

UNTERSUCHUNG VON KOMPLEXEN INNENRAUMSTRÖMUNGEN MIT VERDRALLTER ODER PRÄZESSIERENDER ZUSTRÖMUNG MITTELS LDV-MESSTECHNIK

INVESTIGATION OF COMPLEX INTERIOR FLOWS WITH SWIRL OR TIME PERIODIC INFLOW BY LDV-MEASUREMENTS

TH. GÜRTLER, D. PETRAK, H. MOCIKAT, J. PRAZAK* UND H. HERWIG**

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Strömungsmechanik
Reichenhainer Str.70, Chemnitz, 09126,

*Institute of Thermomechanics AS CR, Dolejskova 1402/5, CS 18200 Praha 8

**Technische Universität Hamburg-Harburg, Thermofluidodynamik,
Denickestr. 17, 21073 Hamburg

Innenraumströmung, komplexe Zuströmung, LDV-Messungen, Datenbasis
Interior flow, complex inflow, LDV-measurements, database

Zusammenfassung

In früheren Beiträgen (Gürtler et al. 2000, Mocikat et al. 2003) wurden 3D-LDV-Messergebnisse einer einfachen Geometrie mit komplexer Innenströmung als experimentelle Datenbasis vorgestellt. Im vorliegenden Beitrag wurde die Geometrie geändert und die Zuströmung jetzt mit Drall oder zeitlicher Periodizität versehen. Mit Hilfe des 3D-LDV-Messsystems wurden die zeitgemittelten Komponenten des Geschwindigkeitsvektors und die Komponenten des Reynoldsschen Spannungstensors in ausgewählten Messpositionen bestimmt. Parameter der Messungen sind die Kennzahlen der Zuströmung: Reynolds-Zahl Re , Rotationszahl Ro bzw. Strouhal-Zahl St . Bei der zeitlich periodischen Zuströmung erfolgten die Messungen phasengesteuert. Insgesamt liegen damit umfangreiche experimentelle Daten zu Innenströmungen mit verdrallter bzw. zeitlich periodischer Zuströmung vor, die für einen Vergleich mit numerischen Simulationen und der Absicherung von Turbulenzmodellen genutzt werden können.

Einleitung

Komplexe Strömungen, die oft mit Problemen des Wärme- und Stoffübergangs sowie chemischen Reaktionen gekoppelt sind, werden zunehmend numerisch mit Hilfe kommerzieller CFD-Programme (z. B. von CFX, FLUENT, STAR-CD) untersucht. Dabei wird häufig außer acht gelassen, dass die berechneten Ergebnisse auf der numerischen Approximation verschiedener Differentialgleichungen beruhen, die durch Modellannahmen gekennzeichnet sind. Die Ergebnisse enthalten daher Unsicherheiten, die durch den numerischen Algorith-

5.2

mus und die theoretische Annäherung an die real vorliegende Strömung bedingt sind. Für turbulente Rohrströmungen mit Drall wird z.B. mit dem $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell ein deutlich zu hohes Turbulenzniveau berechnet und die beobachteten Charakteristika der Strömung nicht genau wiedergegeben. Mit Hilfe einer experimentellen Datenbasis können diese Abweichungen festgestellt und Maßnahmen zu ihrer Reduzierung vorgenommen werden. Nach Hogg und Leschziner 1989 ist bei Anwendung des Reynolds-Spannungs-Modells auf die turbulente drallbehaftete Rohrströmung die Übereinstimmung zwischen Berechnung und Experiment besser. In früheren Beiträgen (Gürtler et al. 2000, Mocikat et al. 2003) wurden 3D-LDV-Messungen als experimentelle Datenbasis für eine einfache Geometrie mit komplexer Innenströmung vorgestellt. Die Geometrie bestand aus einer kubischen Kammer mit Zwischenwand, die eine ausgebildete, turbulente Rohrströmung als Zuströmung besaß. Zusätzlich zur Änderung der Kammergeometrie wurde für die hier vorgestellten Messungen die Zuströmung neu konzipiert. Alternativ ist vorgesehen:

- Turbulente Rohrströmung mit einstellbarem Drall
- Turbulente Rohrströmung mit einstellbarer zeitlicher Periodizität (präzessierende Einströmung)

Es wurde eine konstruktive Lösung mit einem auswechselbaren Einsatz im Zuströmrohr realisiert, mit der die verdrehte bzw. präzessierende Zuströmung erzeugt werden konnte. Dabei wurde auf eine genaue Erzeugung des Dralls bzw. der Periodizität sowie auf möglichst große Einstellbereiche von Drall und Periodizität Wert gelegt. Das komplexe Strömungsfeld der Kammer wurde für beide Zuströmungen mittels 3D-LDV-Messungen in ausgewählten Positionen erfasst. Die experimentelle Datenbank enthält die zeitgemittelten Komponenten des Geschwindigkeitsvektors sowie die Komponenten des Reynoldsschen Spannungstensors in Abhängigkeit von der Messposition und der Strömungsparameter Reynolds-Zahl, Rotationszahl bzw. Strouhal-Zahl. Die Ergebnisse werden im Beitrag anhand von Beispielen dargestellt.

Versuchsstand

Abbildung 1 zeigt die gewählte Geometrie für die Hauptkammer. Die Strömung wird durch einen Saugventilator erzeugt. Im Zuström-Rohr liegt mit $Re > 10000$ eine ausgebildete turbulente Strömung vor. Die mittleren Geschwindigkeiten in der Hauptkammer betragen im Mittel ca. 0,2 m/s.

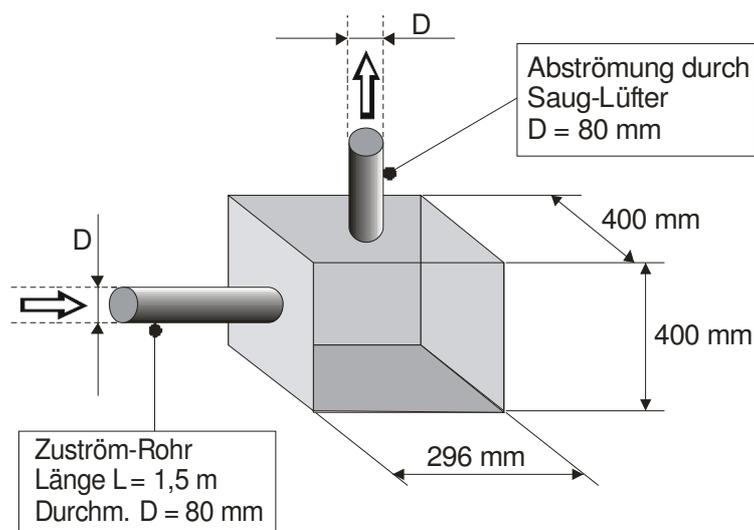


Abb. 1: Hauptkammer, gefertigt aus 8 mm Piacylplatten
Die Maßangaben sind Innenmaße.

Um der axialen Strömung im Zuström-Rohr eine Umfangskomponente aufprägen zu können, wurde in das Zuström-Rohr ein drehbares Rohrelement eingesetzt, das mit Wabengleichrichtermaterial gefüllt ist. Die Geometrie der Anordnung ist in Abbildung 2 angegeben.

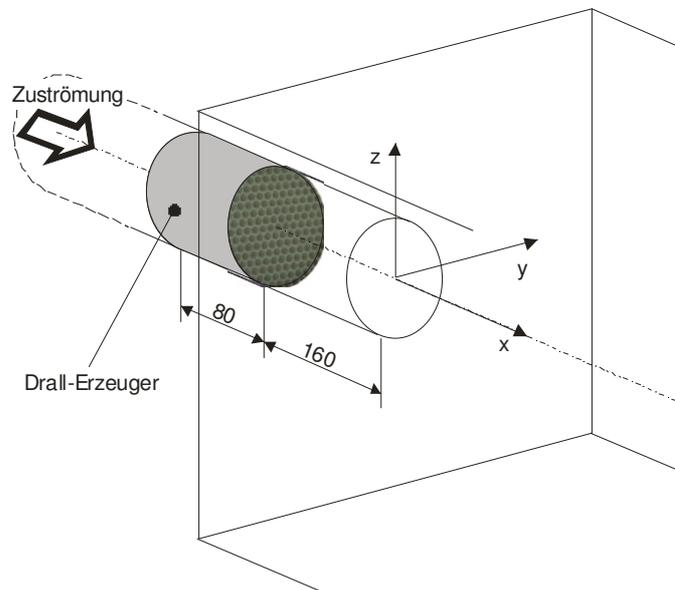


Abb. 2: Geometrie der Zuströmung mit Drall-Erzeuger
Wabendurchmesser 6,0 mm, Wabenlänge 80 mm

Diese Art der Drallerzeugung bietet nach Rocklage-Marliani 1998 folgende Vorteile:

- Axial- und Umfangsgeschwindigkeit können unabhängig voneinander eingestellt werden.
- Die Variation der Drallstärke erfolgt über die Drehzahl des Antriebs.
- Die Drallerzeugung ist bei sorgfältiger Konstruktion des Erzeugers rotationssymmetrisch.

Die Geometrie des Präzessionserzeugers ist in Abbildung 3 dargestellt.

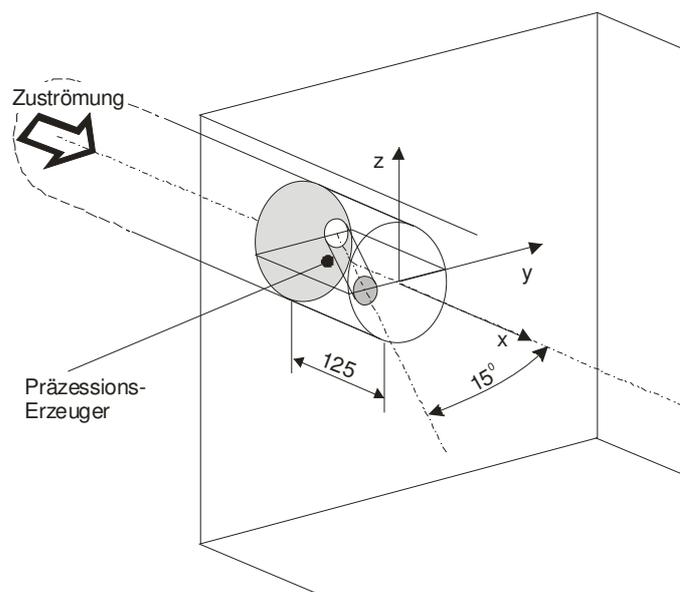


Abb. 3: Geometrie des Präzessionserzeugers

5.4

In den Drehkörper aus Kunststoff ist, um 15° gegen dessen Achse geneigt, das Ausströmrrohr mit einem Innen-Durchmesser von $D_P = 32$ mm eingefügt. Die Dreheinheit zum Antrieb der beiden Drehkörper ist in Abbildung 4 in der Variante Drallerzeugung angegeben.

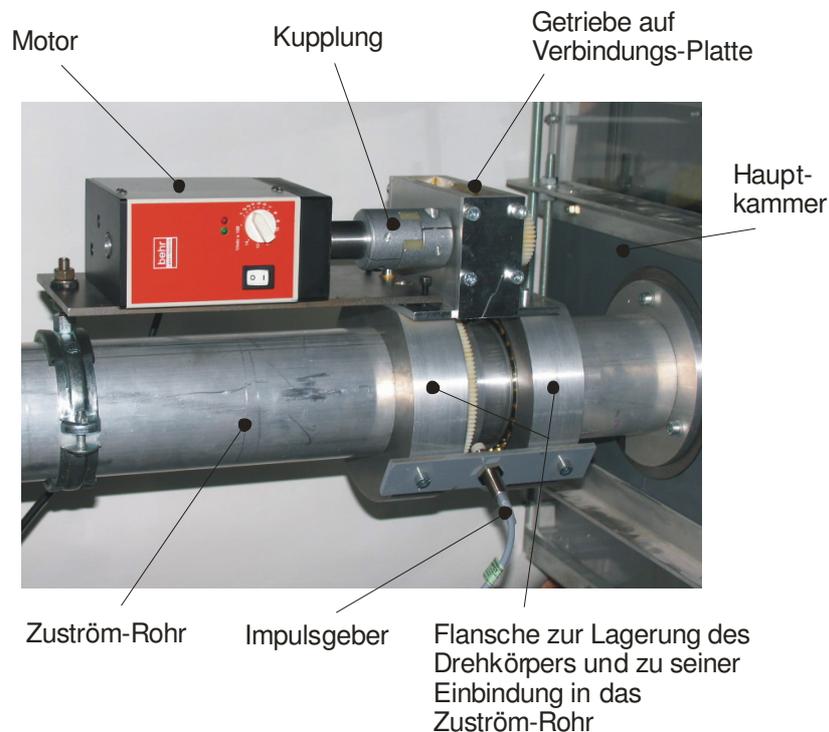


Abb. 4: Dreheinheit mit Drallerzeuger

Die Dreheinheit besteht aus dem Drehkörper mit Flanschen. Der Drehkörper liegt in den zwei Varianten „Drall- oder Präzessions-Erzeuger“ vor. Er ist mit Kugellagern in die Flansche eingefügt und wird mit dem Zahnkranz angetrieben. Die Flansche stellen die beidseitige Verbindung zum Zuströmrohr her. Die Flansche sind mit der Getriebe-Grundplatte starr verbunden. Das Getriebe erlaubt mit Hilfe verschiedener Wechselrad-Sätze eine stufenweise Variation der Drehzahl. Der Antrieb erfolgt über eine Kupplung mit einem Motor mit fein einstellbarer Drehzahl. Mit der Dreheinheit ist ein induktiver Impulsgeber verbunden, dessen Impuls-signale einem Zähler zur Drehzahlanzeige zugeführt werden.

Messsystem

Die variablen, einstellbaren Betriebsparameter der Versuchsanlage sind:

- Volumenstrom der Zuströmung, gemessen mit Normblende
- Drehzahl n des Drehkörpers, gemessen mit Zähler

Für die 3D-Messungen wurde das TSI-System Model 9800 mit der Transmitterbox Colorburst eingesetzt. Das System besitzt zwei fasergekoppelte Sende/Empfangsmodule (2D und 1D mit jeweils 83 mm Durchmesser und 500 mm Brennweite) und ist mit einem Argon-Ionen-Laser (Innova 70C, 5 W) von Coherent gekoppelt. Das System ist mit drei Echtzeit-Signalanalysatoren (RSA) und einem PC zur Signalverarbeitung (dataview von Aerometrics) ausgerüstet. Die DEHS-Tracerpartikel ($\approx 0,6 \mu\text{m}$) wurden mit dem System Six-Jet Atomizer Model 9306 von TSI zu Beginn des Zuströmrohres erzeugt.

Die Traversiereinrichtung ermöglicht die Sondenanordnung mit horizontaler bzw. vertikaler Sondenachse und die Justierung der Strahlengänge auf ein Messvolumen von 120 μm Durchmesser und 2,5 mm Länge. Die Sondenanordnung kann in x -, y - und z -Richtung um 700 mm, 500 mm bzw. 500 mm bewegt werden. Die Positioniergenauigkeit des Messvolumens beträgt $\pm 5 \mu\text{m}$. Die Anordnung der Sende/Empfangsmodule und das benutzte Koordinatensystem sind in Abbildung 5 dargestellt.

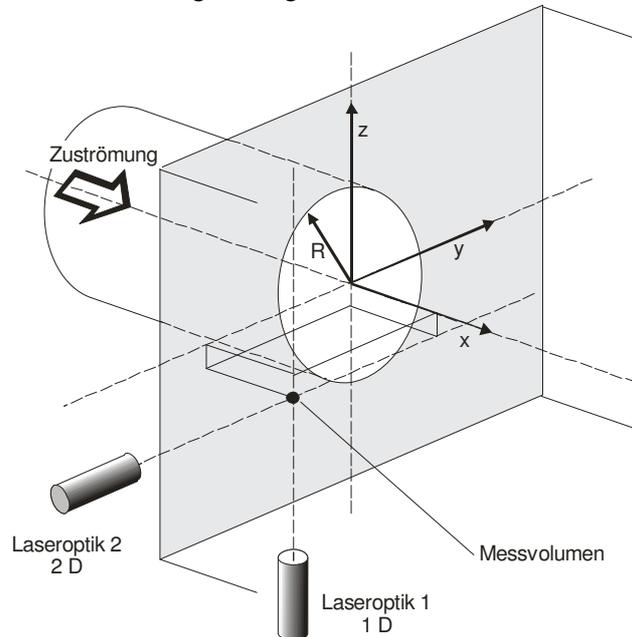


Abb. 5: Anordnung der Rückstreu-Lasermodule und des benutzten Koordinatensystems
($R = 40 \text{ mm}$)

Die Messungen erfolgten sowohl im Bereich der Zuströmung als vor allem im Innenraum der Hauptkammer in ausgewählten Messlinien bzw. Messgittern.

Messergebnisse Drall

Mit der mittleren Zuströmgeschwindigkeit \bar{u} und der Umfangsgeschwindigkeit $\pi n D$ des Drallerzeugers (n : Umdrehungen/s; D : Durchmesser des Drallerzeugers) können zwei maßgebende dimensionslose Kennzahlen gebildet werden:

$$\text{Re} = \frac{\rho \bar{u} D}{\mu} \quad (\text{Reynolds - Zahl}) \quad (1)$$

$$\text{Ro} = \frac{\pi n D}{\bar{u}} \quad (\text{Rotationszahl}) \quad (2)$$

Mit den Einstellungen $\bar{u} = 2 \text{ m/s}$, 4 m/s und 6 m/s sowie $n = 2/\text{s}$, $4/\text{s}$ und $6/\text{s}$ ergeben sich unterschiedliche Kombinationen von Re und Ro , die in Beziehung zum rotationsfreien Fall mit $n = 0$ und $\text{Ro} = 0$ gesetzt werden können. In Tabelle 1 sind die sich ergebenden Kombinationen angegeben, wobei die Messungen auf einem feinen Messgitter (hellgrau unterlegt) und einem groben Messgitter (dunkelgrau hinterlegt) erfolgten. Damit ergeben sich für die Zuströmung folgende Bereiche der Kennzahlen: $\text{Re} \approx 1 \dots 3 \cdot 10^4$ und $\text{Ro} = 0 \dots 0,5$. Berechnungen können unter der Annahme erfolgen, dass an der Position $x = -160 \text{ mm}$ eine turbu-

5.6

lente Rohrströmung mit der mittleren Geschwindigkeit \bar{u} und der Umfangsgeschwindigkeit $2\pi ny$ als Zuströmung vorliegt.

		Re		
		10 400	20 800	31 200
Ro	-		0.126	-
	0.503		0.251	0.1675
	-		0.377	-
	-			-

Tab. 1: Parameterkombinationen für die Zuströmung Drall
hellgrau: feines Messgitter, dunkelgrau: grobes Messgitter

In Abbildung 6 sind die Geschwindigkeitsprofile im Bereich der Zuströmung auf der Messlinie bei $x = 25$ mm dargestellt. Die Länge des Wabenkörpers ist ausreichend, um der Zuströmung die erwartete Drehung (theoretische Kurve) aufzuprägen.

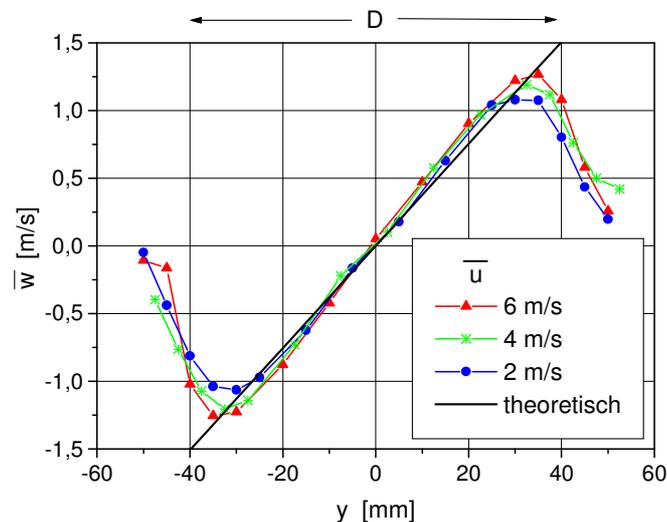


Abb. 6: Geschwindigkeitsprofile $\bar{w}(y)$ im Bereich der Zuströmung bei $x = 25$ mm, $z = 0$, $n = 6/s$, $w_{\text{theor}} = 2\pi ny$, (D ist Zuström-Durchmesser)

Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Geschwindigkeitsvektoren in der y,z -Ebene an der Position $x = 150$ mm für die Kennzahl $Ro = 0,251$. Der starke Einfluß der Absaugung an der oberen Hauptkammerwand ist deutlich zu erkennen.

Zusätzlich wurde mit Hilfe von drei im Abstand von 5 mm gesetzten Messlinien bei $x = 150$ mm aus den entsprechenden Geschwindigkeitsgradienten die Wirbelstärke

$$\bar{\omega}_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3)$$

bestimmt. Bei der Drallzuschaltung ist eine deutliche Zunahme der Wirbelstärke festzustellen.

Von den Ergebnissen zur Bestimmung der Komponenten des Reynoldsschen Spannungstensors sind in Abbildung 8 exemplarisch die Verteilungen der turbulenten Normalspannungen $\overline{u'_i u'_i}$ über der y -Achse dargestellt, wobei die Kennzahlen die Werte $Re = 2,08 \cdot 10^4$ und $Ro = 0,251$ besitzen.

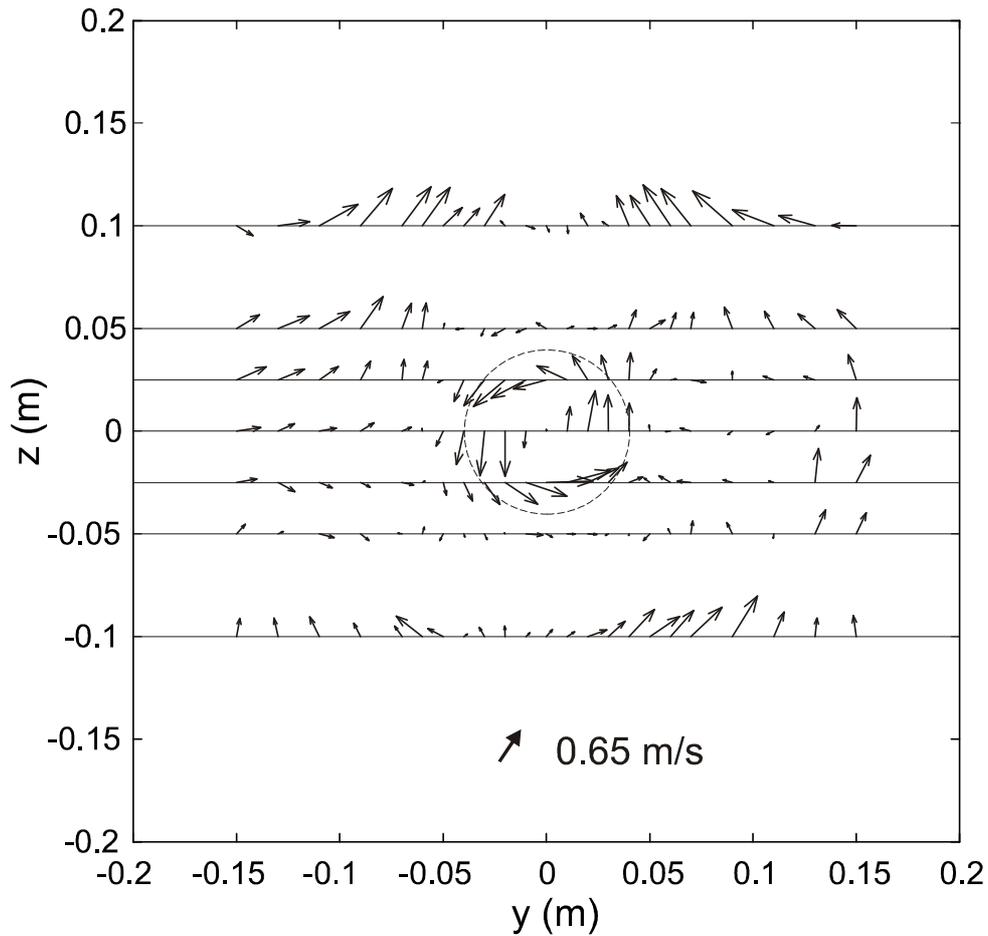


Abb. 7: Geschwindigkeitsverteilung im yz -Messquerschnitt bei $x = 150$ mm
 $Re = 2,08 \cdot 10^4$, $Ro = 0,251$, (Der Kreis markiert die Position der Zuströmung)

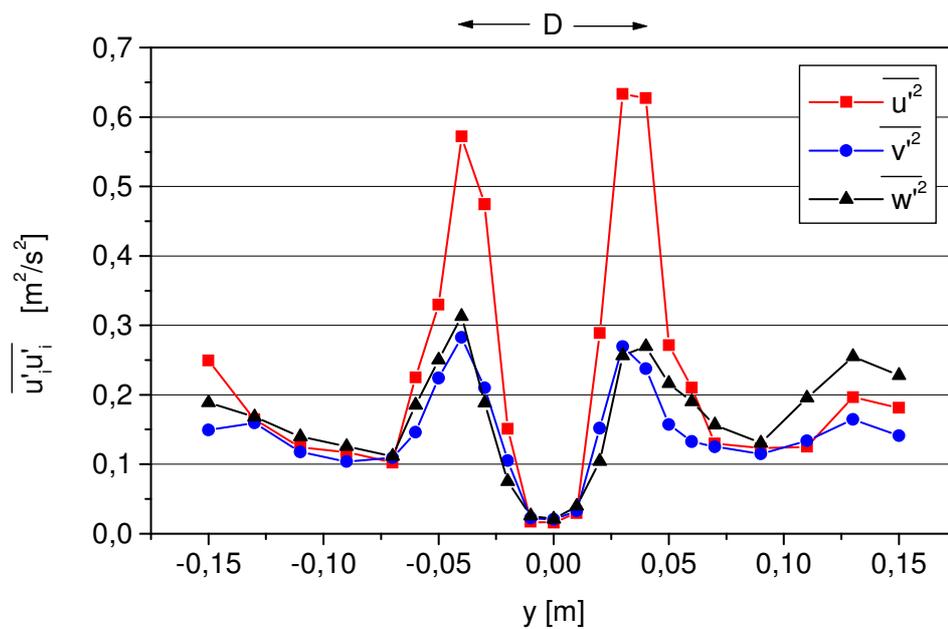


Abb. 8: Turbulente Normalspannungen für die Zuströmung mit Drall bei $Ro = 0,251$,
 $Re = 2,08 \cdot 10^4$, $x = 0,15$ m, $z = 0$, (D ist Zuström-Durchmesser)

5.8

Messergebnisse mit zeitlich periodischer Zuströmung

Dem kontinuierlichen Leistungsspektrum der Turbulenz ist im Fall der zeitlich periodischen Zuströmung eine Komponente überlagert, die von der Präzessionsbewegung verursacht wird. Um eine korrekte Datenauswertung zu gewährleisten, ist daher die Messwertaufnahme phasengetriggert vorzunehmen. Ein fest installierter Impulsgeber (Abb. 4) erfasst die Winkelstellung (Phase) des Präzessionserzeugers. Der erzeugte Impuls wird einer Triggerbox zugeführt, die ihrerseits die Messwertaufnahme des LDV-Systems steuert. An der Triggerbox können Messzeiten von 0,1 ms bis 1000 ms eingestellt werden.

Mit der mittleren Zuströmgeschwindigkeit \bar{u} und der Drehzahl n des Präzessionserzeugers können wiederum zwei maßgebende dimensionslose Kennzahlen gebildet werden:

$$\text{Re}_p = \frac{\rho \bar{u}_p D_p}{\mu} \quad (\text{Reynolds - Zahl}) \quad (4)$$

$$\text{St} = \frac{n D_p}{\bar{u}_p} \quad (\text{Strouhal - Zahl}) \quad (5)$$

Hier ist D_p der Durchmesser des geneigten Rohres im Präzessionserzeugerteil, \bar{u}_p ist die mittlere Geschwindigkeit in dem geneigten Rohr und n die Drehzahl. Aufgrund des großen Messaufwands wurde nur eine Einstellung verwendet: $\text{Re}_p = 2,6 \cdot 10^4$, $\text{St} = 7,7 \cdot 10^{-3}$, $n = 3$. Die Messungen erfolgten für folgende Positionen: $z = 0$, $x = 50$ mm, 150 mm und 250 mm, $y = -150$ mm...150 mm. Abbildung 9 zeigt die Lage der Ausströmöffnung in die Kammer mit der Festlegung des Phasenwinkels φ_p . Die Messwertaufnahme wird für jeden Umlauf gestartet, wenn sich die Ausströmöffnung bei der Position $\varphi_p = 30^\circ$ befindet.

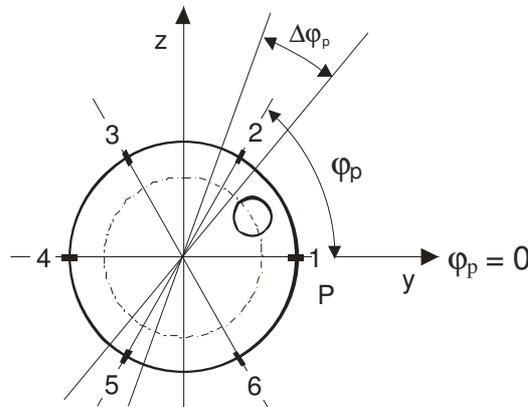


Abb. 9: Austrittsebene des Präzessionserzeugers mit Koordinatensystem, P beschreibt die Anzahl der Mess- bzw. Phasenfenster (hier 6) für einen Umlauf, φ_p den zugehörigen Phasenwinkel des jeweiligen Messfensters, $\Delta\varphi_p$ die benutzte Breite des Messfensters

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen exemplarisch die im Messfenster $\Delta\varphi_p$ zeitlich gemittelten Werte der Geschwindigkeitskomponenten und der turbulenten Normalspannungen in Abhängigkeit vom Phasenwinkel φ_p für den Messpunkt mit den Koordinaten $x = 0,15$ m, $y = -0,05$ m und $z = 0$. Für die Auswertung wurden ca. 3000 Messwerte von 5 Umläufen benutzt.

Datenbasis

Die koinzidente Datenrate lag im Mittel bei den Messungen bei 50/s.

Während für die Mittelwertbildungen beim Drall 200 Einzelwerte zur Verfügung standen, ging die Anzahl bei Präzession auf ca. 50 Einzelwerte zurück. Die Unsicherheiten der Ergebnisse wurden wie folgt abgeschätzt: Einzelwerte zu 3 %, Korrelationen zu 10 %. Für beide Zuströmfälle werden die Ergebnisse in einer Datenbasis zusammengefasst und zugänglich gemacht.

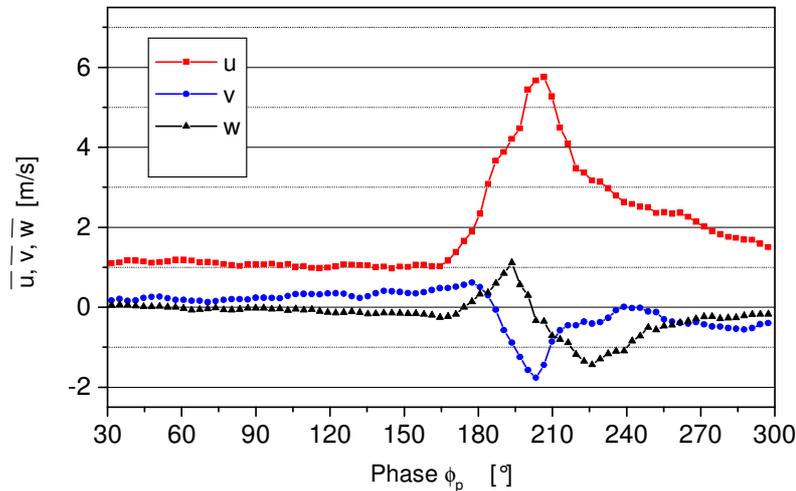


Abb. 10: Werte $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ in Abhängigkeit von der Phase ϕ_p für den Messpunkt $x = 0,15 \text{ m}$, $z = 0$, $y = -0,05 \text{ m}$
 $P = 83$, $\Delta\phi_p = 3,6^\circ$
 $Re_p = 2,6 \cdot 10^4$,
 $St = 7,7 \cdot 10^{-3}$, $n = 3$

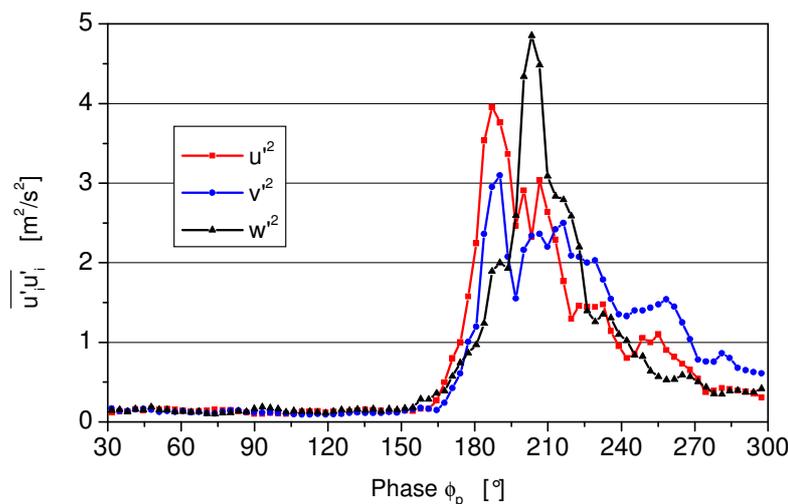


Abb. 11: Werte $\overline{u_i' u_i'}$ (Normalspannungen) in Abhängigkeit von der Phase ϕ_p für den Messpunkt $x = 0,15 \text{ m}$, $z = 0$, $y = -0,05 \text{ m}$
 $P = 83$, $\Delta\phi_p = 3,6^\circ$
 $Re_p = 2,6 \cdot 10^4$,
 $St = 7,7 \cdot 10^{-3}$, $n = 3$

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung der Untersuchungen.

Literatur

- Hogg, S., Leschziner, M., 1989: Computation of highly swirling confined flow with a Reynolds stress turbulence Model, AIAA Journal 27 (1), 57-63
 Gürtler, Th., Herwig, H., Mocikat, H., 2000: Untersuchung von komplexen Innenraumströmungen mittels LDV- Messtechnik, Proc. GALA-Fachtagung, S. 12.1-12.6
 Mocikat, H., Gürtler, T., Herwig, H., 2003: Laser Doppler velocity measurements in an interior flow test facility: A database for CFD-code evaluation, Exp. Fluids, 34, pp. 442-448
 Rocklage-Marliani, G., 1998: Dreidimensionale Laser-Doppler-Velozimetrie in turbulenter, drallbehafteter Rohrströmung, Diss., Ruhr-Universität Bochum, Fak. f. Maschinenbau, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 766