

Simulation einer 7% Segmentblende und Vergleich mit PIV-Messungen

CFD simulation of a flow disturber in a pipe and comparison with PIV-Measurement

A. Weissenbrunner, T. Eichler, T. Lederer

AG Neue Verfahren der Wärmemengenmessung

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

CFD, Simulation, DES, RANS, Numerik, Störkörper, Segmentblende, PIV, Volumenstrom, Volume flow, measurement uncertainty, disturbance generator, flow disturber

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das Strömungsprofil hinter einem Normstörkörper, der 7%-Segmentblende, mit Computational Fluid Dynamics (CFD) simuliert und mit Messwerten verglichen. Die Messungen fanden an mehreren Stellen hinter der Blende statt und wurden mittels Stereo-Particle-Image-Velocimetry (SPIV) durchgeführt. Die Simulationen wurden mit dem kommerziellen Softwarepaket Ansys CFX durchgeführt. Es wurden verschiedene Turbulenzmodelle benutzt und deren Resultate verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die weithin verbreiteten Reynolds-Averaged-Navier-Stokes Modelle (RANS), die eine zeitlich gemittelte Lösung berechnen, den Verlauf der Strömung nicht entsprechend den Messungen abbilden können. Es konnte mithilfe der weitaus aufwändigeren, instationären Detached Eddy Simulation (DES) ein Ergebnis berechnet werden, dessen Abweichung gegenüber den Messungen weitaus geringer ist.

Einleitung

Ein für die Durchflussmesstechnik entscheidender Unsicherheitsfaktor stellt das Geschwindigkeitsprofil dar. Ist eine gerade Rohrstrecke lang genug, so entwickelt sich stets ein voll ausgebildetes Strömungsprofil. In der Praxis werden jedoch selten ideale Bedingungen vorgefunden. Vielmehr erzeugen verschiedene Einbaukonfigurationen ein gestörtes Strömungsprofil. Kenntnisse über die Qualität der Störung sind dabei essentiell zur Verringerung von Messfehlern.

Um mehr Kenntnisse über die Strömungsbedingungen zu erhalten werden vermehrt CFD-Simulationen eingesetzt. Da bei numerischen Simulationen das Strömungsprofil an jeder beliebigen Position der Rohrstrecke ausgewertet werden kann, stellen sie ein sehr mächtiges Tool dar, um das Strömungsverhalten besser zu verstehen. Jedoch stellt sich immer wieder die Frage nach der Vertrauenswürdigkeit solcher Simulationen. Daher sind Vergleiche mit belastbaren Messwerten fundamental, um eine Bewertung der Simulationsergebnisse abzugeben.

Um typische Störungen im Feld unter Laborbedingungen in Prüfständen wiederholbar und vergleichbar nachzubilden, werden Störkörper eingesetzt. In dieser Arbeit werden die Ergebnisse von CFD-Simulationen mit SPIV-Messungen des Strömungsprofils hinter einer 7%-Segmentblende verglichen. Die 7% Segmentblende ist ein Normstörkörper aus der DIN-EN 14154-3 und verdeckt etwa 7% des Rohres mit einem Kreissegment siehe Abbildung 1. So können beispielsweise zum Teil geöffnete Schieber simuliert werden. Die numerischen Simulationen wurden mit verschiedenen Turbulenzmodellen sowohl stationär als auch instationär durchgeführt. Da SPIV eine hohe örtliche Auflösung besitzt und zudem die Strömungsprofile in verschiedenen Abständen hinter der Blende gemessen werden konnten, eignen sich die Messwerte zu qualitativen und quantitativen Vergleichen mit CFD.

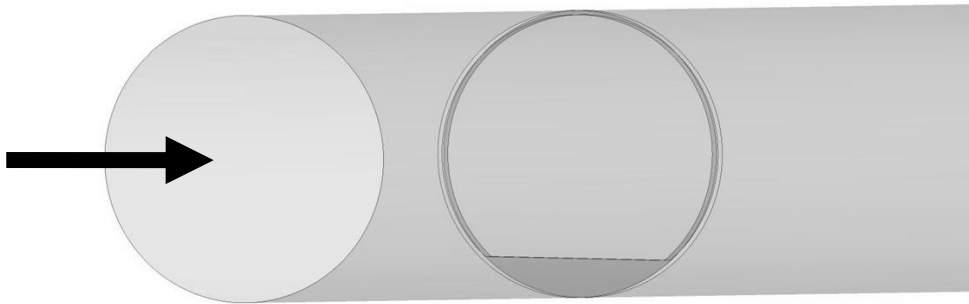


Abbildung 1: Die 7% Segmentblende im Rohr als CAD-Modell, der Pfeil zeigt in Strömungsrichtung

Versuchsaufbau der Messung

Die experimentellen Untersuchungen fanden am Wärmezählerprüfstand der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Institut Berlin (PTB-IB) statt. Es handelt sich um eine gravimetrisch rückgeführte Durchfluss-Messanlage. Der Volumenstrom wird durch die Masse, die Dichte und die Zeit beschrieben. Die erweiterte, relative Unsicherheit der Volumendarstellung beträgt $U = 4 \cdot 10^{-4}$ ($k = 2$). Bei den hier vorgestellten Messungen wurde die Prüfanlage auf folgende Parameter eingestellt: Im Pumpenbetrieb wurde eine volumetrische Strömungsgeschwindigkeit von 2,5 m/s entsprechend einem Durchfluss von 48,11 m³/h und einer Reynoldszahl von etwa 205 000 erzeugt. Die am magnetisch-induktiven Referenzgerät gemessene Standardabweichung des Durchflusses während der Messungen lag unterhalb von 0,15 %. Die aufgezeichneten Wassertemperaturen bei Messbeginn lagen bei 20,25 °C und zeigten während der Messung Standardabweichungen unterhalb von 50 mK. Den rund 100 t Wasservorrat der Prüfanlage wurden ca. 50 g Tracer-Partikel (mit Silbernitrit beschichtete Glashohlkugeln) mit einem Durchmesser von jeweils 15 µm zugesetzt. Die Messungen fanden in der Dimension DN 80 statt, wobei immer eine Einlaufstrecke von 100 D vor dem Störkörper zur Verfügung stand, um ein voll ausgebildetes Anströmprofil zu gewährleisten.

SPIV-System

Der optische Zugang mit Kameraaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Das kalibrierte Präzisionsglasrohr mit einem Innendurchmesser von 82,5 mm ist in den beiden Flanschen gelagert. Die Innenflächen der Flansche haben nach dem Anschlagpunkt des Glasrohres denselben Innendurchmesser. Dadurch entstehen keinerlei Sprünge im Rohrinne Durchmesser über die gesamte Rohrleitungsstrecke.

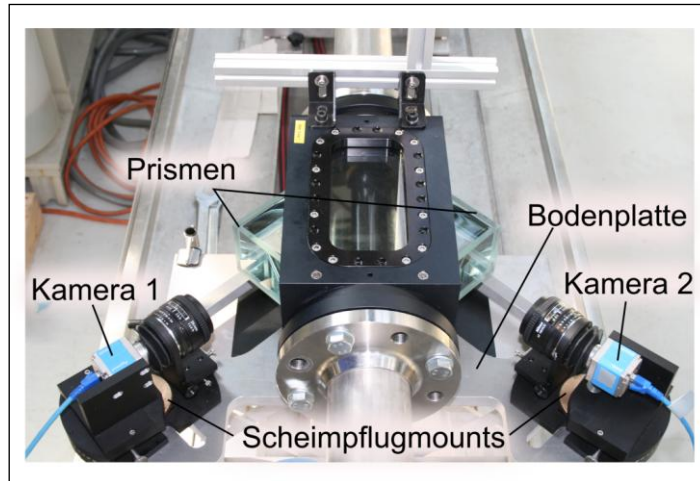


Abbildung 2: Aufbau des Stereo-PIV-Systems an der Prüfanlage

Für die Bestimmung der optischen Abbildungseigenschaften wurde ein rundes Target mit 49 lasergeschnittenen Markierungen im Abstand von 10 mm verwendet, das innerhalb des Glasrohres axial über einen Lineartisch verschiebbar ist.

Es wurden für jede Messung 500 Doppelbilder je Kamera aufgezeichnet und ausgewertet. Die resultierende Messzeit bei einer Frequenz von 5 Hz liegt bei 100 s. Der zeitliche Abstand zwischen den Doppelbildern liegt bei 100 μ s.

Es wurden Messungen in vier Abständen hinter dem Störkörper durchgeführt:

- Ebene1: 0,12 m hinter der Blende ca. $z/D \approx 1,5$
- Ebene2: 1,12 m hinter der Blende ca. $z/D \approx 13$
- Ebene3: 2,12 m hinter der Blende ca. $z/D \approx 25$
- Ebene4: 4,12 m hinter der Blende ca. $z/D \approx 50$.

Dabei ist z die Strömungsrichtung und D der Rohrdurchmesser.

Simulationsvorbereitung

Geometrie

Das Rechengitter beginnt $5 D$ vor dem Störkörper und beinhaltet $70 D$ stromabwärts bei der RANS Simulation und $20 D$ bei der DES Simulation.

Randbedingungen

Eine CFD-Simulation sollte die realen Bedingungen bestmöglich approximieren. Dafür ausschlaggebend sind neben den Modellgleichungen die Randbedingungen. Es wurde sowohl die Rohrwand als auch der Störkörper selbst als glatte und reibungsbehaftete Oberfläche angenommen. Der Mittelwert des Druckgradienten soll am Auslass verschwinden. Die Eingangsbedingung ist in diesem Falle von besonderer Wichtigkeit, da vor dem Störkörper lediglich 5 Durchmesser Rechengebiet liegen. Im experimentellen Versuchsaufbau wurde durch eine ausreichend lange gerade Rohrstrecke sichergestellt, dass sich vor dem Störkörper ein turbulentes Strömungsprofil vollständig ausbilden konnte, daher wurde ein solches Profil durch vorherige Simulation einer geraden Rohrstrecke vorgegeben.

RANS Turbulenzmodelle

Bei allen RANS-Modellen wird die Navier-Stokes-Gleichung durch eine Aufteilung der variablen Größen (i.a. Geschwindigkeit v und Druck p) in einen zeitlich gemittelten Wert und eine zeitliche Schwankungsgröße $v = \bar{v} + v'$ umformuliert. Das dadurch entstandene neue Diffe-

rentialgleichungssystem ist auch als Reynoldsgleichung bekannt und enthält wegen des Reynolds'schen Spannungstensors mehr Unbekannte als Gleichungen. Das dadurch entstandene Schließungsproblem wird durch die Formulierung von Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie κ und einer viskosen Dissipation ε bzw. einer Wirbelfrequenz ω gelöst. Aus κ und ε (κ - ε -Modell) bzw. κ und ω (κ - ω -Modell) wird dann die turbulente Wirbelviskosität bestimmt. Daher werden RANS-Modelle auch als Wirbelviskositätsmodelle bezeichnet. Das SST-Modell nutzt eine Kombination aus den beiden Modellen. In der inneren Grenzschicht wird das κ - ω -Modell, in der freien Strömung das κ - ε -Modell verwendet. Der große Nachteil an den RANS-Modellen ist, dass die Wirbelviskosität nur isotrop modelliert wird und daher bestimmte Strömungsprobleme, die mit starker Ablösung verbunden sind, nicht adäquat gelöst werden können, siehe auch (Davidson, 2014). Für diese Arbeit wurden die in CFX implementierten Standard RANS-Turbulenzmodelle κ - ε , κ - ω und SST verwendet.

Detached Eddy Simulation

Die Detached-Eddy-Simulation (DES) ist eine instationäre Simulation und wurde erstmals 1997 von P. Spalart veröffentlicht. Sie realisiert einen hybriden Ansatz, der sich aus dem SST-Modell und einer Large-Eddy-Simulation (LES) zusammensetzt. Das Verfahren kombiniert die Vorteile beider Modelle. Es wird in der Grenzschicht auf das RANS Modell zurückgegriffen, welches hier nur moderate Gittergrößen für befriedigende Ergebnisse benötigt. In der wandfernen, freien Strömung können mittels des LES-Ansatzes feine Wirbelstrukturen aufgelöst werden. Dies ist bei starker Ablösung notwendig, um belastbare Ergebnisse zu erhalten (Strelets, 2001). Die Lösung ist sehr rechenaufwändig, da die Zeitschrittweite klein gewählt werden muss. Die Zeitschrittweite kann über die Strouhal Zahl S_t abgeschätzt werden. Über einen weiten Reynoldszahlenbereich kann die Strouhal Zahl mit

$$S_t = \frac{fl}{u} \approx 0,2$$

abgeschätzt werden, siehe (Ansys, 2014). Dabei stellt f die Wirbelfrequenz, u eine charakteristische Geschwindigkeit und l eine charakteristische Länge eines umströmten Körpers dar. Wenn die Blende als umströmter Körper betrachtet wird, kann als charakteristische Länge die Höhe der Blende, also $l = 0,01 \text{ m}$ und $u = 2,5 \text{ m/s}$ die volumetrische Geschwindigkeit benutzt werden. Daraus ergibt sich die Wirbelfrequenz $f = 50 \text{ Hz}$ und somit eine Zeitschrittweite Δt von ca. $5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$. Um eine aussagekräftige Mittelung generieren zu können, wurden zwei Sekunden Simuliert, womit 40000 Zeitschritte notwendig waren. Da als Startwert eine RANS-Lösung vorgegeben wurde, müssen sich die Wirbel in der Simulation erst noch ausbilden. Daher wurde die Mittelung nur über die letzte Sekunde durchgeführt.

Gitterstudie

Es wurden Gitter mit verschiedener Netzfeinheit erstellt. Variiert wurde dabei sowohl der Abstand des wandnächsten Knotens, als auch die Auflösung in z-Richtung. Für die RANS-Modelle zeigte sich dabei ein Gitter mit ca. 1 Mio Elementen und einem wandnächsten Punkt von $y^+ \approx 2,5$ als ausreichend fein.

Das Gitter für die DES-Simulation ist weitaus diffiziler zu erstellen. Das Rechengebiet muss in weniger feine Bereiche, in denen der RANS-Ansatz benutzt wird, und in einen sehr fein vernetzten Bereich hinter der Blende aufgeteilt werden, in dem die Wirbel mit dem LES-Ansatz aufgelöst werden können, siehe (Spalart, 2001). Hier wurde ein Gitter mit ca. 21 Mio Elementen erzeugt, wobei hinter dem Störkörper lediglich ca. $20 D$ modelliert wurden, um Rechenkapazität zu sparen.

Ergebnisse

Um Vergleiche zwischen den SPIV-Messungen und den Simulationen herstellen zu können, wurden sowohl die Messdaten als auch die Simulationsdaten am Rand um 4 mm beschnitten. Somit werden die aufgrund von Reflektionen am Glasrohr qualitativ schlechteren Messungen in Randnähe ausgeschlossen. Des Weiteren wurden die Geschwindigkeitswerte mit dem Mittelwert der jeweiligen Messung bzw. Simulation normiert. Damit werden Volumenschwankungen und mögliche Offsets der Messung eliminiert.

Qualitativer Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messungen

Die qualitative Betrachtung bezieht sich auf die Strömungsprofile in den gemessenen Ebenen hinter der Blende. Sowohl die RANS-Modelle als auch die DES-Lösung zeigen an der ersten Messebene (ca. $1,5 D$) hinter der Blende eine relativ gute qualitative Übereinstimmung mit den Messungen. Die Strömung fließt im mittleren und oberen Bereich schneller während sie im unteren Bereich die Strömung noch gebremst ist. Die Messebene befindet sich jedoch schon außerhalb des Ablösegebiets. In den nächsten beiden Messebenen ($z/D = 13$ und $z/D = 25$) zeigt die Strömung der RANS-Lösung jedoch ein grundsätzlich anderes Verhalten: Der Schwerpunkt des Strömungsprofils liegt in den Messungen jeweils unterhalb des Mittelpunkts, während sich in den Simulationsergebnissen die Geschwindigkeitsüberhöhung im oberen Bereich befindet. An der letzten Messebene ($z/D = 50$) ist das Profil wieder fast vollständig ausgebildet, in der Messung ist es noch leicht asymmetrisch siehe Abbildung 3.

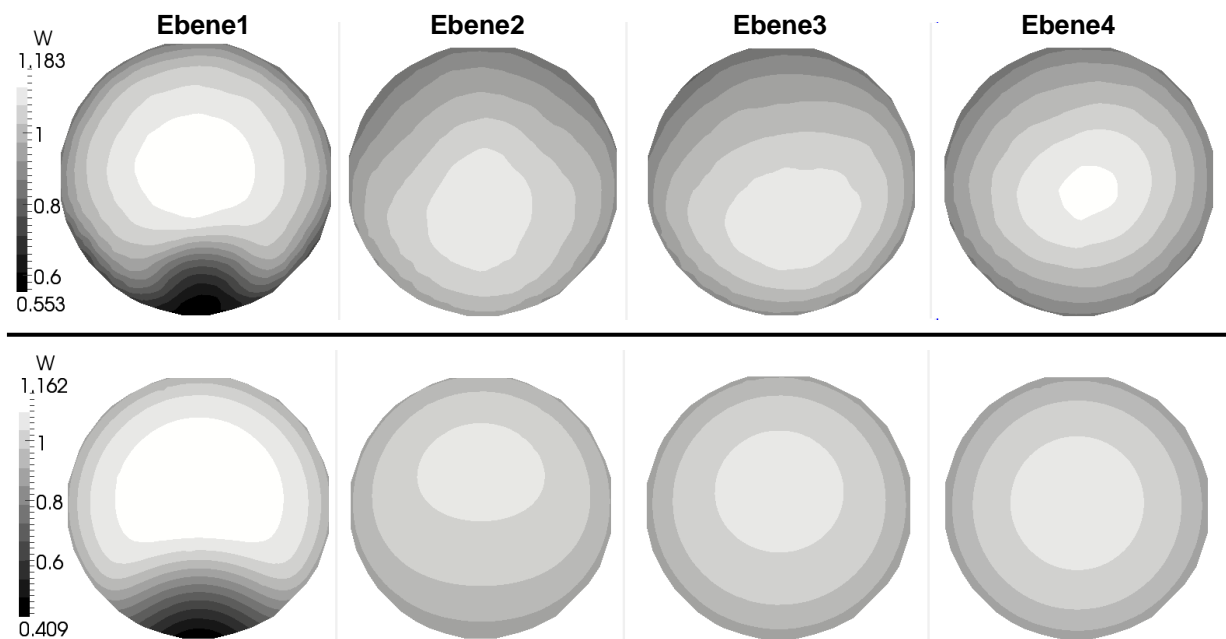


Abbildung 3: Darstellung der Geschwindigkeitsprofile, oben: SPIV Messungen, unten: Simulation mit dem κ - ω -Modell, jeweils von links nach rechts in Ebene1, 2, 3 und 4

Qualitativ können zwischen den einzelnen RANS-Modellen kaum Unterschiede festgestellt werden.

Die RANS-Modelle bilden die Strömungsprofile aufgrund der starken Ablösung in den beiden mittleren Messebenen nicht zufriedenstellend ab. Eine verlässliche Vorhersage des Strömungsprofils mittels CFD wäre aber gerade an diesen Stellen von Bedeutung, da im Feld

viele Messgeräte häufig im Abstand $z/D \approx 10$ bis $z/D \approx 25$ hinter einer Störung eingebaut werden. Die Simulation mit DES zeigt hier eine wesentlich bessere Abbildung der Realität. Die Geschwindigkeitsüberhöhung befindet sich wie in der Messung im unteren Bereich des Querschnitts, siehe Abbildung 4. Die DES-Simulation stellt also eine wesentliche Verbesserung gegenüber den RANS-Ergebnissen dar.

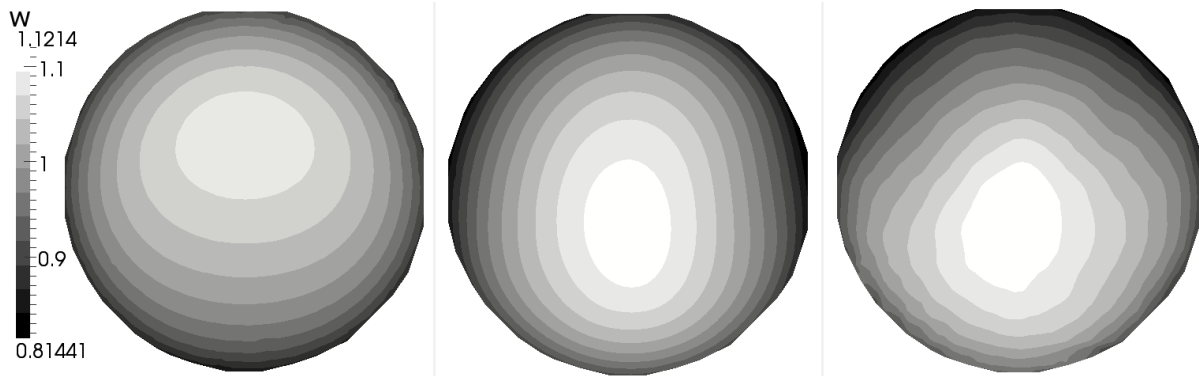


Abbildung 4: Darstellung der normierten Strömungsprofile in Hauptströmungsrichtung in Ebene2, von links nach rechts: mit dem κ - ω -Modell, DES-Simulation und SPIV-Messung.

Quantitativer Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messungen

Als Fehlermaß für den quantitativen Vergleich der Messdaten mit den Simulationen wird die L^1 -Norm

$$F_{L^1} = \iint_{\Omega} |w_m - w_s| dx$$

gewählt. Dabei ist Ω die jeweilige Querschnittsfläche der Messebene, w_m und w_s die Geschwindigkeit der Messwerte bzw. der Simulation. Es wird also eine Art „Volumenstrom“ der Abweichung bestimmt. Dabei zeigt sich, was schon in der qualitativen Betrachtung der Strömungsprofile zu erahnen war, dass die Fehler bei den RANS-Modellen im Nah- und Fernfeld ($z/D \approx 1,5$ und 50) mit 2 bis 3,5% klein sind im Vergleich zu den Messstellen im „mittleren“ Abstandsbereich, bei dem Werte zwischen 4% und 6% erreicht werden. Vor allem die Ebene2 (nach $13 D$) ist besonders problematisch. Die einzelnen RANS-Modelle zeigen in der Tendenz dasselbe Verhalten, das κ - ω Modell zeigt vor allem im Nahfeld die beste Übereinstimmung mit den Messwerten siehe Abbildung 5.

Bei der DES-Simulation sind an der Messtelle in Ebene2 ($z/D \approx 13$) die Abweichungen nur noch halb so groß im Vergleich zu den RANS-Modellen und liegen bei ca 2,4%. Die Abweichung im Nahfeld (Ebene1, $z/D \approx 1,5$) zeigt zwar eine geringfügig höhere Abweichung als das κ - ω -Modell, liegt jedoch mit ca. 2,6% noch unter den anderen beiden RANS-Modellen siehe Abbildung 6.

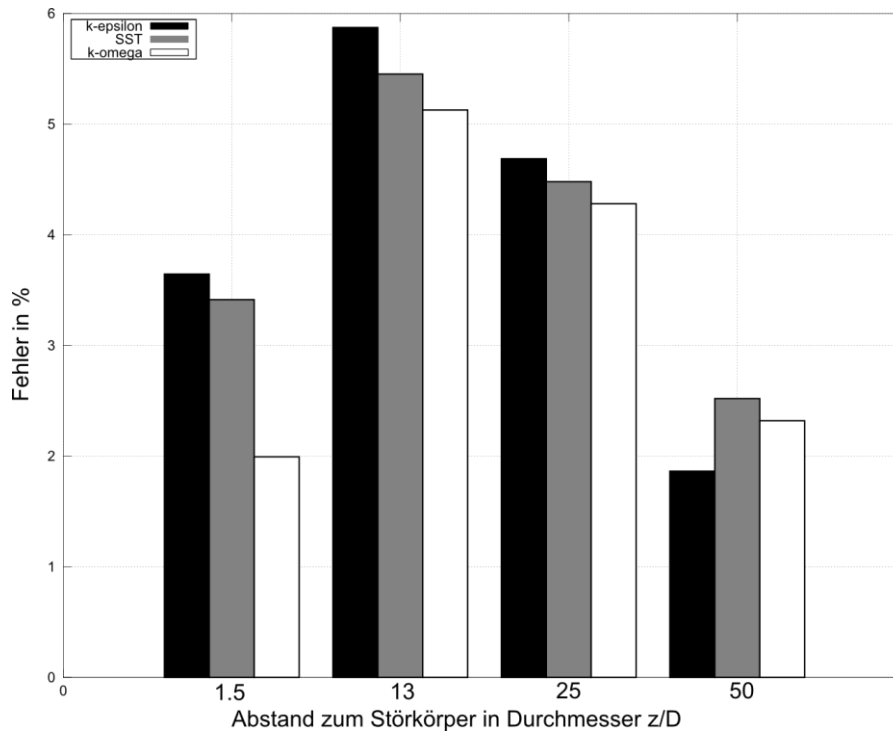


Abbildung 5: Differenz der RANS-Modelle zur Messung in der L^1 -Norm

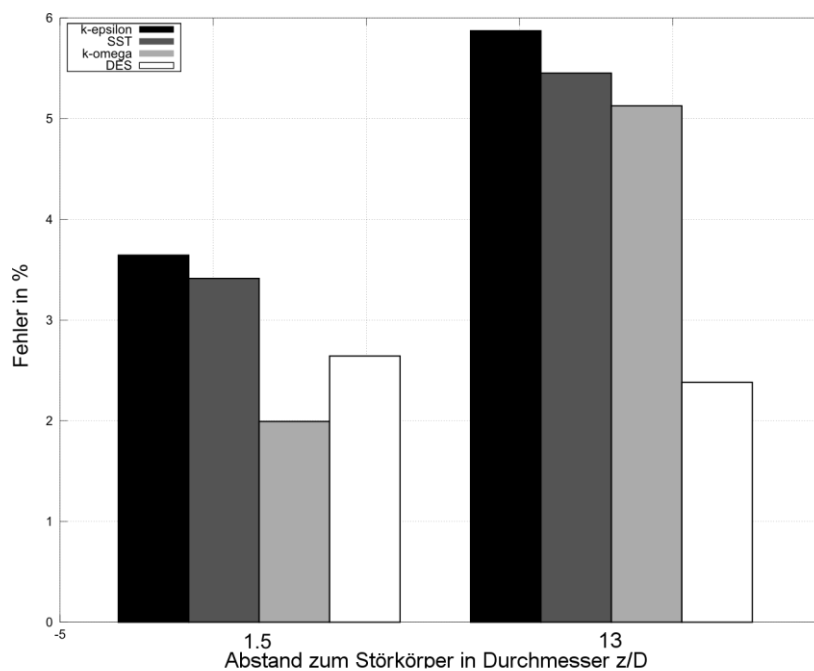


Abbildung 6: Differenz der RANS-Modelle und der DES-Simulation zur Messung in der L^1 -Norm

Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass die am häufigsten verwendeten RANS-Modelle den Verlauf der Strömung nicht entsprechend den Messungen abbilden können. Zwar stimmen die Simulationsergebnisse kurz hinter der Blende relativ gut mit den Messungen überein, allerdings ist das in der nächsten Messebene, die sich einen Meter weiter hinten befindet, nicht mehr der Fall: Der Schwerpunkt des Strömungsprofils liegt bei der Messung im unteren Bereich des

Rohres, bei der Simulation jedoch im oberen Bereich. Es ergibt sich eine integrale Abweichung von 5-6%. Es konnte mithilfe einer weitaus aufwändigeren, instationären Simulation mit DES (Detached Eddy Simulation) ein Ergebnis berechnet werden, welches diese Abweichung halbiert und auch qualitativ besser übereinstimmt.

Literatur

Ansys. (2014). The Detached Eddy Simulation Model (DES). In *CFX Modeling Guide*.

Davidson, L. (2014). Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling.

Spalart, P. R. (2001). Young-Person's Guide to Detached-Eddy Simulation Grids. *NASA/CR-2001-211032, 2001*.

Strelets, M. (2001). Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows. *39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*.