S Vergleich des Simulationsergebnisses für eine ungestörte Rohrströmung mit einem theoretischen Geschwindigkeitsprofil

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Simulation sehr gut mit dem theoretischen Profil im wandnahen Bereich übereinstimmt. In der Rohrmitte liegen die Geschwindigkeitswerte aber im Gegenteil zur Messung unter den Werten des theoretischen Profils. Zum Vergleich wurde eine Simulation ohne Rohraufweitung durchgeführt. Dabei ist kein Unterschied zum Ergebnis der Strömung durch den Diffusor zu erkennen. Die Ergebnisse stimmen sehr gut überein. Dies lässt den Schluss zu, dass das Simulationsergebnis nur marginal von der Rohraufweitung beeinflusst wird. Um diesen wandnahen Effekt numerisch abbilden zu können, wird ein wesentlich feineres Rechengitter an der Wand benötigt. Eine Direkte Numerische Simulation kann eine bessere Übereinstimmung liefern. Die dafür benötigte Hardware steht aber nicht zur Verfügung.

Mit ortsaufgelöster LDV gemessene Strömungsprofile

Das ortsaufgelöste LDV-Verfahren basiert auf dem konventionellen LDV-Verfahren. Es werden dabei aber zwei überlagerte, fächerförmige, physikalisch unterscheidbare Interferenzstreifenmuster verwendet. Dadurch ist es möglich, zusätzlich zur Geschwindigkeitsmessung auch die jeweilige Position des strömenden Partikel im Messvolumen im Bereich von 0,01 mm zu bestimmen. Dadurch kann auch der Bereich nahe der Wand untersucht werden. Ausführliche Beschreibungen des Messverfahrens können unter Czarske, et al., 2002 und Shirai, et al., 2006 nachvollzogen werden. Angewendet wurde dieses System unter anderem bei der Untersuchung einer Filmströmung (Bermuske, et al., 2015) und einer Spaltströmung (Kriegseis, et al., 2016). Des Weiteren wurde das ortsaufgelöste Verfahren zur Durchflussmessung von Hochdruck-Erdgas angewendet.

Eingesetzt wurde ein ortsaufgelöstes LDV-System der ILA R&D, welches in Zusammenarbeit mit der TU Dresden entwickelt worden ist. Der eingesetzte ND:YAD-Laser hat eine Leistung von 75 mW. Damit eine statische Signifikanz der Daten gewährleistet werden kann, wurden an jeder Messposition 10.000 Messwerte aufgenommen. Insgesamt wurden 10 Positionen ausgehend von der Rohrwand untersucht. Der Abstand zwischen den Positionen wurde so gewählt, dass eine Überschneidung der Messdaten entsteht. Die Messung wurde ausschließlich beim Geschwindigkeitsgradienten an der Wand durchgeführt. In der Abbildung 7 sind die Ergebnisse dargestellt. Es sind das theoretische Geschwindigkeitsprofil (GH-Profil) nach (Merzkirch, 2005), die Messpunkte des konventionellen LDV-Verfahrens und das wandnahe Profil des ortsaufgelösten LDV Systems (PS-Profil) eingezeichnet.

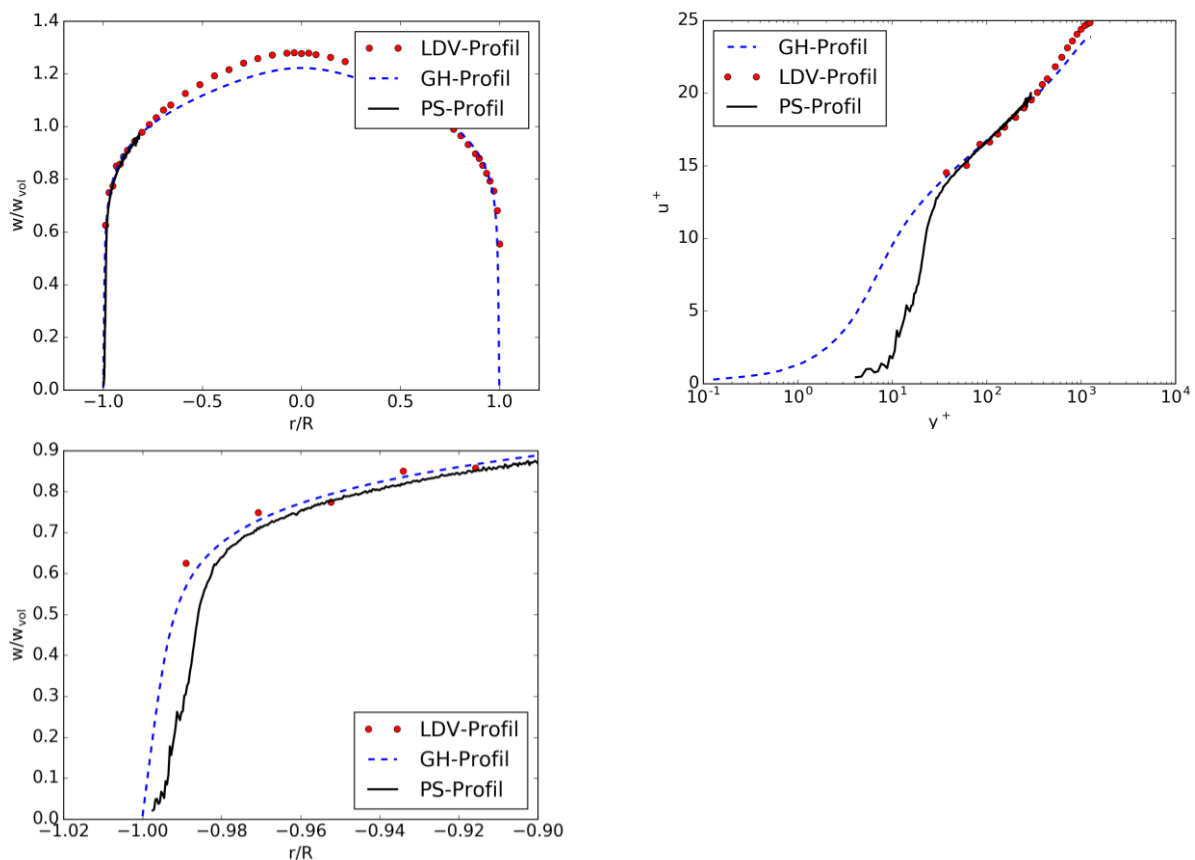


Abbildung 7: Ergebnisse der ortsaufgelösten LDV-Messung

Es ist gut zu erkennen, dass nun der wandnahe Bereich, welcher nicht mit dem konventionellen Verfahren gemessen werden konnte, abgebildet wird. Mit dem konventionellen LDV-

System wurde ein y^+ -Wert von 40 erreicht. Das orts aufgelöste Verfahren hingegen erreicht einen y^+ -Wert von 4. Wie erwartet, unterscheiden sich das theoretische und das gemessene Profil auch im Wandbereich. Dies ist besonders bis zu einem Abstand von 0,5 mm von der Wand zu beobachten. Durch die leichte Düsengeometrie im Eintritt der Fensterkammer entsteht eine Störung des Profils an der Wand, was auch die Geschwindigkeitsüberhöhung in der Rohrmitte verursacht.

Zusammenfassung

Die Messungen zeigen den Beginn der Bildung eines Ablösegebietes. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass eine Strömung in einem konischen Diffusor erst ab einem Öffnungswinkel von 7° ablöst (Idelchik, 2008). Eine andere Quelle gibt an, dass Winkel, die mehr als 15° betragen, Ablösungen verursachen (White, 2008). Mit CFD-Simulationen untersuchte Diffusoren bei unterschiedlichen Öffnungswinkeln haben Ablösungen auch bei 5° gezeigt (Törnblom, 2006 und Sparrow, et al., 2009). Die Bereiche mit den auftretenden Ablösungen sind nahe der Wand konzentriert. Die hier gezeigte Untersuchung stellt dar, dass auch noch geringere Winkel Einflüsse auf die Strömung haben. Diese Abweichungen vom theoretischen Profil sind so dicht an der Rohrwand zu finden, dass konventionelle LDV Untersuchungen nicht in der Lage sind, diese zu messen. Lediglich die Geschwindigkeitsüberhöhung in der Rohrmitte ist ein Hinweis darauf. Die Konzentration der Störung des Geschwindigkeitsprofils im wandnahen Bereich, begründet die falsche Abbildung der Strömung in der CFD-Simulation. Strömungsabrisse bei größeren Öffnungswinkel werden in CFD-Simulationen dargestellt.

Dankesworte

Vielen Dank an die ILA R&D für die Bereitstellung der Hardware. Gefördert wurde die Untersuchung im Rahmen des Projektes „EnEff: Vor-Ort-Kalibrierung von Durchflussmessgeräten in der Fernwärme“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- Bermuske, M. et al., 2015.** *Strömungsprofilmessungen in Filmströmungen mit einem hochauflösenden Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor.* Dresden, Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“.
- Czarske, J., Büttner, L., Razik, T. & Müller, H., 2002.** Boundary layer velocity measurements by a laser doppler profile sensor with micrometre spatial resolution. *Measurement Science and Technology.*
- Greitzer, E., Tan, C. & Graf, M., 2004.** *Internal Flow.* New York: Cambridge University Press.
- Idelchik, I., 2008.** *Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition.* Mumbai: Jaico Publishing House.

- Kriegseis, J., Mattern, P. & Dues, M., 2016.** *LDV-Profil-Sensor Messungen und ergänzende planare PIV Experimente zur Untersuchung von Spaltströmungen.* Cottbus.
- McKeon, B. et al., 2003.** *Revised log-law constants for fully-developed turbulent pipe flow.* Dordrecht, Kluwer Academic Publisher.
- Merzkirch, W., 2005.** *Fluid Mechanics of Flow Metering.* Berlin: Springer Verlag.
- Müller, U., 2007.** *Richtlinie zur strömungstechnischen Validierung von Kalibrier-Prüfständen im Rahmen der EN 1434.*
- Prandtl, L., 2002.** *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre.* Wiesbaden: Vieweg Verlag.
- Shirai, K. et al., 2006.** Highly spatially resolved velocity measurements of a turbulent channel flow by a fiber-optic heterodyne laser-Doppler velocity-profile sensor. *Experiments in Fluids.*
- Shirai, K. et al., 2011.** Highly spatially resolving laser doppler. *Experiments in Fluids.*
- Siekman, H. & Thamsen, P., 2008.** *Strömungslehre: Grundlagen.* Berlin: Springer Verlag.
- Sparrow, E., Abraham, J. & Minkowycz, W., 2009.** Flow separation in a diverging conical duct: Effect of Reynolds number and divergence angle. *International Journal of Heat and Mass Transfer.*
- Tang, F., Wang, C., Shi, Y. & Wang, X., 2011.** Highly spatially resolving laser doppler velocity measurements of the tip clearance flow inside a hard disk drive model. *Experiments in Fluids.*
- Törnblom, O., 2006.** *Experimental and computational studies of turbulent separating internal flows.* Stockholm: KTH Mechanics.
- White, F., 2008.** *Fluid Mechanics.* Berlin: McGraw Hill.
- Yeh, T. & Mattingly, G., 1994.** Pipeflow downstream of a reducer and its effects on flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation.*