

STEREOSKOPISCHE PIV-MESSUNG EINES WIRBELZERFALLS

STEREOSCOPIC PIV MEASUREMENTS OF A VORTEX BREAKDOWN

Kraxner M., Lauterbach F., Muschelknautz U.

MCI, Management Center Innsbruck, Egger-Lienz-Straße 120, A-6020 Innsbruck, AUSTRIA

Drallströmung, Partikelabscheidung, Zyklon, Drallzerfall, Wirbelzerfall
Swirling Flows, Particle Separation, Cyclone, Vortex Breakdown

Zusammenfassung

Rotierende Gasströme werden häufig eingesetzt in Anwendungen des Wärme- und Energieaustauschs, bei Mischvorgängen von Gasen oder Flüssigkeiten oder bei der Fliehkraftabscheidung von Partikeln, beispielsweise mittels Zyklonen. Der rotierende Fluidstrom wird häufig über die Drallzahl charakterisiert. Die Auslegung des Wirbelerzeugers und die Oberflächenbeschaffenheit des Rohres beeinflussen den Zerfall des Wirbels sehr stark und beeinträchtigen somit den Wirkungsgrad des Prozesses. Mit Hilfe von PIV-Messungen lässt sich der Wirbelzerfall in einer rotierenden Rohrströmung sehr exakt bestimmen. Auf Basis solcher Messungen wird ein Berechnungsansatz für den Wirbelzerfall am Beispiel einer Drallströmung in einem Glasrohr abgeleitet. Ziel der Untersuchungen ist, den lokalen Zerfall der Drallstärke im Voraus zu berechnen und dadurch die effizientesten Abmessungen von Drallrohren in Anwendungen wie Wärmetauscher, Mischer oder Partikelabscheider ermitteln zu können.

Einleitung

Grundsätzlich stehen verschiedene Ansätze zur mathematischen Beschreibung von Drallströmungen zur Verfügung. Als rein theoretische Modelle sind potentialtheoretische Ansätze zu nennen, beispielsweise zur Beschreibung der Strömung um einen rotierenden Kreiszyklon in ruhender Umgebung [1][1]. Der reibungsbedingte zeitliche Zerfall eines Wirbels bei laminarer Strömung wurde von Oseen und Hamel beschrieben [2]. Wiedemann verwendet einen dem Oseen-Hamel-Modell ähnlichen Ansatz zur Nachbildung von mit LDA gemessenen Umfangsgeschwindigkeiten drallbehafteter Rohströmungen [3].

Zur Beschreibung von komplexen Geschwindigkeitsverteilungen, wie sie beispielsweise in Zyklonen auftreten, ist insbesondere der örtliche Drallzerfall von Bedeutung. Um hierfür ein praktisch anwendbares mathematisches Modell zu entwickeln, werden in der vorliegenden Arbeit mittels PIV die Geschwindigkeitsprofile entlang der Lauflänge mit hoher Auflösung gemessen und damit die Drallstärken in verschiedenen Messebenen ermittelt. Um die Rotationsstärke rotationssymmetrischer Strömungsfelder zu beschreiben, bietet sich nach [4] die Drallzahl S an:

$$S = \frac{\dot{D}}{r_0 \cdot \dot{I}} \quad (1)$$

als integrale Größe beschreibt das Verhältnis von Drehimpulsstrom

$$\dot{D} = 2 \cdot \pi \int_0^{r_0} \rho \cdot \bar{u} \cdot \bar{w} \cdot r^2 \cdot dr \quad (2)$$

zu Axialimpulsstrom

$$\dot{I} = 2 \cdot \pi \int_0^{r_0} \rho \cdot \bar{u}^2 \cdot r \cdot dr \quad (3)$$

bezogen auf die charakteristische Länge r_0 , die im vorliegenden Fall der Innenradius des Drallrohres ist. Die Größen u und w bezeichnen die Axial- bzw. Tangentialgeschwindigkeit beim Radius r . Der angeführte Formalismus beschreibt die gebräuchlichste Art der Berechnung der Drallzahl unter Vernachlässigung des Druckkraftterms im Axialimpulsstrom.

Versuchsaufbau

Die Drallströmung wird mittels eines Eintrittsleitapparates erzeugt. Der Anstellwinkel der Schaufeln beträgt 30° , gemessen gegen die Rohrachse. Das Rohr ist aus Quarzglas gefertigt, um den optischen Zugang für die Stereo-PIV-Messung zu ermöglichen. Eine parallel angeordnete Lineareinheit erlaubt bei einmaliger Kalibrierung die Aufnahme von Geschwindigkeitsfeldern in den untersuchten Messebenen ($1D_{\text{Rohr}}$ bis $5D_{\text{Rohr}}$, mit $D_{\text{Rohr}}=2r_0$) entlang der Rohrachse, s. Abbildung 1.

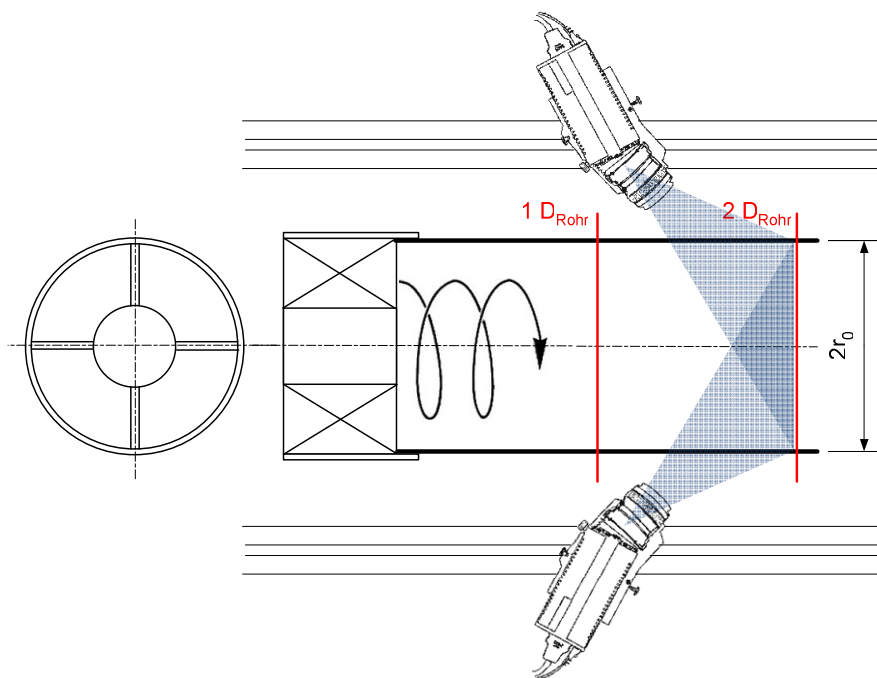


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

Empirische Untersuchungen

Die Gleichungen (1), (2) und (3) lassen sich nach Festlegung einer endlichen Intervallbreite Δr mit anschließender Aufsummierung über die Intervallringe auf die durchgeführten Messungen anwenden. Die Werte u und w werden dem jeweiligen Intervallrand bei größerem Radius zugeordnet, wobei nur Daten bis $\pm 0,99 \cdot r_0$ in der Rechnung berücksichtigt

werden. Dieser Radius stellt einen Kompromiss aus dem durch PIV noch erfassbaren Messbereich und der vollständigen Erfassung der Querschnitte mittels Drallzahl dar. Bei einer Intervallbreite von 0,64 mm ergeben sich die Drallzahlen gemäß Abbildung 2.

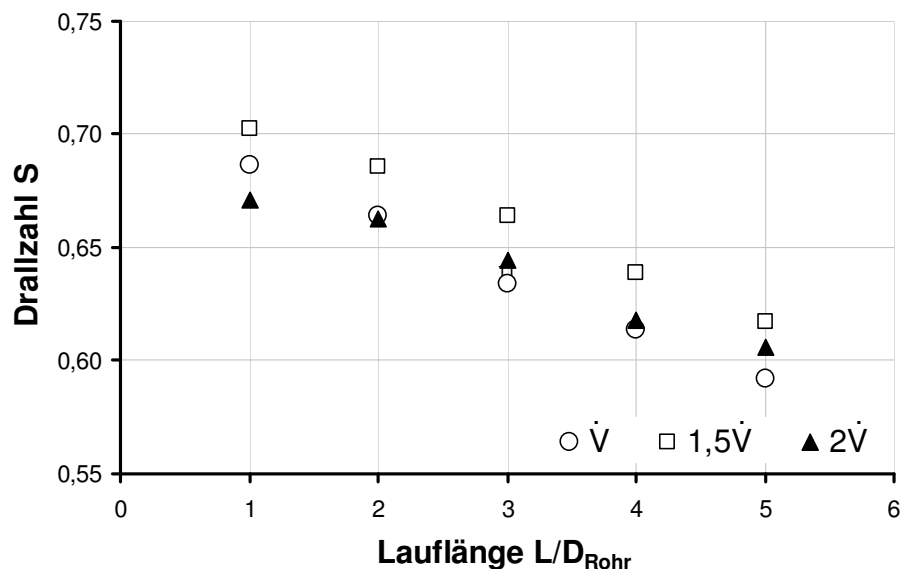


Abbildung 2: Drallzahlen in den gemessenen Querschnitten.

Erwartungsgemäß kommt es für die drei gemessenen Volumenströme zu einer ähnlichen Reduktion der Drallzahl entlang der Lauflänge L . Dies ist allein auf den Abbau des Drehimpulsstroms durch die Rohrreibung zurückzuführen, da der Axialimpulsstrom aufgrund des konstanten Rohrquerschnitts eine Erhaltungsgröße gemäß der Kontinuitätsgleichung darstellt. Darüber hinaus liegen die Werte in den jeweiligen Querschnitten äußerst dicht beieinander, die maximale Differenz beträgt lediglich 0,029. Auf Basis der gemessenen Daten kann angenommen werden, dass die Drallzahl und deren Abbau entlang des Rohres kaum vom Volumenstrom abhängig ist.

Aufgrund des begrenzten Datenumfangs und der geringen Änderung der Drallzahl über den gemessenen Bereich ist eine Regression zur Kurvenanpassung mit anschließender Extrapolation für größere Lauflängen nicht sinnvoll. Die vorliegenden Kurvenverläufe machen viele Kurvenanpassungen möglich, aus denen sich kein eindeutiger mathematischer Zusammenhang ableiten lässt. Aus diesem Grund wird die differentielle Drallzahl

$$s = \frac{d\dot{D}}{r_0 \cdot d\dot{I}} \quad (4)$$

eingeführt. Sie beschreibt den differentiellen Dreh- und Axialimpulsstrom innerhalb der einzelnen Intervalle (Kreisringe) auf dem Radius r , jeweils bezogen auf den Rohrrinnenradius r_0 . Abbildung 3 zeigt die resultierenden Kurvenverläufe exemplarisch für die Messdaten bei \dot{V} . Die Verläufe für die Volumenströme $1,5\dot{V}$ und $2\dot{V}$ sehen nahezu identisch aus.

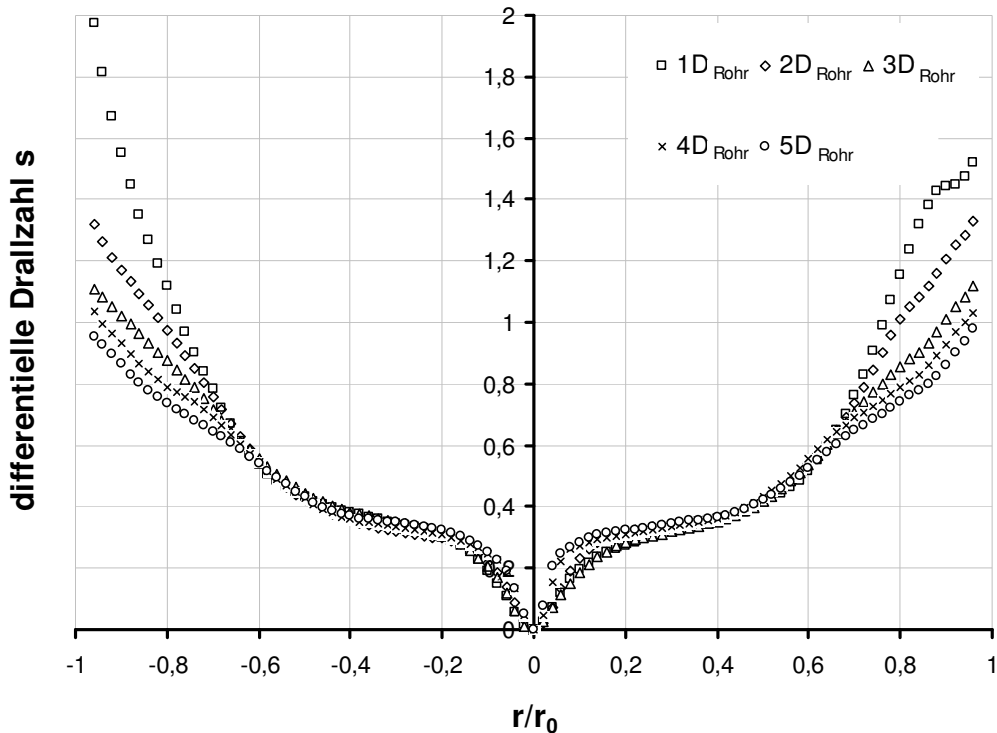


Abbildung 3: Differentielle Drallzahl in den gemessenen Querschnitten bei \dot{V} .

Vorteil der Auftragung der differentiellen Drallzahl ist die deutlich erkennbare Differenz der Kurvenverläufe in den verschiedenen Messebenen, insbesondere in deren Randbereichen. Die Änderung der Steilheit der Kurven v.a. in diesen Randbereichen stellt dabei ein Maß für den Drallzerfall dar, das deutlich aussagekräftiger ist als die Änderung der integralen Drallzahl.

Im Rahmen der Modellierung wurden diese Kurven durch Ausgleichspolynome 2. Ordnung angenähert. Unter Vernachlässigung des Terms 1. Ordnung (kein asymmetrischer Versatz in x-Richtung) und Festlegung des y-Achsenabschnitts auf den Wert von 0,2 ergeben sich Parabeln, die sich durch Gleichung (5) beschreiben lassen:

$$s(R, L) = \alpha(L) \cdot R^2 + 0.2 \quad (5)$$

Darin stellt

$$R = \frac{r}{r_0} \quad (6)$$

den dimensionslosen Radius dar.

In Tabelle 1 sind die ermittelten Koeffizienten α für alle gemessenen Querschnitte und Volumenströme angeführt. Auch hier lässt sich ein lediglich geringer Unterschied der Werte bei den unterschiedlichen Volumenströmen feststellen, was die arithmetische Mittelung der Werte rechtfertigt.

Tabelle 1: Quadratische Koeffizienten der Kurvenanpassung

	α			
	\dot{V}	$1,5\dot{V}$	$2\dot{V}$	Mittelwerte
$1D_{\text{Rohr}}$	1609	1689	1558	1619
$2D_{\text{Rohr}}$	1232	1142	1197	1190
$3D_{\text{Rohr}}$	995	1012	994	1000
$4D_{\text{Rohr}}$	861	901	878	880
$5D_{\text{Rohr}}$	760	769	803	777

Werden die Mittelwerte in Gleichung (5) eingesetzt, ergeben sich für alle drei Volumenströme identisch die vereinfachten Verläufe der differentiellen Drallzahl in den einzelnen Querschnitten. Die Übereinstimmung des Modells mit den Messdaten ist am Beispiel der Ebenen $2D_{\text{Rohr}}$ und $5D_{\text{Rohr}}$ in Abbildung 4 veranschaulicht.

In den äußeren Teilen der Parabeläste, auf die das Modell abzielt, zeigt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung, während es im Kernbereich zu größeren Abweichungen kommt. Da jedoch der durch den Kernbereich strömende Volumenstrom im Vergleich zum Volumenstrom in den äußeren Bereichen sehr klein ist und für viele Anwendungen die Umfangsgeschwindigkeiten im Wandbereich ausschlaggebend sind, kann die vorliegende Anpassung als hinreichend genau erachtet werden.

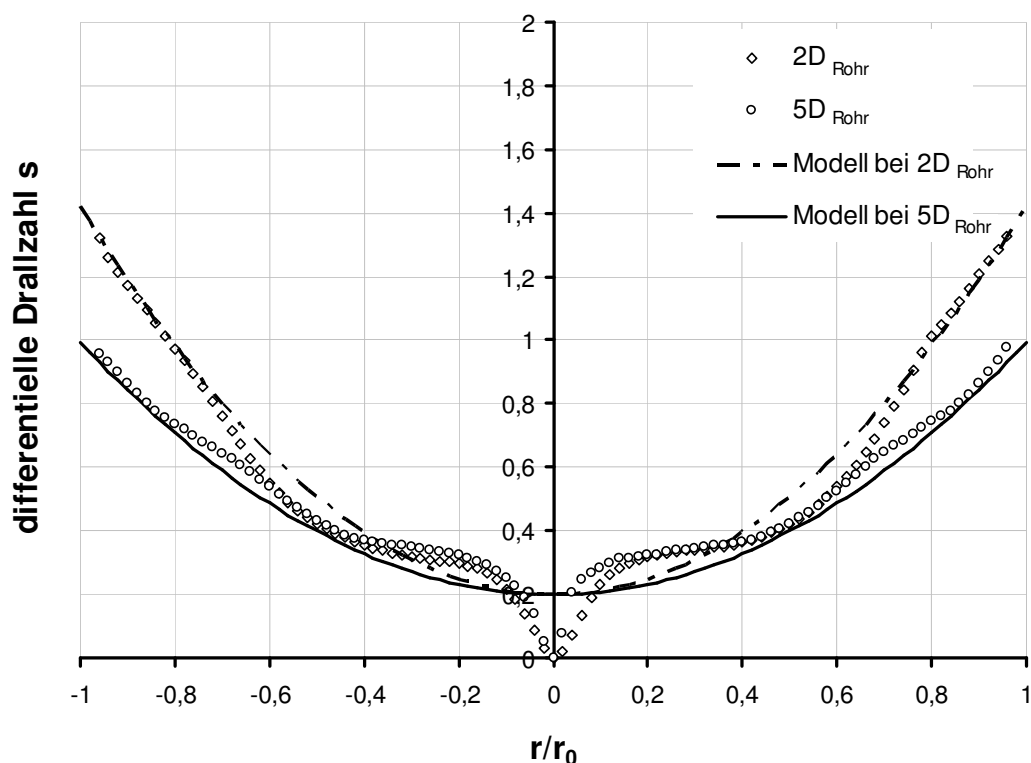


Abbildung 4: Vergleich von Messdaten und Modelldaten.

Die in Tabelle 1 ermittelten Koeffizienten α sind in Abbildung 5 über die Lauflänge aufgetragen und mit einer Kurvenanpassung versehen. Die Anpassung der von der Lauflänge abhängigen Potenzfunktion in Abbildung 5 weist einen Determinationskoeffizienten von 0,998 auf.

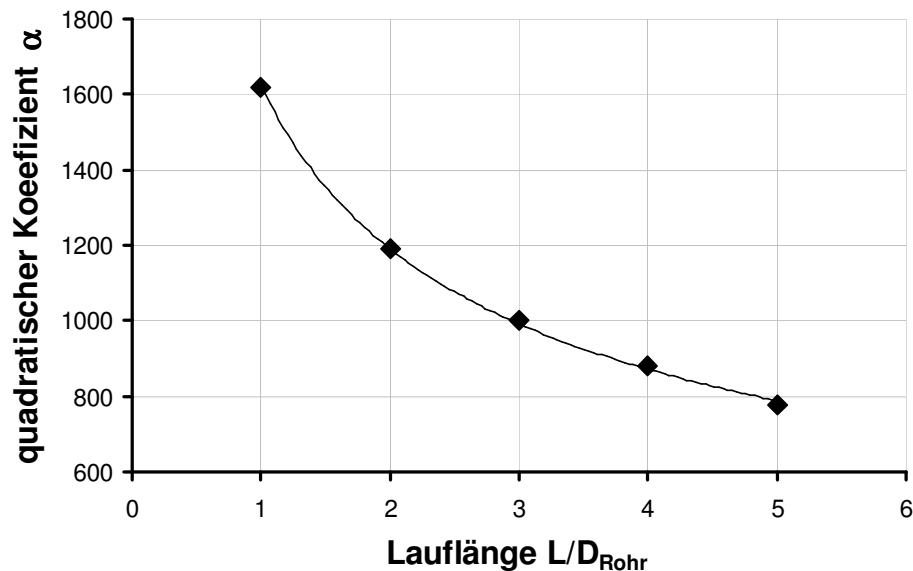


Abbildung 5: Potenzfunktion als Ausgleichsfunktion der quadratischen Koeffizienten über der Lauflänge L .

Die Änderung des quadratischen Koeffizienten lässt sich demnach über das Potenzgesetz

$$\alpha(L) = \alpha(D_{Rohr}) \cdot \left(\frac{L}{D_{Rohr}} \right)^{-0.47} \quad (7)$$

beschreiben. Die Extrapolation im Bereich $(0 \dots 1)D_{Rohr}$ hin zum Eintrittsleitapparat führt dabei zu einem Ansteigen ins Unendliche und lässt somit keine praktischen Aussagen zu. Die Extrapolation in die Strömungsrichtung hingegen weist einen asymptotisch gegen Null strebenden Verlauf auf, der qualitativ dem zu erwartenden Drallzerfall entspricht. Abbildung 6 stellt den theoretischen Verlauf von α im Vergleich zu den quadratischen Koeffizienten aus Tabelle 1 vor der Mittelung dar. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit dem aus den Mittelwerten generierten Modell.

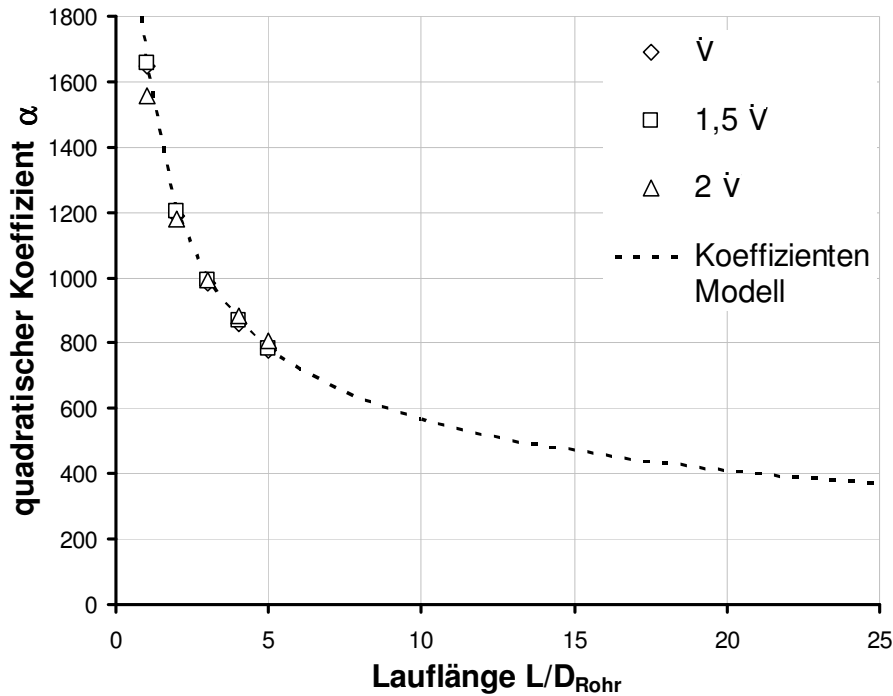


Abbildung 6: Quadratische Koeffizienten α für verschiedene Volumenströme im Vergleich mit dem Berechnungsansatz gemäß Gleichung (7).

Ausblick

In zukünftigen Messungen soll der entwickelte Berechnungsansatz für den Zerfall der differentiellen Drallzahl in einer Rohrströmung auf seine Gültigkeit bei größeren Laufängen hin überprüft werden. Weitere Messungen sollen Aufschluss darüber geben, unter welchen Bedingungen die im Rahmen der Untersuchungen gefundene Unabhängigkeit der Drallzahl vom Volumenstrom gültig ist. Ferner soll der Einfluss anderer Geometrien des Eintrittsleitapparates sowie der Oberflächenbeschaffenheit des Drallrohres auf den Drallzerfall erforscht werden. Auf Basis dieser Untersuchungen soll ein Berechnungsmodell für die Änderung der integralen Drallzahl entlang der Laufänge entwickelt werden, das ein weites Anwendungsspektrum bedient.

Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung der umfangreichen Untersuchungen durch das MCI sei an dieser Stelle gedankt.

Literatur

- [1] Schlichting, H., Gersten, K., Grenzschicht-Theorie, Springer Verlag, 10. Auflage, 2006
- [2] Kaufmann, H., Technische Hydro- und Aeromechanik, Springer Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1963
- [3] Wiedemann, A., Mehrkomponenten-Laser-Doppler-Anemometer-Messungen in einer drallbehafteten Rohr- und Brennkammerströmung, Dissertation, Universität Göttingen, 2001
- [4] Weng, M., Experimentelle und Numerische Untersuchung von Gleichstromzyklonen, Dissertation, RWTH Aachen, 2002