

EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE UNTERSUCHUNG DER INSTATIONÄREN STRÖMUNG IM SCHMIERSPALT EINES GLEITLAGERMODELLPRÜFSTANDES

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL RESEARCH OF THE TRANSIENT FLOW INSIDE THE LUBRICATING GAP OF A JOURNAL BEARING MODEL

**Matthias Nobis¹, Peter Stücker¹, Marcus Schmidt¹, Marco Riedel¹
Christoph Egbers², Nicoleta Herzog², Paul Gorenz², Andreas Christl²**

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

² Brandenburgische Technische Universität
Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre
Siemens-Halske-Ring 16
D-03046 Cottbus

Hydrodynamisch geschmiertes Radialgleitlager, Gleitlagerströmung, LDA
Taylor, Couette, LDV

Zusammenfassung

Die laseroptischen Untersuchungen der Strömung im Schmierpalt eines Gleitlagermodellprüfstandes bilden eine entscheidende Teilaufgabe in einem übergeordneten Gesamtprojekt. Das langfristige Ziel besteht darin, mithilfe eines einfach zu bedienenden Berechnungswerkzeuges, die Ursachen und die Auswirkungen von Kavitationsvorgängen in hydrodynamisch geschmierten Gleitlagern beurteilen zu können. Somit lassen sich Aussagen hinsichtlich vorteilhafter und nachteiliger Geometrieformen der Lagerschalen formulieren. In der Konsequenz kann ein solches Berechnungswerkzeug wichtige Erkenntnisse für die Konstruktion und Auslegung von zukünftigen Gleitlagern liefern.

Aktuelle Auslegungsprogramme basieren auf einer zweidimensionalen Betrachtungsweise des Schmierpaltess. Die eigentliche Schmierpaltedicke (Spaltausdehnung in radialer Richtung) wird vernachlässigt. Anstelle der genauen Abbildung der Strömung, werden Turbulenzmodelle zum Einsatz gebracht. Vergangene Untersuchungen auf numerischem sowie experimentellem Gebiet haben gezeigt, dass im Schmierpalt klar geordnete und vorwiegend laminare Strömungsstrukturen zu finden sind. Für eine genaue Analyse der Ursachen und Auswirkungen von Kavitationsblasen ist demnach eine dreidimensionale Auflösung des Schmierpaltess unumgänglich.

Neben der qualitativen Bewertung der Schmierpaltströmung auf der Basis von Visualisierungsversuchen lassen sich mit der Hilfe eines getriggerten Laser-Doppler-Anemometers (LDA) winkelbezogene Geschwindigkeitsmessungen im Spalt durchführen und es wird möglich die Eigenschaften dieser Strömung näher zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Mes-

sungen dienen zum Validieren von 3D Strömungssimulationen sowie zum Optimieren der Netzstruktur und der Randbedingungen. Im Rahmen des Beitrages wird der Gleitlagermodellprüfstand, beispielhafte Ergebnisse der Visualisierungs- und laseroptischen Versuche sowie ein Vergleich der experimentellen und numerischen Resultate vorgestellt.

Einleitung

Im engen Spalt zwischen der rotierenden Welle und der fest stehenden Lagerschale eines hydrodynamisch geschmierten Gleitlagers bilden sich komplexe, dreidimensionale Strömungsstrukturen aus. Die Eigenschaften dieser Strömung sind abhängig von der Drehzahl, den geometrischen Besonderheiten und den ein- und austretenden Massenströmen. Dabei sind die Ölzuführbohrung für den eintretenden Massenstrom und die axialen Lagerenden sowie eine Abführbohrung in der Welle für die austretenden Teilmassenströme als Systemgrenzen zu verstehen. Wollfarth untersuchte 1995 experimentell die Kavitationserosion im Gleitlager. Dabei wurden unter anderem die Parameter zugeführter Massenstrom, Reynoldszahl und Lagerlast variiert. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Paarungen von Welle und Lagerschale kombiniert. Bei einigen Konstellationen konnte keine, bei anderen nur sporadisch und in nur in wenigen Fällen reproduzierbare Kavitation erzeugt werden. Die Basis für die hier vorgestellten Untersuchungen bildet ein Gleitlager, in dem wiederholt Kavitation provoziert werden konnte (vgl. Abb. 1 rechts). Der ursprüngliche Einsatzort dieses Lagers ist eine mittlere Lagerstelle der Pleuellagerung im Dieselmotor eines Lastkraftwagens.

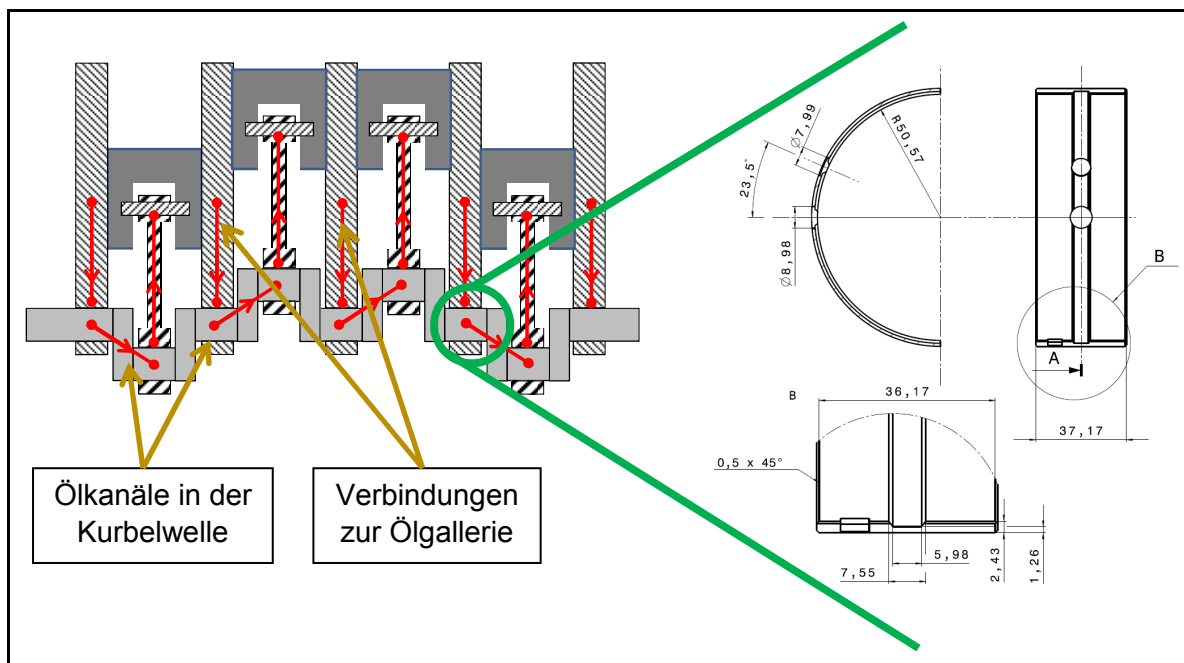


Abb. 1: Einbausituation eines Pleuellagers im Vierzylinder-Reihenmotor

In diesem speziellen Fall der Pleuellager von Mehrzylindermotoren befindet sich in aller Regel in der Lagerschale eine über 180° umlaufende Nut, in welche die Ölzuführbohrung mündet. Die Nut verteilt das Frischöl und versorgt in Verbindung mit einer Ölbohrung in der Pleuellager weitere Lagerstellen wie die Pleuzapfenlager und ggf. die oberen Pleuellager mit Schmieröl (vgl. Abb. 1). Neben den beiden axialen Lagerenden stellt die Bohrung in der rotierenden Pleuellager eine dritte Systemgrenze für den austretenden Massenstrom dar. Bedingt durch die sich ständig ändernde Lage der Pleuellagerbohrung gegenüber der Ölzuführbohrung, stellt sich eine instationäre bzw. eine über 360° periodische Strömung ein.

Schematisches Modell

In Abb. 2 ist schematisch ein Längs- und ein Querschnitt durch das Lagermodell dargestellt. Neben den wichtigsten geometrischen Kenngrößen des Systems, sind die grundlegend möglichen Volumenströme Q_{in} , Q_0 und Q_{out} veranschaulicht. In den Gleichungen 1 bis 8 werden charakteristische Parameter definiert.

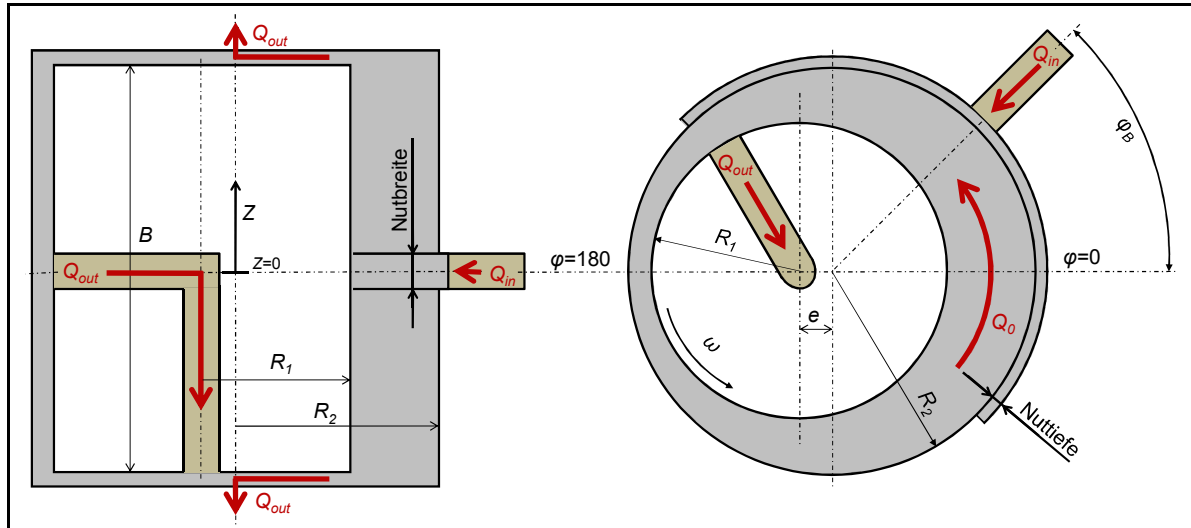


Abb. 2: Geometrische Kenngrößen

$$\begin{aligned}
 H_0 &= R_2 - R_1 & (1) & & U_1 &= \omega \cdot R_1 & (4) & & Q_0 &= 0,5 \cdot B \cdot H_0 \cdot U_1 & (7) \\
 \psi &= \frac{H_0}{R_1} & (2) & & Re &= \frac{H_0 \cdot R_1 \cdot \omega}{\nu} & (5) & & \alpha &= \frac{Q_{in}}{Q_0} & (8) \\
 \Gamma &= \frac{B}{H_0} & (3) & & \varepsilon &= \frac{e}{H_0} & (6) & & & &
 \end{aligned}$$

Experimenteller Aufbau

Die Konstruktion und Fertigung des Gleitlagermodellprüfstandes basiert auf den Geometriedaten der in Abb. 1 gezeigten Lagerschale. Vereinfachend wurde die Nut in Rechteckform ohne Fasen ausgeführt. Weiterhin wurde die Einkerbung für die Sicherung gegen Verdrehen in der Lagerschale vernachlässigt. Sämtliche anderen geometrischen Kenngrößen wurden im Maßstab 1:3 auf den Gleitlagermodellprüfstand übertragen.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Prüfstand und realem Gleitlager ist die relative Spaltweite. Am Prüfstand ist eine relative Spaltweite von $\psi \approx 2,5\%$ realisiert. Reale Gleitlager weisen hingegen eine relative Spaltweite von ca. $\psi \approx 0,1\%$ auf. Eine Vergrößerung der Spaltweite ist zwingend erforderlich, um eine ausreichende optische Zugänglichkeit für das LDA zu schaffen. Um dennoch die Ähnlichkeit der Strömung sicherzustellen, wird die Reynoldszahl wie im realen Gleitlager eingestellt. Im fest stehenden Außenzylinder aus Acrylglas befinden sich demnach die Ölzuführbohrung und die Ölversorgungsnut. Der Außenzylinder kann bei Bedarf gegenüber dem Innenzylinder in exzentrischer Stellung positioniert werden (vgl. Abb. 3). Zum Einstellen der Exzentrizität dienen die radial angebrachten Messschrauben. Der Außenzylinder wird auf einem Drehtisch mittels Spannpratzen fixiert. Durch die Befestigung auf einem Drehtisch ist es möglich, Geschwindigkeitsmessung an unterschiedli-

chen Winkelpositionen durchzuführen, ohne das LDA auf einer Kreisbahn traversieren zu müssen. LDA ist an einem X-Y-Traversiersystem befestigt und kann mit hoher Genauigkeit per Koordinatenvorgabe über dem Spalt positioniert werden (vgl. Abb. 4). Im rotierenden Innenzylinder befindet sich eine Ölbohrung. Neben den axialen Auslässen bildet diese den dritten Auslass für den zugeführten Volumenstrom.

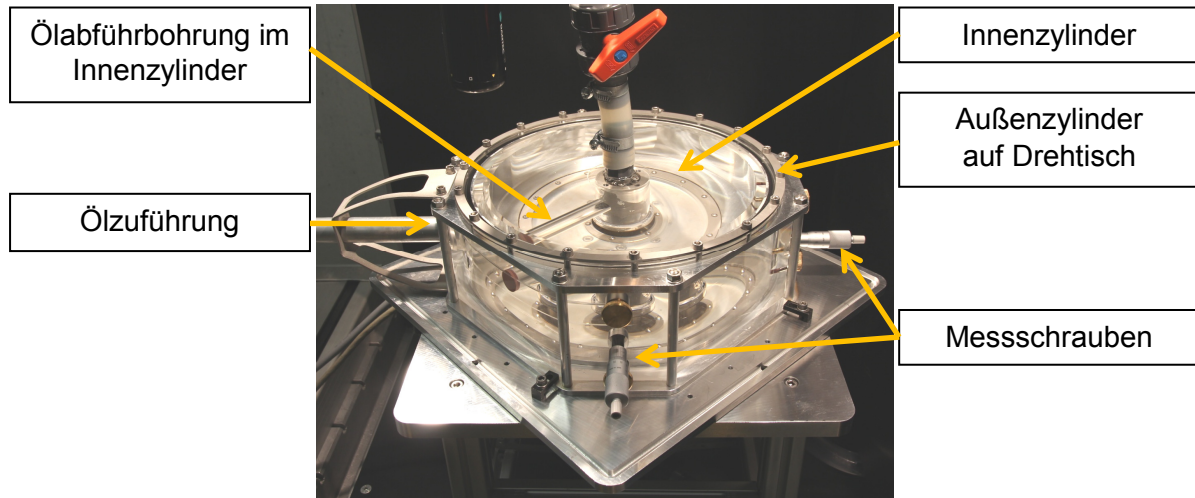


Abb. 3: Gleitlagermodellprüfstand in schräger Draufsicht

Für die Einstellung genau definierter zufließender und abfließender Volumenströme gibt es neben dem eigentlichen Lagermodell einen entsprechenden hydraulischen Kreislauf (vgl. Abb. 4). Im Kreislauf befinden sich unter anderem ein Vorratsbehälter, eine regelbare Ölpumpe, Regelventile und drei Ultraschall-Volumenstrommesser. Dabei misst der erste Durchflussmesser den zugeführten Volumenstrom. Der zweite Durchflussmesser dient zur Kontrolle des symmetrischen Abströmens über die axialen Lagerenden. Die Ölmenge, die über die Innenzylinderbohrung (Wellenbohrung) aus dem System abfließt, wird vom dritten Volumenstrommesser angezeigt. Sämtliche Regelventile dienen dazu, die Aufteilung der zugeführten Ölmenge auf die einzelnen Auslässe entsprechend den Vorgaben einzustellen.

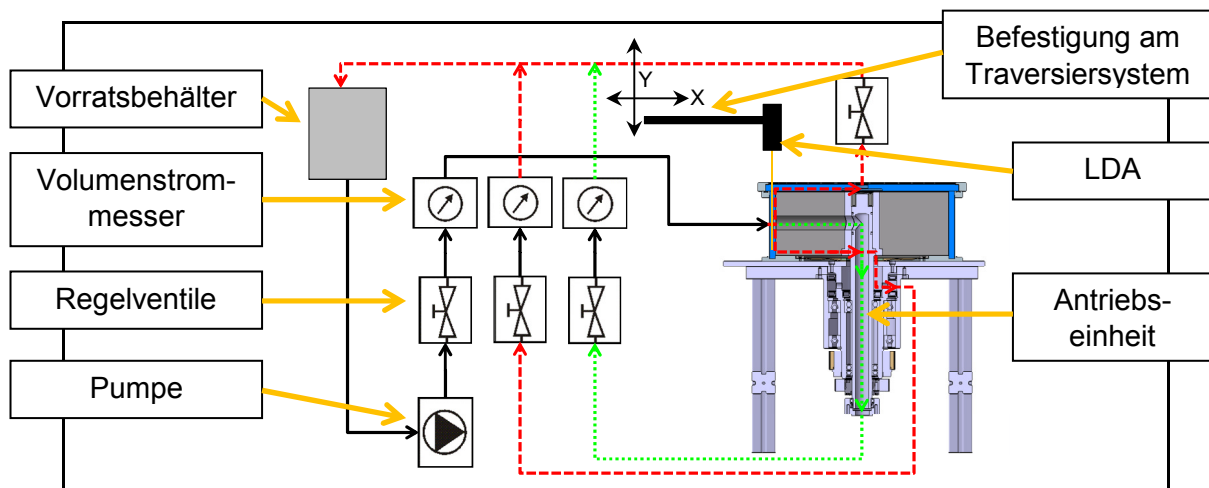


Abb. 4: Hydraulischer Kreislauf am Prüfstand

Die zentral angeordnete Hauptwelle mit montiertem Innenzylinder wird mit einem Schrittmotor angetrieben. Durch die Auslegung des Antriebes mit Schrittmotor und Zahnriemen wird Schlupf verhindert, und es ist keine dauerhafte Echtzeitüberwachung der Drehzahl notwendig.

Ergebnisse experimenteller und numerischer Untersuchungen

Die dreidimensionalen CFD Simulationen werden mit dem Programmpaket openFOAM durchgeführt. Dabei kommt die finite Volumenmethode zum Einsatz. Der Berechnungsalgorithmus löst die Navier-Stokes-Gleichungen und die Kontinuitätsgleichung unter der Vorgabe laminarer Strömungsverhältnisse. Um für weiterführende Untersuchungen eine zuverlässig funktionierende Netzstruktur und entsprechend passend definierte Randbedingungen bereitzustellen, wird zunächst ein vereinfachter Fall der Gleitlagerströmung betrachtet. Für die grundlegende Abstimmung zwischen dem Experiment und der numerischen Berechnung ist es notwendig, das rotierende System ohne zufließenden und abströmenden Volumenstrom zu untersuchen. Wie von Nobis et. al 2011 dargestellt, muss hinsichtlich der Gestaltung der Randbedingungen am axialen Lagerende zwischen zwei Fällen unterschieden werden.

Zum einen kann das System als unendlich breites Lager angesehen werden, wenn der Druckausgleich mittels Schleifringdichtung im Experiment über die Lagerenden verhindert wird. Die entsprechend dazugehörige numerische Randbedingung ist die Nullgradienten-Druckrandbedingung. Zum anderen bedeutet das Zulassen des Druckausgleichs über die offenen Lagerenden eine beachtenswerte Verkleinerung des Druckmaximums und –minimums im Schmierpalt. Das Resultat ist eine deutlich geringere Krümmung der gemessenen Geschwindigkeitsprofile. Diese Eigenschaft kann in der numerischen Berechnung mit Hilfe der Vorgabe des Umgebungsdruckes an den axialen Lagerenden nachgebildet werden.

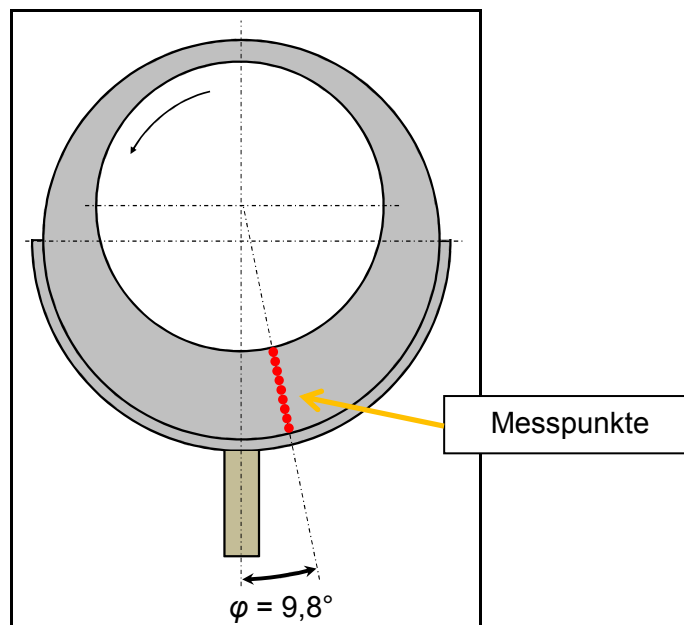


Abb. 5: Messpunkte im Schmierpalt an der Winkellage φ

Am aktuellen Gleitlagermodellprüfstand wurden für die Überprüfung dieser Zusammenhänge entsprechende Messungen und begleitende Simulationen durchgeführt. Die schematische Skizze in Abb. 5 verdeutlicht, wo die einzelnen Messpunkte für die Ermittlung eines Geschwindigkeitsprofils in radialer Richtung lokalisiert sind. Axial liegen die Messpunkte genau in der Lagermitte. Die Ölzuführbohrung befindet sich bei allen vorgestellten Ergebnissen im weitesten Spalt. Somit ist die Winkellage der Bohrung $\varphi_B = 0^\circ$. Ausgehend von der Ölzuführbohrung beträgt die Winkellage der Messpunkte $\varphi = 9,8^\circ$. In Abb. 6 sind die normierten Geschwindigkeitsprofile unter den gegebenen Einstellungsparametern dargestellt. Bedingt durch die Haftbedingung beträgt die Geschwindigkeit direkt an der Oberfläche des Innenzylinders U_I und an der Oberfläche des Außenzylinders null. Durch die große relative Exzentri-

zität von $\varepsilon = 90\%$ entsteht über einen weiten Bereich des Spaltes ein Rückströmgebiet. Der Einbau einer Schleifringdichtung im Experiment und die Vorgabe einer Nullgradienten-Druckrandbedingung in der numerischen Simulation ergeben eine gute Übereinstimmung zwischen in den Ergebnissen. Die korrekte Messung von Strömungs-geschwindigkeiten direkt in der Nut stellt hohe Anforderungen an die Oberflächengüte der Nutränder bzw. des Außenzylinders. Derzeit wird auf die Messwerterfassung in der Nut verzichtet und lediglich die Geschwindigkeiten im Spalt miteinander verglichen. Die laseroptische Geschwindigkeitsmessung direkt in der Nut ist ein Ziel in weiterführenden Arbeiten (vgl. Abschnitt Zusammenfassung und Ausblick).

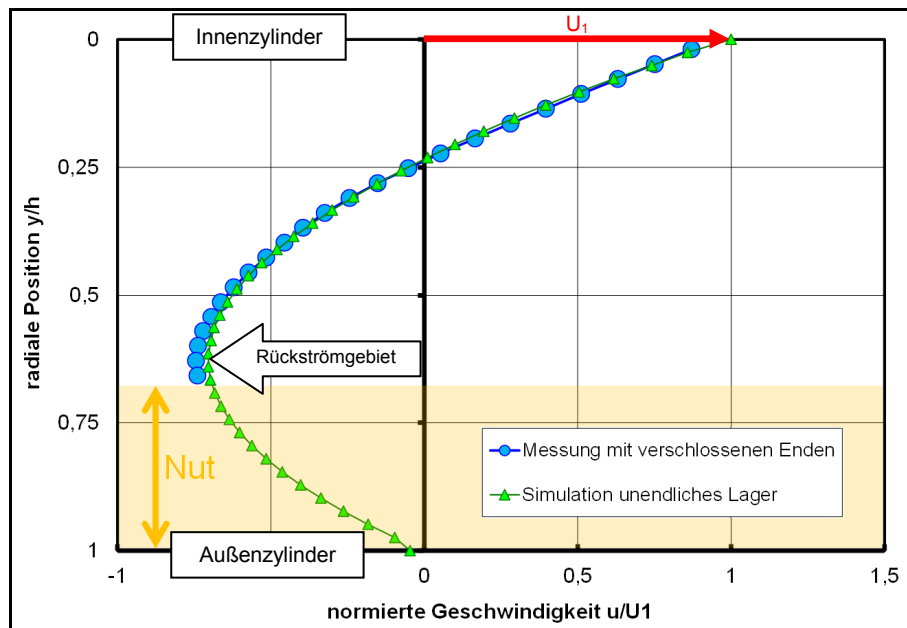


Abb. 6: Vergleich LDA Messung - Simulation bei $\psi = 2.5\%$, $Re = 65$, $\varepsilon = 90\%$, $\varphi_B = 0^\circ$, $\varphi = 8.9^\circ$, $\alpha = 0\%$

In Abb. 7 sind die Geschwindigkeitsprofile einer LDA-Messung und mehrerer Simulationen dargestellt. Im Unterschied zu den Einstellungsparametern von Abb. 6 wird hier dem System ein Volumenstrom Q_{in} im Verhältnis von $\alpha = 200\%$ zugeführt. Die Abströmung der eingebrachten Ölmenge erfolgt zu gleichen Teilen über das obere und untere axiale Lagerende. Die Öl-abführbohrung im Innenzylinder ist verschlossen. Im Schmier-spalt stellt sich folglich eine stationäre Strömung ein. Infolge des zusätzlich aufgebracht-ten Volumenstromes können diese Versuche nur ohne eine Schleifringdichtung für die Abdichtung der axialen Lagerenden durchgeführt werden. Damit ändern sich auch die Umgebungsbedingungen im Schmier-spalt und es gilt für die numerische Simulation eine Randbedingung zu setzen, die sämtliche damit einhergehenden Effekte korrekt abbilden kann.

Für eine Gleitlagerstelle im Kurbelgehäuse eines Viertaktmotors kann an den axialen Lagerenden vereinfachend der Umgebungsdruck angenommen werden. Angewendet auf den Gleitlagermodellprüfstand - mit deutlich größerer Spaltweite - bedeutet dies ein druckloses Abströmen über die Lagerenden. In der Simulation muss folglich eine Druckrandbedingung mit der Vorgabe des Umgebungsdruckes definiert werden.

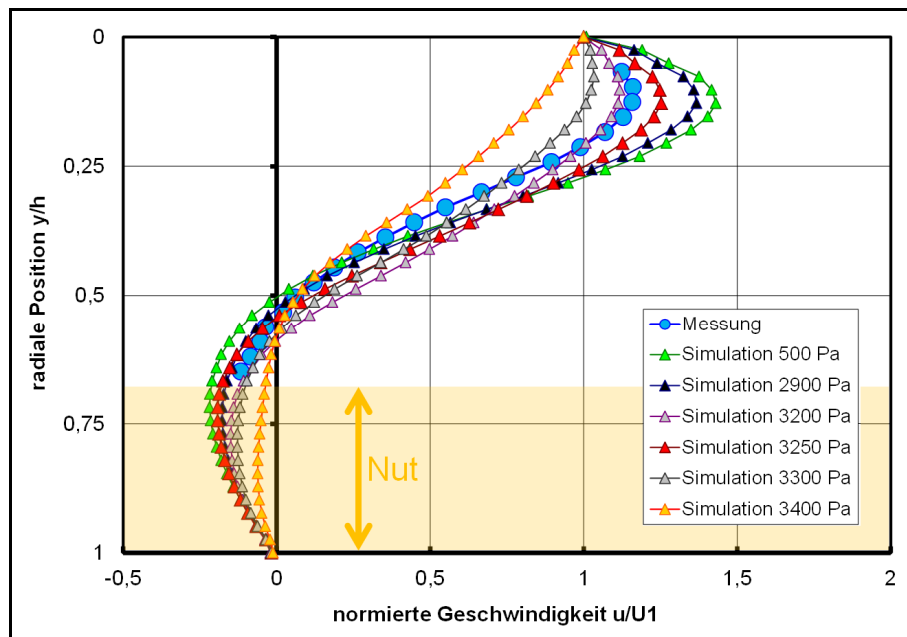


Abb. 7: Vergleich LDA Messung - Simulation bei $\psi = 2.5 \%$, $Re = 65$, $\varepsilon = 90\%$, $\varphi_B = 0^\circ$, $\varphi = 8.9^\circ$, $\alpha = 200\%$ mit Abströmung über die axialen Lagerenden unter Variation der Druckrandbedingung an den axialen Lagerenden

Bedingt durch den angeschlossenen hydraulischen Kreislauf, ist ein druckloses Abströmen über die Lagerenden am Gleitlagermodellprüfstand nicht realisierbar. Der Höhenunterschied zwischen Vorratsbehälter und Prüfstand bedingt einen statischen Druck an den Auslassrändern. Darüber hinaus stellt sich im Kreislauf bei eingeschalteter Pumpe ein Druckverlust ein, aus welchem eine zusätzliche Druckvergrößerung an den axialen Lagerenden resultiert. Dieser Tatsache ist allerdings die Druckabsenkung durch Vergrößerung der Strömungsgeschwindigkeiten entgegenzusetzen. Zusammenfassend muss demzufolge in der numerischen Simulation an den Systemrändern nicht der Umgebungsdruck, sondern ein entsprechend größerer Druck definiert werden. Eine analytische Vorausberechnung liefert erste Anhaltswerte für den anzugebenden Druck. Die Variation des Relativdruckes im Bereich von 2900 bis 3400 Pa, zeigt, wie entscheidend die Vorgabe des korrekten Druckes ist und wie stark die Beeinflussung der Geschwindigkeitsverteilung und somit der gesamten Strömungsstruktur ist (vgl. Abb. 7). Bei der Vorgabe eines Relativdruckes von 3200 Pa wird eine gute Annäherung zwischen den Ergebnissen des Experimentes und der Simulation erreicht.

In Abb. 8 werden vier gemessene Geschwindigkeitsprofile dargestellt. Dabei beträgt die Winkelposition φ der Messstelle wiederholt 8.9° und liegt im Abstand von einem Bohrungsdurchmesser stromab der Ölzuführbohrung. Die eingebrachte Ölmenge strömt ausschließlich über die Ölabführbohrung im rotierenden Innenzylinder ab. Die axialen Lagerenden sind hydraulisch verschlossen und die Schleifringdichtungen zur Unterbindung eines Druckausgleiches sind montiert. Bedingt durch die exzentrische Stellung des Außenzylinders und der Ölversorgungsnut ergibt sich mit umlaufender Ölabführbohrung ein sich ständig ändernder Strömungsquerschnitt als Auslass. Die Folge ist ein leicht schwankender Volumenstrom. Das Volumenstromverhältnis α ist im Mittel auf 100% festgelegt.

Wie bereits im Abschnitt Einleitung erläutert, stellt sich unter diesen Bedingungen eine instationäre bzw. eine über 360° periodische Strömung ein. Folglich muss jedem aufgenommenen Geschwindigkeitswert ein entsprechender Zeitstempel bzw. eine entsprechende Winkelposition zugeordnet werden. Der Prüfaufbau wird zu diesem Zweck um eine Lichtschranke erweitert, welche mit jeder Umdrehung dem Signalprozessor des LDA einen Reset-

Impuls liefert. Definitionsgemäß bedeutet ein Winkel von null Grad die direkte Fluchtung von Ölzuführbohrung im Außenzylinder und der Ölabführbohrung im Innenzylinder (vgl. Abb. 8 links unten). Die Mittelung der Geschwindigkeiten erfolgt über einen Winkel von einem Grad. Folglich werden an einer einzelnen Messposition im Spalt 360 Geschwindigkeitswerte erzeugt.

Beispielhaft zeigt Abb. 8 die Geschwindigkeitsprofile für die vier Innenzylinderstellungen von 0°, 30°, 60° und 90°. Es wird verständlich, dass die umlaufende Ölabführbohrung einen entscheidenden Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung im Spalt hat. Gerade wenn diese die Messstelle passiert (vgl. Ölabführbohrung auf 0° - Ölabführbohrung auf 30°), gibt es starke Unterschiede in den Geschwindigkeitsprofilen. Befindet sich die Ölabführbohrung nicht in unmittelbarer Nähe zur Messstelle (vgl. Ölabführbohrung auf 60° - Ölabführbohrung auf 90°) sind die Unterschiede zwischen den Geschwindigkeitsprofilen deutlich geringer. Offensichtlich stellen sich über einen weiten Winkelbereich im Spalt wenig schwankende Strömungsbedingungen ein. In direkter Nähe zur Ölabführbohrung ändert sich allerdings das Strömungsfeld maßgeblich. Die Durchführung von Visualisierungsversuchen zeigt, dass es unter Umständen in der Nähe der Innenzylinderbohrung zur direkten Strömungsumkehr kommen kann. Aus einem Rückströmgebiet kann sich eine Strömung mit positivem Drehsinn entwickeln und umgekehrt. Gleichermäßen kommt es in diesem Zusammenhang zu großen Geschwindigkeitsgradienten.

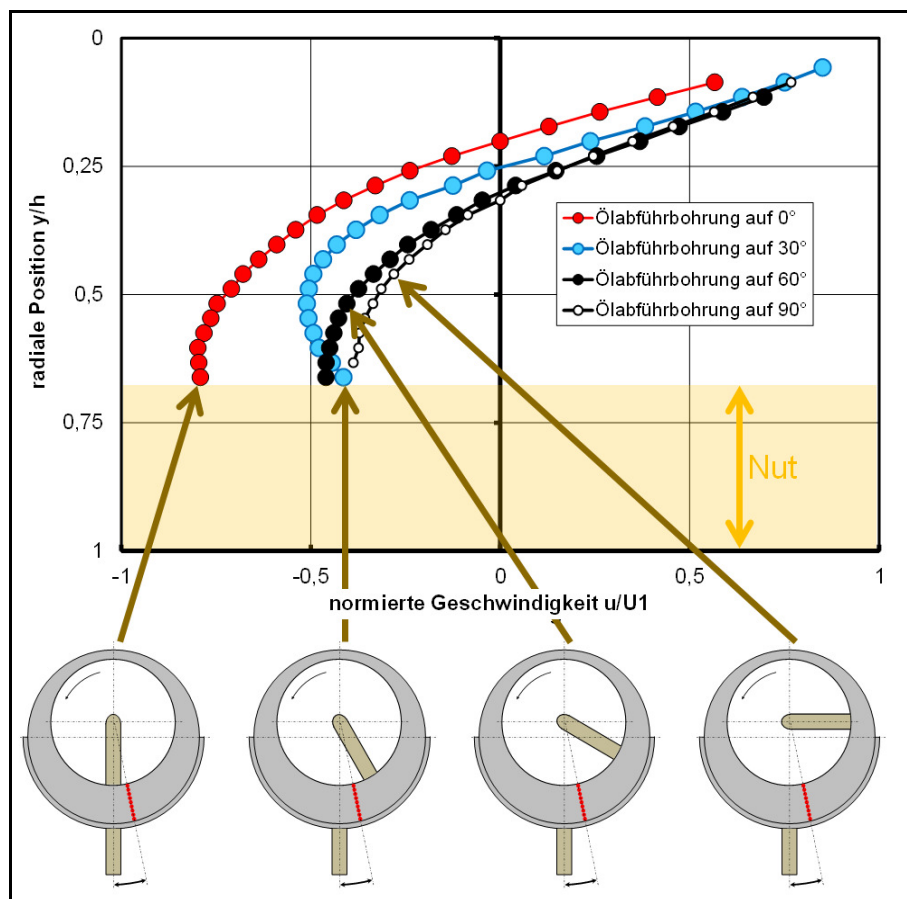


Abb. 8: LDA Messung bei $\psi = 2.5\%$, $Re = 65$, $\varepsilon = 90\%$, $\varphi_B = 0^\circ$, $\varphi = 8.9^\circ$, $\alpha = 100\%$ mit Abströmung über die Ölabführbohrung im rotierenden Innenzylinder

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Gleitlagermodellprüfstand ein wichtiges Werkzeug für die Validierung der numerischen Simulation ist. Die Definition von korrekten Randbedingungen und die Weiterentwicklung des Rechengitters erfordern einen ständigen Abgleich zum Referenzexperiment. Geschwindigkeitsmessungen mit Hilfe eines LDA sind dabei eine sehr gute Möglichkeit, eine experimentelle Datenbasis zu schaffen.

In Ergänzung zu den im Beitrag gezeigten Ergebnissen ist eine Parametervariation vorgesehen, bei der die Exzentrizität, die Reynoldszahl und die einzustellenden Volumenströme variabel sind. Die daraus resultierenden Messergebnisse sollen die Zusammenhänge dieser Größen veranschaulichen und wiederholt als Referenz für die 3D Strömungssimulation herangezogen werden. Zudem werden in weiterführenden Untersuchungen Geschwindigkeitsmessungen direkt in der Ölversorgungsnut durchgeführt. Dazu muss die Oberflächengüte der Nutränder verbessert werden, um eine gleichbleibend gute Streulichtintensität sicherzustellen. Darüber hinaus soll in Bereichen mit großen Geschwindigkeitsgradienten die Schwankungsgröße der Geschwindigkeit bestimmt werden, um Aussagen hinsichtlich des Turbulenzgrades treffen zu können. Für das Erreichen des mittelfristigen Ziels, die 3D Strömungssimulation mit integriertem Kavitationsmodul auf Gleitlagergeometrien mit realen Spaltweitenverhältnissen anzuwenden, sind Vergleichsmessungen am Gleitlagermodellprüfstand bei kleineren Spaltweiten notwendig. Mit den bis dato gewonnenen Erkenntnissen gilt eine relative Spaltweite von $\psi \approx 1,0\%$ als technisch umsetzbar. Eine Verkleinerung der Spaltweite wird durch eine Vergrößerung des Innenzylinderdurchmessers realisiert.

Für den betrachteten Fall der Abströmung des Fluids über die Innenzylinderbohrung muss in der numerischen Berechnung eine Nullgradienten-Druckrandbedingung an den Lagerenden definiert werden. Mit der Ölabführbohrung im Innenzylinder als einzigen Auslass ergibt sich eine neue Problemstellung. Das zu erstellende Rechengitter muss einen bewegten Teil (rotierend am Innenzylinder) und einen feststehenden Teil (am Außenzylinder) besitzen. Zwischen dem so genannten Rotornetz und Statornetz wird eine Übergabestelle für alle Zustandsgrößen definiert. Diese numerischen Untersuchungen und der damit verbundene Vergleich zum Experiment werden in den kommenden Arbeiten durchgeführt.

Verwendete Formelzeichen

B	Lagerbreite
e	Exzentrizität
H_0	mittlere Spaltweite
h	lokale Spaltweite
Q_0	innerer Volumenstrom
Q_{in}	zugeführter Volumenstrom
Q_{out}	abfließender Volumenstrom
R_1	Radius Innenzylinder
R_2	Radius Außenzylinder
Re	Reynoldszahl
u	Umfangsgeschwindigkeit
U_1	Umfangsgeschwindigkeit des Innenzylinders
α	Verhältnis von zugeführtem Volumenstrom zu innerem Volumenstrom
ψ	normierte Spaltweite
ε	relative Exzentrizität
ν	kinematische Viskosität
φ	Winkel
φ_B	Winkellage der Zuführbohrung
ω	Winkelgeschwindigkeit

Literatur

Wollfarth, M., 1995: „Experimentelle Untersuchungen der Kavitationserosion im Gleitlager“ Dissertation, Universität Karlsruhe

Nobis, M., Stücke, P., Schmidt, M., Egbers, C. Scurtu, N., 2011 „Untersuchung der Zylinderspaltströmung unter Berücksichtigung der Geometrieformen realer Gleitlager“, 19. GALA Fachtagung, Illmenau

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

R. C. DiPrima und H. I. Swinney 1985, „Instabilities and Transition in Flow Between Two Rotating Cylinders, in Hydrodynamic Instabilities and Transition to Turbulence“ (Hrsg.: H. I. Swinney und J. P. Gollup), Vol. 45, Springer, New York.

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.

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

N. Scurtu, P. Stücke, 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 Schmierpaltströmung“ Masterarbeit, Westsächsische Hochschule, Zwickau