

LES und RANS-Simulationen im Vergleich mit Stereo-PIV am Beispiel eines Rohrdurchmessersprunges in DN 15

LES and RANS-simulations in comparison with Stereo-PIV to investigate a pipe diameter step in DN 15

Martin Straka, Thomas Eichler, Thomas Lederer

AG Neue Verfahren der Wärmemengenmessung

Physikalisch-Technische Bundesanstalt - Institut Berlin, Abbestr. 2-12, 10587 Berlin

CFD, Stereo-PIV, Rohrströmung, Haushaltswasserzähler, Durchflussmesstechnik

CFD, Stereo-PIV, pipe flow, residential water meter, flow measurement

Zusammenfassung

Das Geschwindigkeitsfeld einer Rohrströmung in der Dimension DN 15 wird mit Hilfe von Large Eddy- (LES) und Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS)-Simulationen nach einem Durchmessersprung von 12 auf 17,5 mm untersucht. Zur Validierung der Ergebnisse werden Messungen mit einem Stereo-Particle Image Velocimeter (Stereo-PIV) verwendet. Aufgrund der hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung und der Möglichkeit, alle Geschwindigkeitskomponenten gleichzeitig zu messen, eignet sich das Stereo-PIV sehr gut zur Validierung für sowohl stationäre als auch instationäre CFD-Simulationen.

Einleitung

In der Durchflussmesstechnik ist die Geometrie des Geschwindigkeitsfeldes für alle gängigen Messgeräte einer der größten Messunsicherheitsfaktoren. In Rohrleitungen kommt es daher zu erheblichen Messfehlern der für optimale Strömungsverhältnisse kalibrierten Messgeräte hinter jeglichen Störungen wie Rohrbögen, in die Strömung ragende Dichtungen oder Sprüngen zwischen unterschiedlich großen Innendurchmessern der Rohre. Letzteres kommt häufig dadurch zustande, dass sich die Bezeichnung des nominellen Durchmessers DN historisch bedingt auf den Außendurchmesser des Rohres bezieht und es somit keine genauen gesetzlichen Vorschriften für den Innendurchmesser gibt. Das hat zur Folge, dass ein in abrechnungspflichtigen Haushaltsnetzen eingesetzter Durchflusssensor in der Dimension DN 15 üblicherweise an Rohre mit einem Innendurchmesser von 12-18 mm angeschlossen ist. Der dadurch entstehende Messfehler wird derzeit im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit dem AGFW (Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.) in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) am Institut Berlin festgestellt.

Um ein besseres Verständnis für die auftretenden Strömungsphänomene zu erhalten, werden die Strömungsbedingungen vor und hinter dem Sprung mithilfe der numerischen Strömungsmechanik (CFD) sichtbar gemacht. Dabei bietet sich aufgrund der niedrigen Reynoldszahlen neben der sonst gebräuchlichen statistischen RANS-Turbulenzmodellierung auch die Large Eddy Simulation (LES) an, die wegen der hohen Rechenzeiten bei Rohrströmungen mit größeren Reynoldszahlen meist nicht praktikabel ist. Entscheidend für die Güte

der Simulation sind die Qualität des verwendeten Gitters sowie die Wahl der Randbedingungen. Beides soll im Kapitel CFD Methodik erläutert werden.

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wird das Geschwindigkeitsfeld der Strömung an einem Messort hinter dem Sprung am Haushaltszählerprüfstand der PTB mit einem Stereo-Particle Image Velozimeter (Stereo-PIV) vermessen. Am Messort wird ein dafür benötigter optischer Zugang ermöglicht. Die technischen Daten des verwendeten Velozimeters werden im Kapitel Messtechnik kurz vorgestellt.

Im aktuellen Beitrag wird exemplarisch ein in Haushaltsnetzen vorkommender Sprung im Rohrdurchmesser von 12 mm auf 17,5 mm untersucht. Im Kapitel Ergebnisse werden dazu turbulente Strömungsprofile in der Messebene des Velozimeters sowie in der für den Durchflusssensor relevanten Ebene vorgestellt. Neben der Gegenüberstellung von Simulation und Messung wird auch auf die Abweichung zum voll ausgebildeten Strömungszustand eingegangen. Es wird ersichtlich, dass für die in Versorgungsnetzen eingebauten Zähler aufgrund der deutlichen Unterschiede zu den ungestörten Geschwindigkeitsprofilen ein großer Einfluss auf die Messgenauigkeit zu erwarten ist.

CFD Methodik

Für die CFD-Simulationen stehen ein HPC-Cluster mit 48 Prozessoren sowie die kommerzielle Software ANSYS CFX 15.0 zur Verfügung. Die turbulente Rohrströmung mit einer Reynoldszahl von 24156 wird sowohl stationär mit dem auf den Reynolds-averaged-Navier-Stokes (RANS)-Gleichungen basierenden Wilcox-k-omega-Turbulenzmodell als auch instationär mit dem LES-Smagorinsky-Modell berechnet.

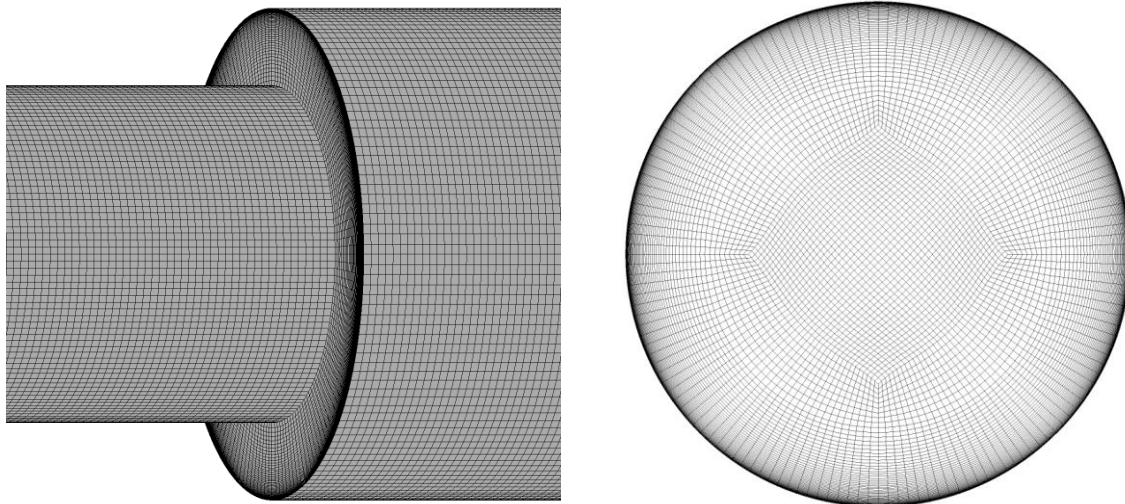


Abb. 1: Gitterauflösung am Sprung in Strömungsrichtung (links) und frontal (rechts)

Das Rechengitter mit einer Größe von ca. acht Millionen Hexaeder-Elementen wird mit der Software ANSYS ICEM CFD 15.0 erstellt und besteht aus zwei aneinandergereihten strukturierten O-Gittern mit einer Länge von fünf Durchmessern stromauf und zehn Durchmessern stromab des Durchmessersprunges. In Abbildung 1 ist links das Gitter in Strömungsrichtung auf Höhe des Sprunges und rechts die Gitterauflösung über dem Rohrquerschnitt dargestellt. Die Auflösung orientiert sich an den Anforderungen für LES-Gitter mit Feinstrukturmodellen und liegt im Rahmen der von Piomelli 1997 gegebenen Empfehlungen für Strömungen mit Wandgrenzschichten, wonach unter anderem der erste Gitterpunkt entfernt von der

Rohrwand einen dimensionslosen Abstand von $y^+ < 1$ haben sollte. Die Symmetrieeigenschaften der Rohrgeometrie können aufgrund der dreidimensionalen Turbulenzstrukturen bei der Large Eddy Simulation nicht dazu genutzt werden, um das Rechengebiet auf einen kuchenförmigen Kreissektor und damit auch die Anzahl der Gitterpunkte deutlich zu reduzieren. Obwohl dies bei den RANS-Simulationen problemlos möglich wäre, werden auch die stationären Berechnungen bei einem vertretbaren Zeitaufwand auf dem hochaufgelösten LES-Gitter gelöst. Das hat den Vorteil, dass diese im instationären Fall als Startlösung genutzt werden können und dient der besseren Vergleichbarkeit.

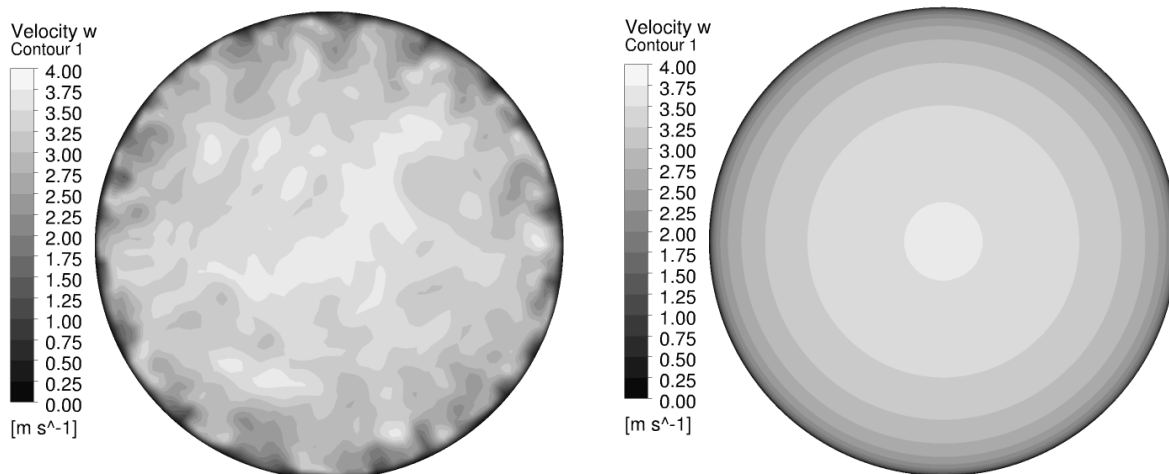


Abb. 2: Turbulente Einlassprofile instationär (links) und stationär (rechts)

Einlassrandbedingungen haben einen signifikanten Einfluss auf die Lösung der Simulation und stellen bei der Large Eddy Simulation eine große Herausforderung dar. Hier wurde der Ansatz gewählt, die Lösung einer zuvor gerechneten Simulation als Startwert im Einlass zu verwenden, in der die voll ausgebildete Strömung in einem kurzen Rohrstück mit periodischen Randbedingungen im Ein- und Auslass berechnet wird (vergleiche Rudman und Blackburn 1999). Die instationären und stationären Lösungen für LES und RANS sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Startwerte für das Geschwindigkeitsfeld der LES-Lösungen werden mit einer zufälligen Fluktuation beaufschlagt, um die Entstehung von turbulenten Strukturen im zeitlichen Verlauf der Simulation zu beschleunigen. Weitere Randbedingungen der Simulation sind die Nullgradientenbedingung im Auslass sowie die hydraulisch glatte, reibungsbehaftete Wand an den Rohrrinnenflächen.

Messtechnik

Die Kenndaten des Stereo-PIV-Systems sowie der optische Zugang mit Kameraaufbau und Laser sind in Abbildung 3 dargestellt. Das kalibrierte Präzisionsglasrohr mit einem Innendurchmesser von 17,5 mm ist in den beiden Flanschen gelagert. Für die Bestimmung der optischen Abbildungseigenschaften wird ein rundes Target mit 258 lasergeschnittenen Markierungen im Abstand von 1 mm verwendet, das innerhalb des Glasrohres axial über einen Lineartisch verschiebbar ist. Nach der Auswertung ergibt sich ein Geschwindigkeitsfeld über dem Rohrquerschnitt mit ca. 2200 Verschiebungsvektoren. Es werden für jede Messung 500 Doppelbilder je Kamera aufgezeichnet und ausgewertet. Die resultierende Messzeit bei einer Frequenz von 5 Hz liegt bei 100 s.

Laser	Nd:YAG (New Wave)
Maximale Leistung	50 mJ/Puls
Pulslänge	5 ns
Wellenlänge	532 nm
Wiederholungsrate	15 Hz
Strahldurchmesser	4 mm
Kamera	PCO PixelFly qe
Auflösung	1392 x 1024 Pixel
Pixelgröße	6,45 x 6,45 μm^2
Dynamikbereich	12 Bit
Blickwinkel	45°
PIV Bandpassfilter	532 nm \pm 2 nm
Objektiv	Canon EOS
Brennweite	60 mm Macro
Max. Blendenöffnung	60 mm
Blendenbereich	1:2,8
Bildwinkel	2,8-32
Naheinstellgrenze	20°40', 14°10', 24°30'
Optischer Aufbau	200 mm

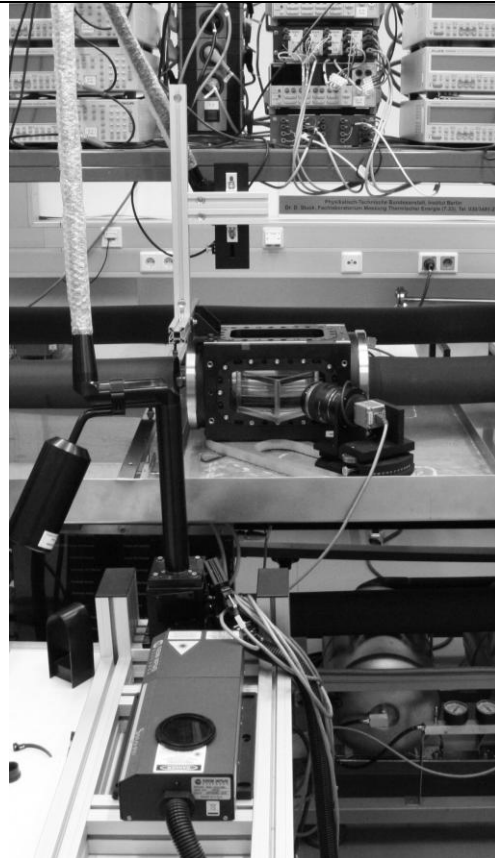


Abb. 3: Kenndaten des Stereo-PIV-Systems und Versuchsaufbau mit optischem Zugang in der Messstrecke, Kameraaufbau und Laser am Haushaltszählerprüfstand der PTB Berlin

Ergebnisse

In Abbildung 4 ist die axiale Geschwindigkeitskomponente w in einer Ebene über das komplette Rechengitter dargestellt. Zum Vergleich kommen die über mehrere 1000 Zeitschritte gemittelten Werte sowie die LES-Lösungen zu einem bestimmten Zeitpunkt am Ende der Simulation. Die Bezeichnungen LES1 und LES2 beziehen sich dabei auf Lösungen der Large Eddy Simulationen mit unterschiedlichen Randbedingungen im Einlassbereich. LES1 wird mit einem instationären und LES2 mit einem stationären turbulenten Geschwindigkeitsfeld wie in Kapitel CFD Methodik vorgestellt gelöst. Für die RANS-Simulation gibt es nur zeitlich gemittelte Ergebnisse. Bei allen Simulationen löst die Strömung erwartungsgemäß an der Kante des Durchmesser Sprunges ab und es kommt zur Entstehung eines Wirbels. In Abbildung 5 ist exemplarisch eine Detailansicht des entstandenen Ablösegebietes bei LES1 dargestellt. Durch die normierten Geschwindigkeitspfeile sind Richtung und Größe des Wirbels sowie der Anlegepunkt der Strömung gut zu erkennen. Eine gute Übereinstimmung zeigen die zeitlich gemittelten RANS- und LES1-Ergebnisse (Abbildung 4 oben und zweite von oben). In beiden Simulationen liegt die Strömung nach dem Ablösegebiet ungefähr 1,6 Durchmesser nach dem Sprung wieder an der Rohrwand an. Die Geschwindigkeitsprofile sind dabei im Vergleich zum voll ausgebildeten turbulenten Profil durch die Einschnürung der Wirbel stark zugespitzt.

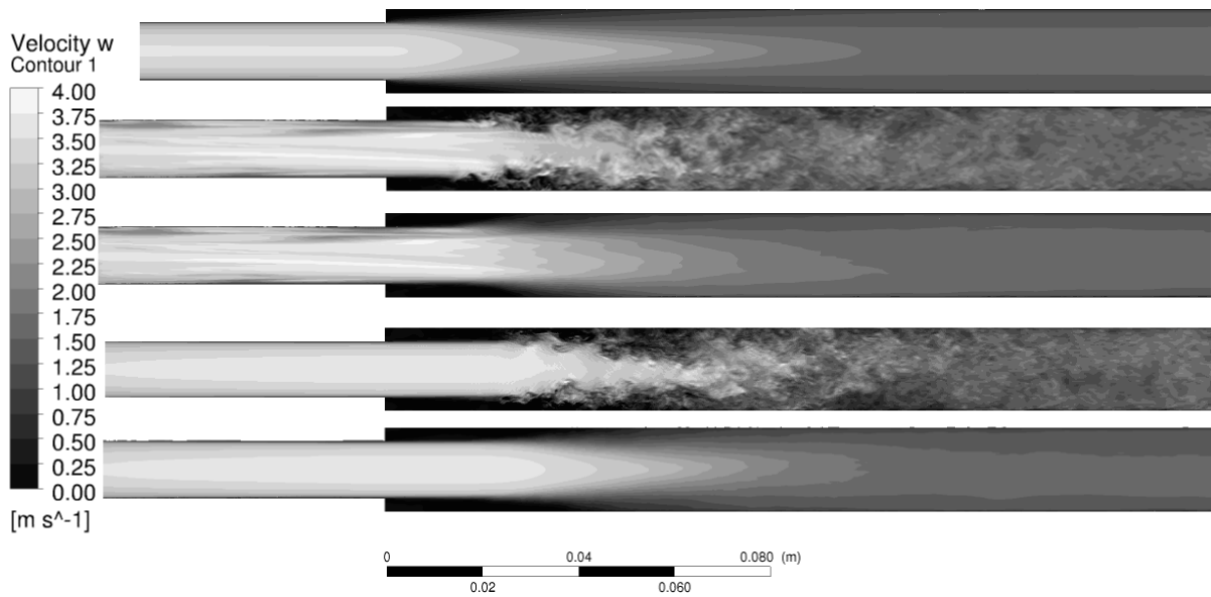


Abb. 4: Contour-Plot der axialen Geschwindigkeitskomponente entlang einer Ebene, von oben nach unten: RANS, LES1 bei Zeitschritt 10000, LES1 gemittelt über 4000 Zeitschritte, LES2 bei Zeitschritt 15500, LES2 gemittelt über 5500 Zeitschritte

Trotz der Mittelung über 4000 Zeitschritte ist die Lösung von LES1 (Abbildung 4 dritte von oben) nicht symmetrisch, was sich auch anhand der unterschiedlichen Ausdehnung der Wirbel in Abbildung 5 zeigt. Zu erklären ist dies mit dem ebenfalls asymmetrischen Einlassprofil der Simulation, dessen Einfluss sich über das gesamte Rechengebiet erstreckt. Im Gegensatz dazu ist die Lösung von LES2 sehr symmetrisch, da im Einlassbereich mit einem voll ausgebildeten Profil ohne turbulente Schwankungen gerechnet wird. Dadurch bedingt kommt es aber in der Einlaufstrecke vor dem Durchmessersprung nicht zur Ausbildung von turbulenten Strukturen, wie es bei LES1 der Fall ist. In Abbildung 4 (zweite von unten) sieht man in der transienten Lösung, dass kleinere Wirbel erst am Ende des Ablösegebietes entstehen, welches im Vergleich zu den anderen Simulationen eine wesentlich größere Ausdehnung besitzt.

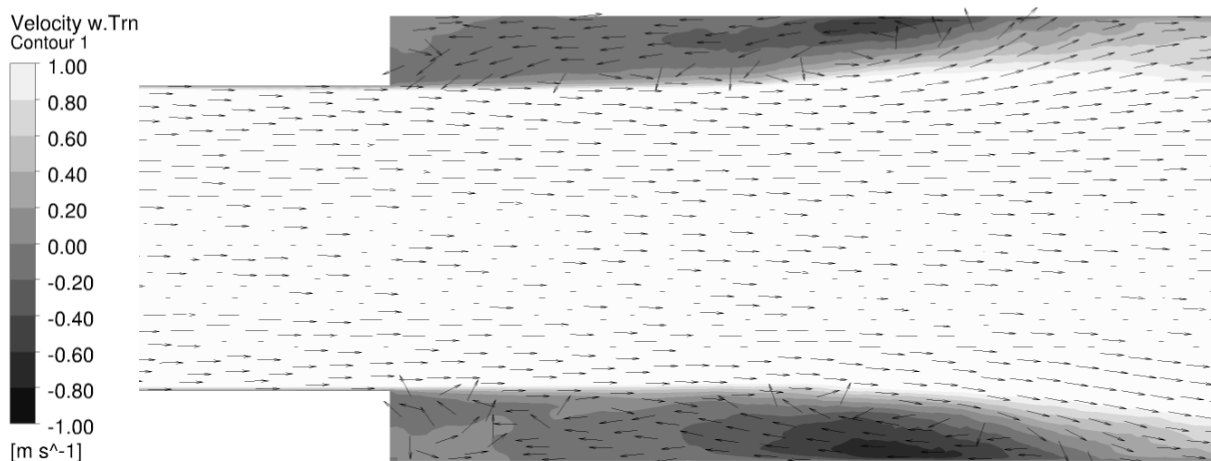


Abb. 5: Detailansicht des Durchmessersprunges bei LES1, gemittelt über 4000 Zeitschritte. Die Geschwindigkeiten der Contour sind so gewählt, dass das Ablösegebiet gut zu sehen ist. Die Größe der Pfeile ist normiert.

In Abbildung 7 sind die Geschwindigkeitsprofile der RANS-Simulation und der Stereo-PIV-Messung entlang des Messpfades 6,5 Durchmesser hinter dem Durchmessersprung gegenübergestellt. Bis auf den bei der Messung schwer aufzulösenden Wandbereich und die durch den Einbau bedingte leichte Asymmetrie stimmen Mess- und Simulationsdaten gut überein.

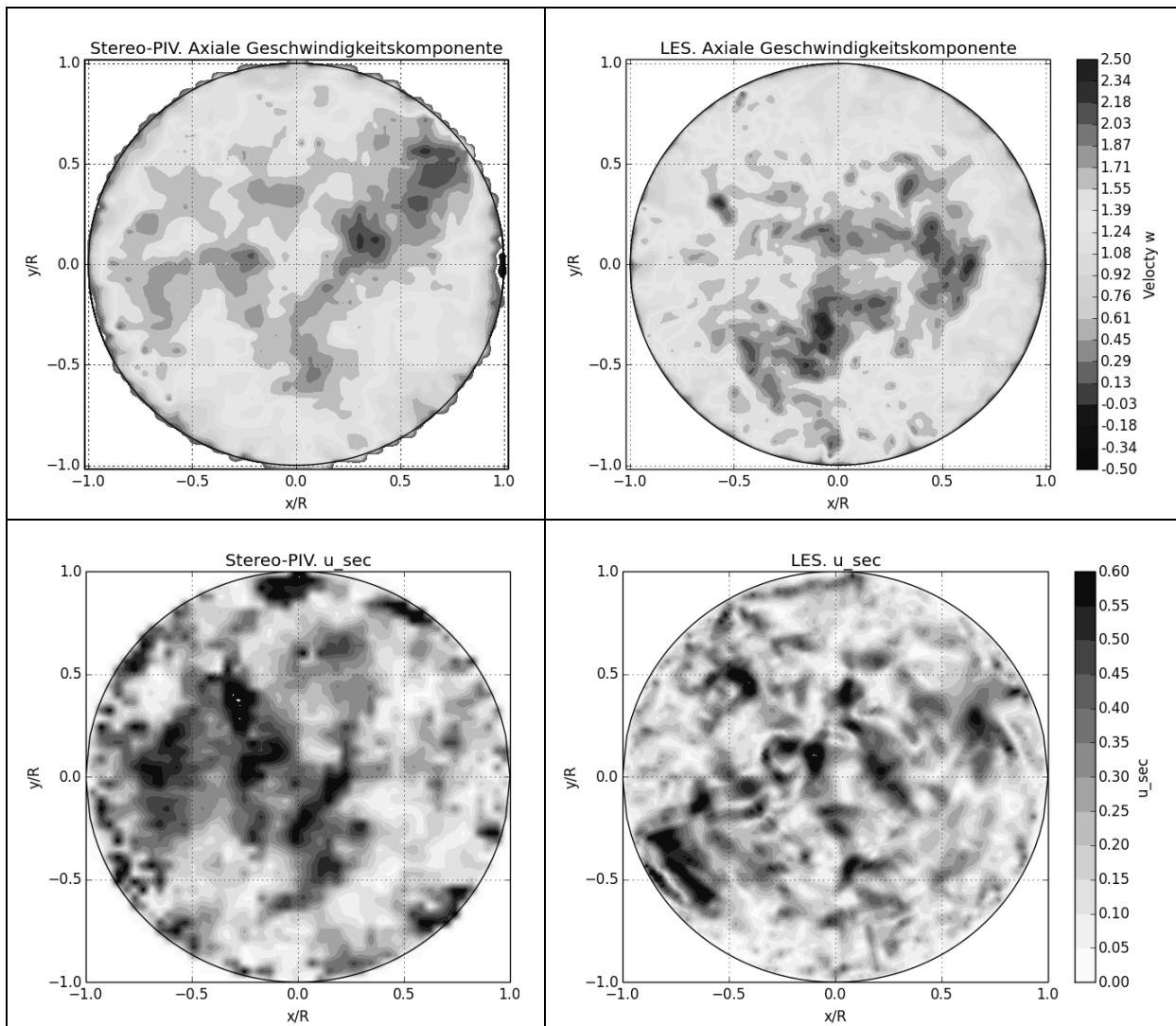


Abb. 6: Einzelbild Stereo-PIV im Vergleich mit LES1 bei Zeitschritt 10000. Oben: Axiale Geschwindigkeitskomponente w , unten: Sekundärgeschwindigkeit u_{sec}

In Abbildung 6 werden oben die Wirbelstrukturen der axialen Geschwindigkeitskomponente w von Stereo-PIV- und Simulationsdaten bei Zeitschritt 10000 verglichen. Beide stimmen in Anzahl und Größe gut miteinander überein, wenngleich sie sich erwartungsgemäß nicht am gleichen Ort befinden. Gleiches gilt für die in Abbildung 6 unten dargestellte Komponente $u_{sec} = \sqrt{u^2 + v^2}$, die als Maß für die Intensität der vorhandenen sekundären Geschwindigkeitskomponenten u und v dienen soll. Obwohl die Messwerte etwas schwammig erscheinen, zeigt sich doch in Bezug auf die Größenordnung von u_{sec} eine gute Übereinstimmung. Auch hier sei darauf hingewiesen, dass die Messergebnisse im wandnahen Bereich der Strömung durch Reflexionen an der Rohrwand verfälscht dargestellt werden, wodurch es wie in Abbildung 6 unten links zu einer nicht der Realität entsprechenden Überschätzung der Geschwindigkeit kommt.

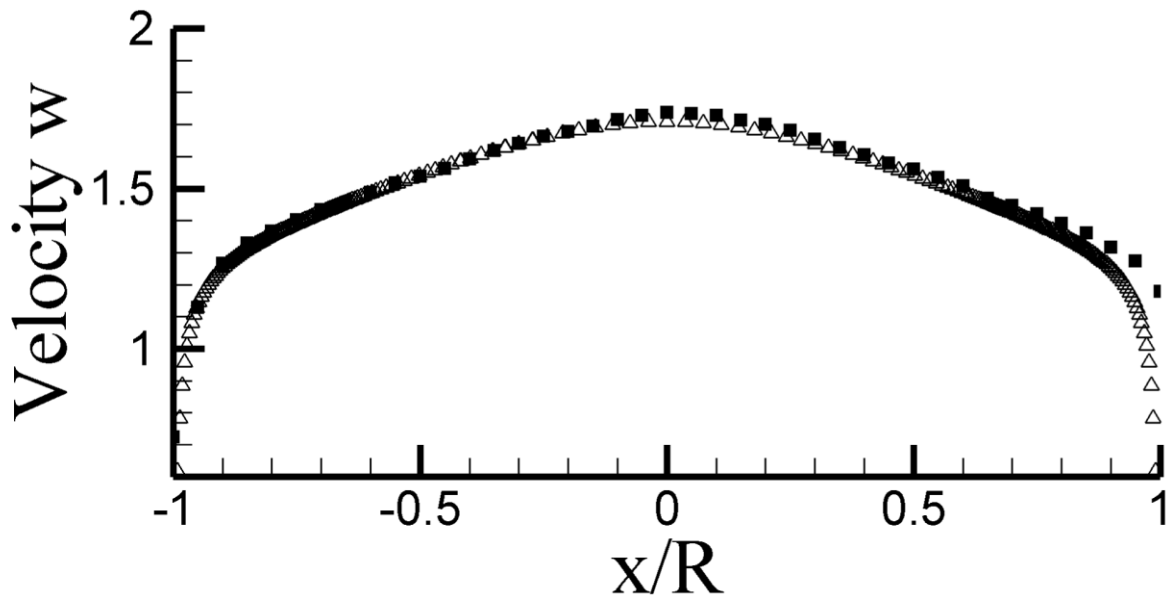


Abb. 7: Axiale Geschwindigkeitsprofile entlang eines Pfades auf Höhe der Messposition bei 6,5 Durchmessern. RANS-Lösung (Dreiecke), Stereo-PIV (ausgefüllte Vierecke)

Fazit

Stereo-PIV hat sich wegen der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung für die Validierung von CFD-Simulationsergebnissen als sehr geeignet erwiesen. Im Vergleich zu anderen Lasermessmethoden wie beispielsweise der Laser-Doppler-Anemometrie können sowohl stationäre als auch instationäre Strömungszustände sichtbar gemacht werden, was den Vergleich mit LES ermöglicht. In der Messpraxis können Simulationsergebnisse dazu verwendet werden, um die Messpositionen bei Folgeuntersuchungen an den interessanten Stellen zu wählen.

Die vom Ergebnis her sehr unterschiedlichen Lösungen der hier vorgestellten Large Eddy Simulationen unterstreichen die Wichtigkeit der verwendeten Randbedingungen. Auch wenn die Ergebnisse mit dem vorher berechneten instationären Einlassprofil in guter Übereinstimmung sowohl mit den RANS- als auch mit den Messdaten stehen, ist die Lösung einer solchen Simulation auch gemittelt über mehrere 1000 Zeitschritte stets asymmetrisch, da das zufällig ausgewählte transiente (und asymmetrische) Geschwindigkeitsprofil während der gesamten Simulation gleich bleibt. Die Verwendung eines symmetrischen und nicht turbulenzbehafteten Einlassprofils hat sich hier als keine gute Lösung erwiesen, da sich vor dem Durchmessersprung keine Wirbelstrukturen ausgebildet haben. Die dazu benötigte Einlaufstrecke wäre aufgrund der dadurch entstehenden höheren Rechenzeit nicht praktikabel. Eine denkbar bessere Alternative für zukünftige Large Eddy Simulationen ist die Verwendung eines zeitlich veränderbaren turbulenten Geschwindigkeitsprofils im Einlass, welches für jeden Zeitschritt neu berechnet wird.

In Abbildung 8 ist das simulierte Geschwindigkeitsprofil dem voll ausgebildeten Strömungsprofil nach Gersten und Herwig 1992 gegenübergestellt. Der Messpfad befindet sich 3 Durchmesser hinter dem Sprung und soll die für den Durchflusssensor relevante Messebene repräsentieren. Aufgrund der deutlich überspitzten Form der Geschwindigkeitsverteilung sind in der Praxis erhebliche Messfehler der für den voll ausgebildeten Zustand ausgelegten Sen-

soren zu erwarten. Die Simulationsergebnisse zeigen aber auch, dass sich die Messebene außerhalb der Ablösegebiete befindet.

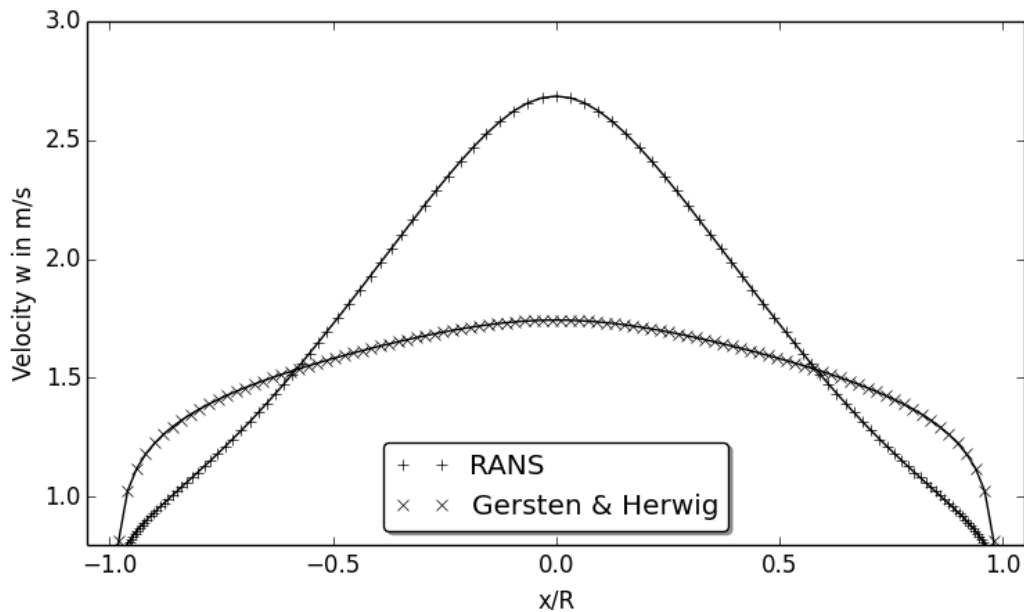


Abb. 8: Der für das Messgerät interessante Messpfad 3 Durchmesser nach dem Durchmessersprung. Vergleich des voll ausgebildeten Profils mit der RANS-Simulation für die axiale Geschwindigkeitskomponente w .

Literatur

- Piomelli, U., 1997: "Large-eddy simulations: Where we stand", in Lui, C., Liu, Z. (eds), Advances in DNS/LES, AFORS, Louisiana, pp. 93-104
- Rudman, M., Blackburn, H.M., 1999: "Large Eddy Simulation of turbulent pipe flow", in Second International Conference on CFD in the Minerals Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, pp. 503-508
- Gersten, K., Herwig, H., 1992: "Strömungsmechanik. Grundlagen der Impuls-, Wärme- und Stoffübertragung aus asymptotischer Sicht.", Braunschweig/Wiesbaden, Vieweg