

**Angular momentum transport and pattern formation in medium- and wide-gap
turbulent Taylor-Couette flow: An experimental study**

Abstract

The effective transport of momentum in turbulent flows can be further enhanced by the formation of organized flow patterns or structures. When such flows pass solid walls, a considerable drag with associated energy losses is generated. A suitable model to investigate the influence of flow patterns in turbulent flows on the drag on solid walls is the so-called Taylor-Couette (TC) system, where the fluid is confined by two coaxial and independently rotating cylinders. The TC flow features multiple different turbulent flow states, where the interaction of specific flow patterns, e.g. large-scale Taylor rolls and small-scale plumes, with the turbulence determines the angular momentum transport in the gap. This transport causes a torque on the cylinder walls due to the drag induced by the fluid. In addition, by an appropriate choice of the control parameters of the TC system, namely the shear Reynolds number Re_s , the rotation number or the ratio of angular velocities μ , and the radius ratio η , the influence of shear, rotation and wall curvature on the torque can be studied separately, which allows fundamental insights into the transport processes.

Due to the above-mentioned properties, turbulent TC flow is experimentally investigated within this thesis for medium ($\eta = 0.714$) and wide gaps ($\eta = 0.357$, $\eta = 0.5$). Direct torque measurements are performed to determine the global transport of angular momentum, while qualitative flow visualizations and quantitative velocity measurements (particle image velocimetry) in horizontal planes at different cylinder heights are used to uncover the corresponding flow patterns.

For the largely unexplored radius ratio regime of $\eta = 0.357$, the directly measured torque features a transition as a function of shear, which is connected to the capacity of the outer cylinder to emit angular momentum plumes. When the cylinders rotate slightly in counter-direction, a maximum in torque occurs at $\mu_{max}(\eta = 0.357) = -0.123$, which is induced by the formation and strengthening of large-scale Taylor vortices.

In the case of a wide-gap TC system with $\eta = 0.5$, the characteristics of the mean velocity field are analyzed in the flow regime of the torque maximum. The enhanced momentum transport at $\mu_{max}(\eta = 0.5) = -0.2$ is accompanied by a flat profile of the angular velocity in the bulk, which exemplifies the effective mixing in the gap. In addition, the contribution of the large-scale Taylor rolls to the overall momentum transport clearly exceeds the contribution of the turbulent fluctuations.

For a radius ratio of $\eta = 0.714$, the local angular momentum transport is analyzed with ($\mu_{max}(\eta = 0.714) = -0.36$) and without ($\mu = 0$) pronounced Taylor vortices. It is shown that the momentum transport due to these vortices mainly takes place at the axial height of the vortex in- and outflow regions, where the radial and azimuthal velocity components are highly correlated. This correlation results from the local ejection of small-scale plumes from the cylinder walls, which drive the large-scale circulation. Moreover, the turbulent Taylor vortices feature azimuthally traveling waves similar to the wavy Taylor vortex flow. Accordingly, the angular momentum transport in medium- and wide-gap turbulent TC flow at μ_{max} is dominated by the interaction of large-scale Taylor rolls, small-scale plumes and turbulence.

Drehimpulstransport und Strukturbildung in der turbulenten Taylor-Couette Strömung in mittleren und weiten Spalten: Eine experimentelle Studie

Zusammenfassung

Der effektive Impulstransport in turbulenten Strömungen kann durch die Ausbildung geordnete Strömungsmuster bzw. Strukturen weiter verstärkt werden. Wenn solche Strömungen feste Wände umspülen, wird ein erheblicher Reibungswiderstand und damit einhergehende Energieverluste erzeugt. Ein geeignetes Modell zur Untersuchung des Einflusses von Strömungsmustern in turbulenten Strömungen auf den Reibungswiderstand an festen Wänden ist das sogenannte Taylor-Couette (TC) System, bei dem die Flüssigkeit von zwei koaxialen und unabhängig voneinander rotierenden Zylindern begrenzt wird. Die TC-Strömung weist eine große Vielfalt turbulenter Strömungszustände auf, wobei die Wechselwirkung spezifischer Strömungsmuster, wie zum Beispiel großskaliger Taylor-Wirbel und kleinskaliger Plumes, mit der Turbulenz den Drehimpulstransport im Spalt bestimmt. Dieser Transport verursacht ein Drehmoment an den Zylinderwänden aufgrund des von der Flüssigkeit induzierten Strömungswiderstands. Darüber hinaus können der Einfluss von Scherung (Re_S), Rotation (μ) und Wandkrümmung (η) auf das Drehmoment unabhängig voneinander untersucht werden, was grundlegende Erkenntnisse über die Transportprozesse ermöglicht.

Aufgrund der oben genannten Eigenschaften wird in dieser Arbeit die turbulente TC-Strömung experimentell für mittlere ($\eta = 0.714$) und weite Spalte ($\eta = 0.357, \eta = 0.5$) untersucht. Direkte Drehmomentmessungen werden durchgeführt, um den globalen Transport des Drehimpulses zu bestimmen, während qualitative Strömungsvisualisierungen und quantitative Geschwindigkeitsmessungen (particle image velocimetry) in horizontalen Ebenen eingesetzt werden, um die entsprechenden Strömungsmuster aufzudecken.

Für das weitgehend unerforschte Radienverhältnis von $\eta = 0.357$ weist das direkt gemessene Drehmoment eine Transition abhängig von der Scherung auf, die mit dem Vermögen des äußeren Zylinders zusammenhängt, drehimpuls-transportierende Plumes zu emittieren. Wenn sich die Zylinder leicht gegenläufig drehen, tritt ein Drehmomenten-Maximum bei $\mu_{max}(\eta = 0.357) = -0.123$ auf, das durch die Ausbildung und Anfachung großskaliger Taylorwirbel erzeugt wird.

Im weiten Spalt bei $\eta = 0.5$ werden die Eigenschaften des mittleren Geschwindigkeitsfeldes im Bereich des Drehmomenten-Maximums analysiert. Der erhöhte Impulstransport bei μ_{max} geht mit einem flachen Profil der Winkelgeschwindigkeit einher, welches die effektive Durchmischung im Spalt verdeutlicht. Zudem übersteigt der Beitrag der Taylor-Wirbel am globalen Impulstransport deutlich denjenigen der Turbulenz.

Für $\eta = 0.714$ wird der lokale Impulstransport mit (μ_{max}) und ohne ($\mu = 0$) ausgeprägte Taylor-Wirbel analysiert. Es wird gezeigt, dass der Impulstransport aufgrund der Taylor-Wirbel hauptsächlich auf Höhe der Wirbelein- und -ausströmgebiete stattfindet, in denen die radiale und azimutale Geschwindigkeitskomponente deutlich korreliert sind. Diese Korrelation resultiert aus der lokalen Emission kleinskaliger Plumes von den Zylinderwänden, welche die großskalige Zirkulation antreiben. Darüber hinaus weisen die turbulenten Taylor-Wirbel Wellen auf, die sich in Umfangsrichtung ausbreiten, wie sie auch bei der welligen Taylor-Wirbelströmung auftreten. Dementsprechend wird der Drehimpulstransport in der TC-Strömung in mittleren und weiten Spalten am Drehmomenten-Maximum durch das Zusammenwirken von großskaligen Taylor-Wirbeln, kleinskaligen Plumes und Turbulenz bestimmt.