

LDA - MESSUNGEN IN DER ZYLINDERSPALTSTRÖMUNG MIT SEITENFLUSS

LDV MEASUREMENTS IN THE FLOW INSIDE A CYLINDRICAL GAP WITH CROSSFLOW

Peter Stücker¹, Matthias Nobis², Marcus Schmidt², Nicoleta Scurtu³, Christoph Egbers³

¹ Westsächsische Hochschule Zwickau
Institut für Kraftfahrzeugtechnik
Postfach 20 10 37
D-08012 Zwickau

² Westsächsische Hochschule Zwickau
Forschungs- und Transferzentrum
Postfach 20 10 37
D-08012 Zwickau

³ Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre
Brandenburgische Technische Universität
Siemens-Halske-Ring 16
D-03046 Cottbus

hydrodynamisch geschmiertes Radialgleitlager, Schmierspaltströmung; LDA
Taylor, Couette, journal bearing; LDV

Abstract

Im Spalt zwischen zwei rotierenden Zylindern wird der Übergang von der Couette-Strömung zur Taylor-Wirbel-Strömung durch die Winkelgeschwindigkeiten der beiden Zylinder, ihrer Geometrie und den dazu gehörenden Reynoldszahlen beschrieben. Strömt zusätzlich durch eine seitliche Bohrung, welche sich im Außenzylinder befindet, Flüssigkeit in den Zylinderspalt ein, entstehen durch die Interaktion zwischen diesem Seitenfluss mit der rotierenden Hauptströmung komplexe dreidimensionale Strömungsstrukturen.

In dem vorgestellten Beitrag werden zunächst Untersuchungen über die Entstehung der Taylor-Wirbel in Abhängigkeit von Streckungsverhältnis und Exzentrizität vorgestellt. Es werden experimentelle Ergebnisse in Form von Geschwindigkeitsprofilen gezeigt, die mit einem LDA gemessen wurden. Diese Daten werden mit Ergebnissen aus der numerischen Simulation basierend auf der Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen verglichen und diskutiert. Es wird eine Beziehung zwischen der Anzahl der entstandenen Taylor-Wirbel und dem Streckungsverhältnis aus Breite und Spalthöhe des Zylinderspaltes angegeben.

Der zweite Teil des vorgestellten Beitrages befasst sich mit den Strömungsstrukturen, die durch das Zusammenwirken von Seitenfluss und Hauptströmung entstehen. Diese Strömungskonfiguration ist mit den Strömungsverhältnissen im hydrodynamischen Radialgleitlager vergleichbar und dient der Voruntersuchung zum Vorhaben 3D-CFD Gleitlager. Am optimierten Zylinderspaltexperiment werden mit dem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) Geschwindigkeiten im Zylinderspalt in Abhängigkeit der Hauptparameter: Spaltweite, Reynolds-

zahl, Exzentrizität, Volumenstromverhältnis und Bohrungslage gemessen. Die so gewonnenen Daten dienen der Evaluierung der numerischen Ergebnisse und der Optimierung des numerischen Modells. Die Ergebnisse werden diskutiert und es werden Empfehlungen zur Gitterstruktur für die spezielle Geometrie des Rechengebietes in Radialgleitlagern unter Einbeziehung von Exzentrizität und Seitenfluss angegeben.

Einleitung

Die Strömung eines Fluids zwischen einem rotierenden Innen- und einem feststehenden Außenzylinder ist eng mit der Strömung im Schmier-spalt eines hydrodynamisch geschmier-ten Gleitlagers verwandt. Gleitlager haben gegenüber Wälzlagern eine Reihe an Vorzügen und sind daher für den modernen Maschinenbau von enormer Bedeutung. Neben akustischen, finanziellen und leichtbautechnischen Vorteilen, sind Gleitlager durch einen nahezu verschleißfreien Betrieb und die damit verbundene lange Lebensdauer gekennzeichnet. Dennoch treten unter dem Zusammenspiel mehrerer spezifischer Parameter frühzeitige Schadensfälle auf. Eine mögliche Ausfallursache ist die Kavitation und der damit verbundene erosive Materialabtrag an der Welle bzw. Lagerschale. Um die Ursache von Kavitation zu erkunden, ist es notwendig, eine genaue Kenntnis über den Zustand der Strömung im Schmier-spalt zu haben. Dabei helfen maßgeblich experimentelle Versuche und die immer weiter voranschreitenden Methoden der numerischen Simulation, die in heutiger Zeit ein wesentliches und unverzichtbares Mittel der ingenieurtechnischen Arbeit darstellen.

Geometrische Kenngrößen

In der Abb. 1 sind die wichtigsten geometrischen Kenngrößen des Experiments bzw. der Simulation dargestellt. In den Gleichungen 1 bis 6 werden charakteristische Parameter definiert.

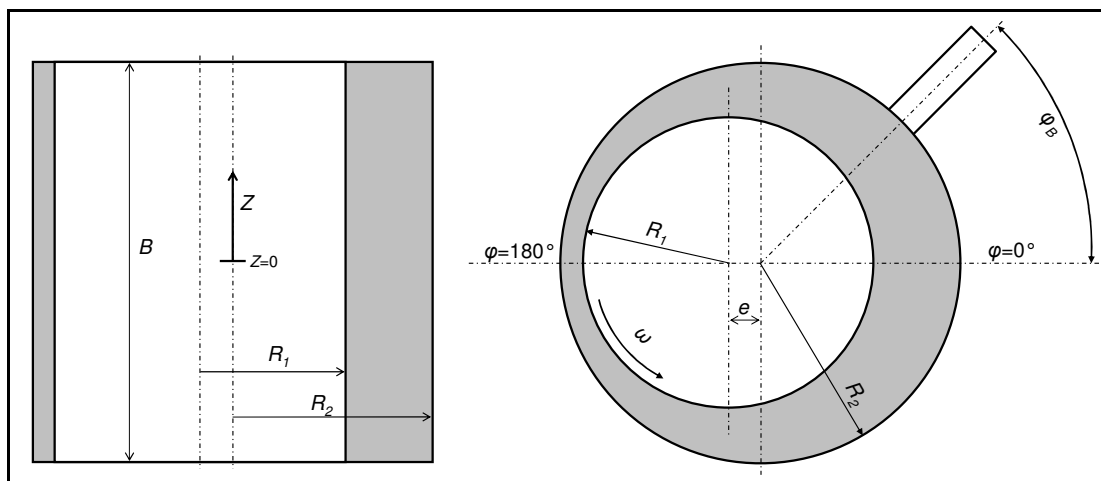


Abb. 1: Geometrische Kenngrößen

$$H_0 = R_2 - R_1 \quad (1)$$

$$\Psi = \frac{H_0}{R_1} \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{B}{H_0} \quad (3)$$

$$U_1 = \omega \cdot R_1 \quad (4)$$

$$Re = \frac{H_0 \cdot R_1 \cdot \omega}{\nu} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{e}{H_0} \quad (6)$$

Experimenteller Aufbau

Strömungstechnische Untersuchungen im Schmierpalt eines realen Gleitlagers im eingebauten Zustand sind aufgrund des sehr geringen Platzangebotes schwierig oder überhaupt nicht realisierbar. Der Schmierpalt eines realen Gleitlagers ($\psi \approx 0,1\%$) ist viel zu klein, um mit Strömungsmesstechnik Zugang zum strömenden Öl zu erlangen. Es ist somit notwendig ein maßstäblich größeres Modell zu schaffen, an dem sich entsprechende Messungen durchführen lassen. Dabei muss die Ähnlichkeit zum realen Gleitlager beibehalten werden, um letztendlich Rückschlüsse von Strömungszuständen im Modell auf das Original ziehen zu können.

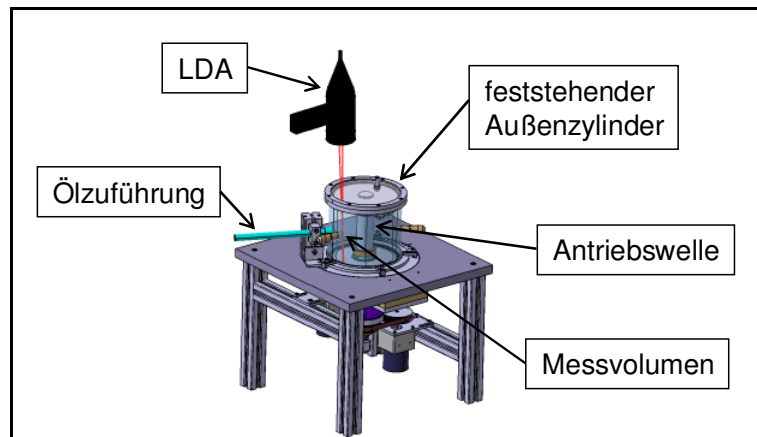


Abb. 2: Gleitlagerexperiment

Der in Abb. 2 dargestellte Gleitlagerprüfstand weist, abhängig vom eingesetzten Innenzylinder, eine normierte Spaltweite von $\psi = 2,5\%$ oder 10% auf. Das Bild zeigt den Prüfstand ohne Innenzylinder. Bei derartig moderaten normierten Spaltweiten lassen sich im Schmierpalt bequem Geschwindigkeitsmessungen mittels LDA durchführen.

Taylor-Wirbel in Abhängigkeit vom Streckungsverhältnis

Bei niedriger Drehzahl des Innenzylinders bildet sich im Schmierpalt eine sog. Couette-Strömung aus. Es handelt sich hierbei um eine laminare Strömung mit Geschwindigkeitskomponenten ausschließlich in Umfangsrichtung (vgl. Abb. 3, links). Wird eine kritische Drehzahl bzw. Reynoldszahl überschritten, kommt es zur Bildung von Taylor-Wirbeln. Die Bildung der Wirbel wird durch die Zentrifugalkraft hervorgerufen, welche das Fluid nach außen in Richtung Außenzylinderwand beschleunigt. Die Wirbel rotieren gegenläufig zueinander und erstrecken sich über den gesamten Umfang des Zylinderspaltes [siehe Taylor 1923].

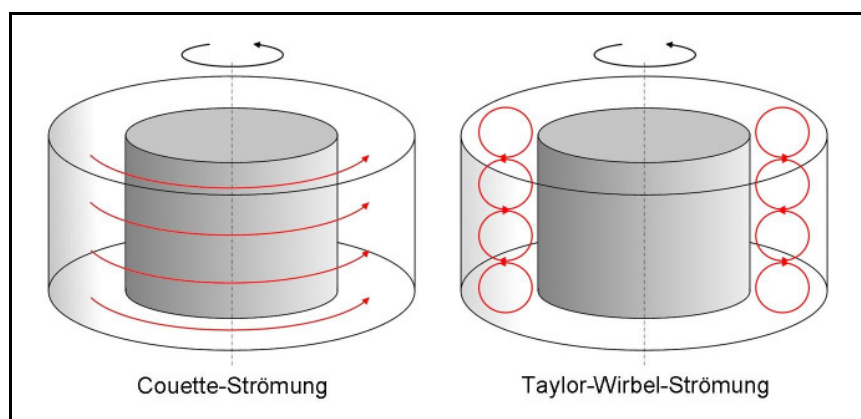


Abb. 3: Couette-Strömung und Taylor-Wirbel-Strömung im Schmierpalt

Wie in Abb. 3 rechte Seite veranschaulicht, treten Taylorwirbel immer paarweise auf und haben idealer Weise eine kreisrunde Ausdehnung. Es entsteht folglich immer eine gerade Anzahl an Wirbeln. Abhängig vom Streckungsverhältnis Γ variiert die Anzahl der Wirbelpaare [siehe Vaczi 2008].

Nach Oikawa et al. 1989, Koschmieder 1976 und Eagles et al. 1978 gibt es eine direkte Abhängigkeit der kritischen Reynoldszahl Re_{krit} von der normierten Spaltweite ψ und der relativen Exzentrizität ε des Systems. In Abb. 4 ist für eine normierte Spaltweite von $\psi = 10\%$ die kritische Reynoldszahl in Abhängigkeit von der relativen Exzentrizität dargestellt. Für die Geometrie, die den vorgestellten Untersuchungen zugrunde liegt, beträgt die kritische Reynoldszahl bei $Re_{krit} = 137$.

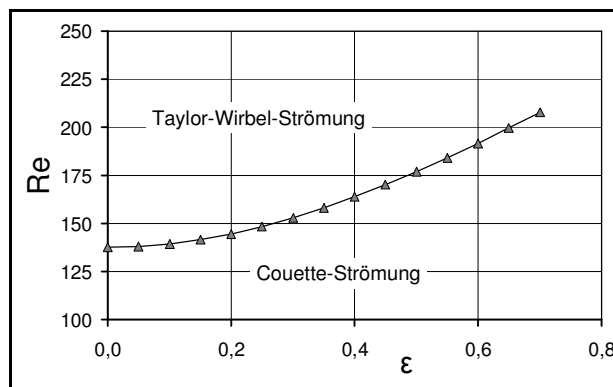


Abb. 4: Analytisch berechnete kritische Reynoldszahl in Abhängigkeit von der relativen Exzentrizität bei einer normierten Spaltweite $\psi = 10\%$ nach Eagles et al. 1978

Geschwindigkeitsmessungen in Umfangsrichtung an verschiedenen axialen Positionen (z -Richtung) geben Aufschluss über das Vorhandensein und die Anzahl von Wirbelpaaren. Beispielhaft zeigt Abb. 4 drei Geschwindigkeitsverläufe bei unterschiedlichen Reynoldszahlen. Bei $Re = 102$ treten keine Taylor-Wirbel auf. Der Geschwindigkeitsverlauf bei $Re = 128$ zeigt, dass am oberen und unteren Ende des Spaltes bereits Wirbel bestehen. Diese sog. Eckmann-Wirbel, welche sich in einem endlichen System an der oberen und unteren Begrenzung des Systems bilden, induzieren bei steigender Zylinderdrehzahl bzw. Reynoldszahl die Taylor-Wirbel. Bei einer Reynoldszahl von $Re = 147$ sind die Taylorwirbel vollständig ausgebildet.

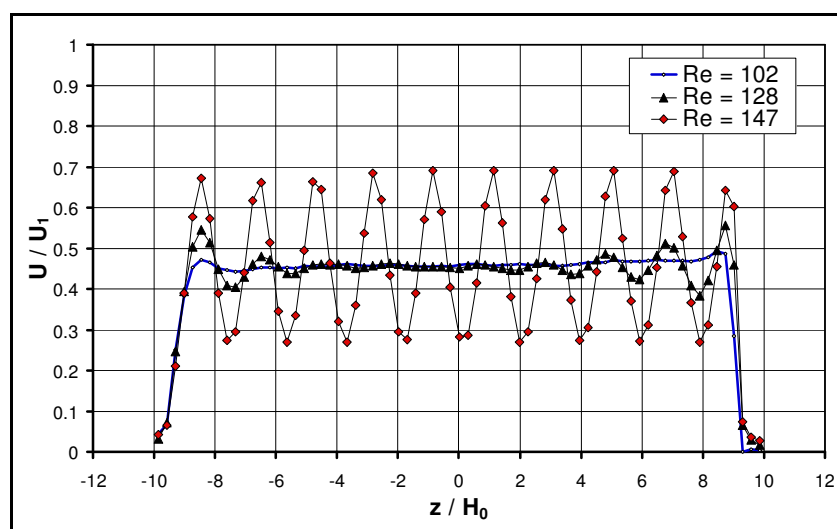


Abb. 5: Geschwindigkeitsprofile bei $\varepsilon = 90\%$, $\Gamma = 19,7$, bei einer normierten Spaltweite von $\psi = 10\%$

Die Abszisse zeigt die axiale Zylinderkoordinate z normiert auf die mittlere Spaltweite H_0 . Diese Darstellung lässt Rückschlüsse auf den Zusammenhang von absolutem Wirbeldurchmesser zur mittleren Spaltweite H_0 zu. Auf der Ordinate ist die lokale Geschwindigkeit U des strömenden Fluids in Spaltmitte, normiert auf die Innenzylinderumfangsgeschwindigkeit U_1 dargestellt.

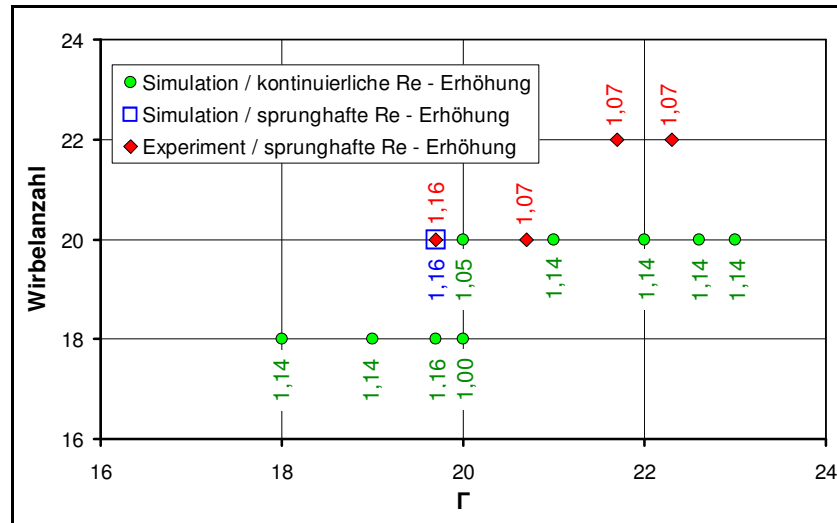


Abb. 6: Wirbelanzahl in Abhängigkeit vom Streckungsverhältnis, bei einer normierten Spaltweite von $\Psi = 10\%$

In Abb. 6 sind die Ergebnisse vorliegender numerischer und experimenteller Untersuchungen zusammengefasst. Das Diagramm gibt wieder, wie sich die Wirbelanzahl in Abhängigkeit vom Streckungsverhältnis ändert. Neben dem Streckungsverhältnis ist auch die Reynoldszahl ein Parameter, der Einfluss auf die Wirbelanzahl nimmt. Zu jedem Punkt im Diagramm erfolgt eine Angabe der Reynoldszahl bezogen auf die kritische Reynoldszahl nach Eagles et al. von $Re_{krit} = 137$. Eine interessante Stelle und zugleich ein Ausgangspunkt für weiterführende Untersuchungen liegt bei einem Streckungsverhältnis von $\Gamma = 19,7$. Hier zeigt das Experiment eine Wirbelanzahl von 20 und die numerische Simulation eine Wirbelanzahl von 18 sowie 20. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen der Simulation resultiert aus der kontinuierlichen bzw. sprunghaften Erhöhung der Reynoldszahl von $Re = 0$ bis zur Ziel-Reynoldszahl von $Re = 159$. Erfolgt die Annäherung an die Reynoldszahl $Re = 159$ kontinuierlich mittels einer Rampenfunktion über eine bestimmte Zeitdauer, so bilden sich im Spalt 18 Wirbel aus. Hingegen wird bei einer sprunghaften Einstellung der Reynoldszahl von $Re = 159$, das Ergebnis von 20 Wirbel im Spalt erreicht. Im Experiment erfolgt die Einstellung der Reynoldszahl konstruktionsbedingt prinzipiell sprunghaft.

Couette-Strömung mit überlagertem Seitenfluss

Numerisches Rechengitter

In Abb. 7 ist das blockstrukturierte Hexaedernetz für $\psi = 10\%$ dargestellt. Dieses Berechnungsgitter fördert mit den eindeutigen, vordefinierten Zellnachbarschaftsbeziehungen eine hohe Effizienz des numerischen Löser. Weiterhin kann durch den strukturierten Aufbau ein nahezu orthogonales Netz im Zylinderspalt realisiert werden, welches die Rechengenauigkeit und die Rechengeschwindigkeit positiv beeinflusst. Für die Ölbohrung wird ein allgemein übliches Vernetzungsmuster, das sogenannte O-Netz gewählt, welches sich durch eine optimale, wandadaptierte Netzstruktur auszeichnet.

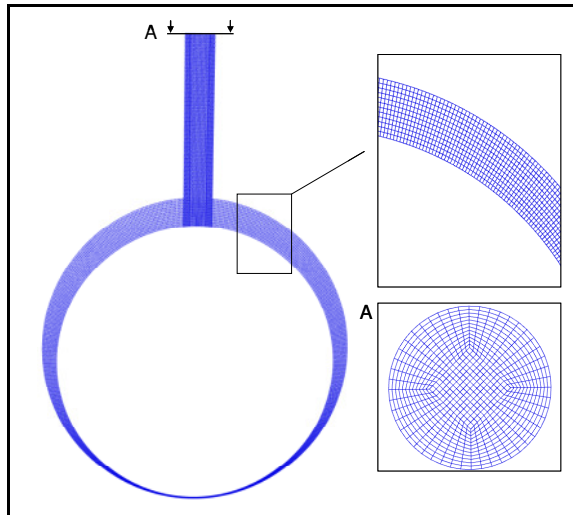


Abb. 7: Rechennetz für $\psi = 10\%$, $\varepsilon = 90\%$, $\varphi_B = 0^\circ$

Um die erforderliche Auflösung der Geschwindigkeitsprofile quer über den Spalt zu gewährleisten, ist eine Mindestzellenanzahl von acht Zellen zu realisieren [siehe Scurtu et al.]. Die Erstellung des Geschwindigkeitsprofils mittels LDA geschieht über 20 Stützstellen. Um einen Kompromiss zwischen Mindestzellenanzahl, Stützstellen im Experiment und vertretbarem Rechenaufwand zu finden, wurde im Rahmen dieser Untersuchungen eine Anzahl von 12 Zellen quer über den Spalt realisiert.

LDA Messungen

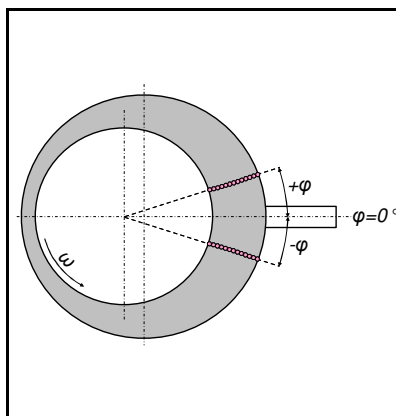


Abb. 8: Messpositionen

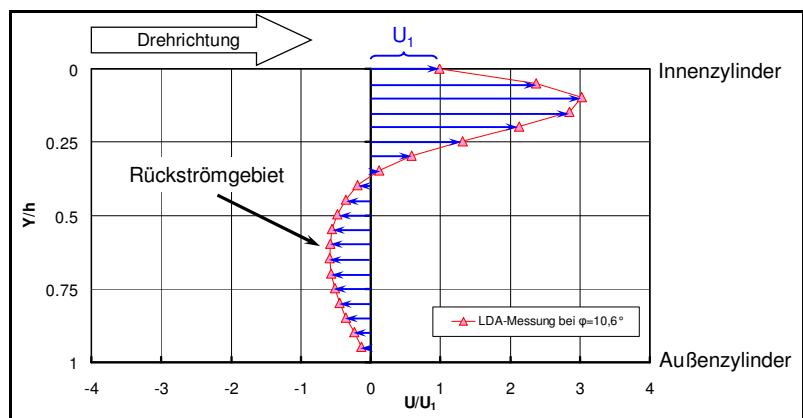


Abb. 9: Geschwindigkeitsprofil bei $\varphi = +10,6^\circ$

Am Gleitlagerprüfstand ist es möglich, an jeder Winkellage über den Umfang lokale Geschwindigkeitsmessungen mithilfe des LDA durchzuführen. Im Hinblick auf Kavitationsschäden sind besonders die Eigenschaften der Strömung in der Nähe der Ölzuführungsbohrung von Bedeutung. Bei ausgesuchten Winkellagen werden Geschwindigkeitsprofile stromauf und stromab der Bohrung gemessen (Abb. 8). Beispielhaft zeigt Abb. 9 das Geschwindigkeitsprofil bei $\varphi = +10,6^\circ$ in normierter Darstellungsform. In der Nähe des Innenzylinders kommt es zu großen Geschwindigkeitsgradienten.

Die durch die Ölzuführbohrung seitlich einströmende Ölmenge bewirkt eine Beschleunigung der inneren Strömung, sodass es zu Strömungsgeschwindigkeiten kommt, die offensichtlich größer als die Umfangsgeschwindigkeit des Innenzylinders U_1 sind. Es wird deutlich, dass in unmittelbarer Nähe der Zuführbohrung die durch die Drehung des Innenzylinders verursachte Schleppströmung (Couette-Strömung) lediglich einen geringen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeiten im dortigen Schmierpalt hat.

In Abb. 10 ist neben dem bereits in Abb. 9 dargestellten Geschwindigkeitsprofil bei $\varphi = +10,6^\circ$ auch das Geschwindigkeitsprofil bei $\varphi = -10,6^\circ$ zu sehen. Zudem sind im Diagramm die Ergebnisse der numerischen Simulation bei den entsprechenden Winkellagen aufgetragen.

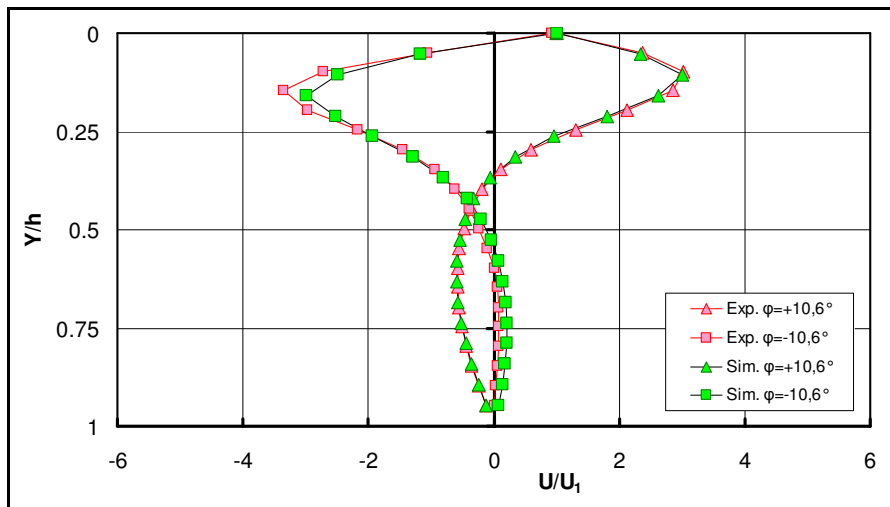


Abb. 10: Vergleich Simulation und Experiment bei $\varphi = \pm 10,6^\circ$, $Re = 20$, $\varepsilon = 0,9$, $\Psi = 10\%$

In Drehrichtung vor der Zuführungsbohrung ($\varphi = -10,6^\circ$) bildet sich in der Nähe des Innenzylinders über einen weiten Bereich des Spaltes ein Rückströmgebiet mit Strömungsgeschwindigkeiten aus, die ein Vielfaches der Umfangsgeschwindigkeit des Innenzylinders betragen. Durch den Vergleich der Ergebnisse der LDA-Messungen und der Simulation an verschiedenen Winkellagen und unter Variation verschiedener Parameter wie Bohrungslage und Quantität der seitlich einströmenden Ölmenge, konnte nachgewiesen werden, dass unter Verwendung des beschriebenen Rechengitters aussagekräftige Ergebnisse mithilfe der Simulation erzeugt werden können [siehe Nobis et al.].

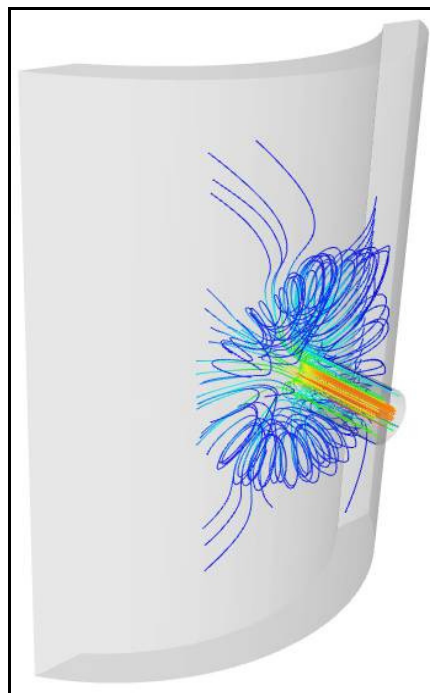


Abb. 11: Wirbel im Nahbereich der Ölzuführungsbohrung, $Re = 20$, $\varepsilon = 0,9$, $\Psi = 10\%$

Die numerische Simulation ermöglicht eine Darstellungsform der Ergebnisse, die das Strömungsgeschehen in der Nähe der Zuführungsbohrung auf einfache Weise visualisiert. In Abb. 11 ist mithilfe von Stromlinien das Einströmen des Öls aus der Ölzuführungsbohrung dargestellt. Das mit hoher Geschwindigkeit aus der Bohrung austretende Öl trifft auf die Oberfläche des Innenzylinders. Unter der Entstehung eines von der Wand abgelösten Staupunktes wird das einströmende Öl auf engem Raum umgelenkt und bildet somit komplett um die Zuführungsbohrung herum einen ringförmigen Wirbel.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit den bisher gewonnenen Erkenntnissen lässt sich keine allgemeingültige Aussage über die Abhängigkeit der Wirbelanzahl vom Streckungsverhältnis treffen, da die Wirbelanzahl nicht allein vom Streckungsverhältnis, sondern auch von der eingestellten Reynoldszahl abhängig ist. Zudem konnte mithilfe der numerischen Simulation aufgezeigt werden, dass der Prozess des Hochlaufes bis zum Erreichen der Ziel-Reynoldszahl einen weiteren entscheidenden Einflussfaktor für die Wirbelanzahl darstellt. Tendenziell erhöht sich mit größer werdendem Streckungsverhältnis und konstanter Reynoldszahl die Wirbelanzahl.

Weitere Untersuchungen werden sich damit beschäftigen, gewonnene Ergebnisse aus der Simulation mithilfe des Experiments zu validieren und im Gegenzug Phänomene, die im Experiment auftreten, numerisch korrekt nachzubilden. Besonderes Augenmerk wird dabei auf den Einfluss der Reynoldszahl auf die Wirbelanzahl gelegt.

Die Untersuchungen der Couette-Strömung mit einer seitlich zuströmenden Ölmenge lassen Rückschlüsse auf das Strömungsgeschehen im Schmierpalt eines Gleitlagers zu. Das Strömungsbild im Nahbereich um die Zuführungsbohrung wird im größten Maße von der seitlich einströmenden Ölmenge bestimmt. Es kommt zu keiner offensichtlichen Umlenkung des Seitenvolumenstromes durch den inneren Volumenstrom. Nahezu unberührt von der Couette-Strömung dringt das Öl aus der Zuführungsbohrung in Richtung des Innenzylinders weit in den Spalt hinein. In der Nähe der Oberfläche des Innenzylinders kommt es zur Umlenkung des eingeströmten Öls. Bei einer normierten Spaltweite von $\psi = 10\%$ bildet sich unter der Entstehung eines Staupunktes am Innenzylinder ein ringförmiger Wirbel um die Zuführungsbohrung.

Zukünftige Untersuchungen befassen sich weiterhin mit der Couette-Strömung mit aufgeprägtem Seitenfluss, jedoch bei kleineren normierten Spaltweiten. Somit lassen sich Tendenzen für die Eigenschaften der Strömung in Systemen mit normierten Spaltweiten unter $0,1\%$ besser ableiten.

Verwendete Formelzeichen

B	Lagerbreite
e	Exzentrizität
H_0	mittlere Spaltweite
h	lokale Spaltweite
R_1	Radius Innenzylinder
R_2	Radius Außenzylinder
Re	Reynoldszahl
Re_{krit}	kritische Reynoldszahl
U	Umfangsgeschwindigkeit
U_1	Umfangsgeschwindigkeit des Innenzylinders
Γ	Streckungsverhältnis
ψ	normierte Spaltweite
ε	relative Exzentrizität
ν	kinematische Viskosität
φ	Winkel
φ_B	Winkellage der Zuführungsbohrung
ω	Winkelgeschwindigkeit

Literatur

Taylor, G.I., 1923: „Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders“ Phil. Trans. Royal Soc. London.

Vaczi, T., 2008: „Konstruktive Überarbeitung eines Zylinderspaltapparates und Untersuchung der exzentrischen Zylinderspaltströmung bei verschiedenen Streckungsverhältnissen“ Diplomarbeit, Westsächsische Hochschule, Zwickau.

Oikawa, Masayuki, 1989: “Stability of Flow between Eccentric Rotating Cylinders” Journal of the Physical Society of Japan. Vol. 58.

Koschmieder, E. L. 1976: “Taylor vortices between eccentric cylinders” The Physics of Fluids. Vol. 19.

Eagles, P. M., Stuart J. T., DiPrima R. C., 1978: “The Effects of Eccentricity on Torque and Load in Taylor-Vortex Flow” Journal of Fluid Mechanics, Vol. 87, pp. 209-231.

N. Scurtu, P. Stücker, C. Egbers, 2008: “Numerical and experimental study of the flow in an eccentric Couette-Taylor system with small gap” PAMM, Vol. 8, Issue 1, pp 10641 – 10642.

Nobis, M., Schmidt M., 2009: „ Experimentelle und numerische Untersuchung der Schmierspaltströmung“ Masterarbeit, Westsächsische Hochschule, Zwickau.