

Gezielte Erzeugung von Kavitationsblasen in einem Gleitlagermodell

Generation of cavitation bubbles in a journal bearing model

Matthias Nobis¹, Peter Reinke², Marcus Schmidt², Christoph Egbers³

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

² HAWK Hochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen
Fakultät Naturwissenschaften und Technik
Lehrgebiet Fluidtechnik
Von-Ossietzky-Straße 99
37085 Göttingen

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

Hydrodynamisch geschmiertes Radialgleitlager, Gleitlagerströmung, Kavitation
Taylor, Couette, Journal Bearing, Cavitation

Zusammenfassung

Radialgleitlager zählen im Verbrennungsmotorenbau zu den zuverlässigen Maschinenelementen für die Lagerung des Kurbel- und Nockentriebs. Allerdings stellt sich bei modernen Kraftfahrzeugmotoren die Frage nach betriebssicheren und langlebigen Lagerungen aller rotierenden Teile stets neu, da der Trend zu immer kleiner werdenden Abmessungen bei steigenden spezifischen Leistungen größer werdende Lagerlasten bedingt. Eine wiederkehrende Aufgabenstellung ist dabei die Erforschung der Ursachen und Auswirkungen von Kavitation in Gleitlagern. Bisherige experimentelle Kavitationsuntersuchungen an Kurbelwellenhauptlagern wurden durch das Abfahren eines gezielten Prüfzyklus ausgeführt. Dabei werden die Einstellungsparameter so gewählt, dass die Entstehung von Kavitation begünstigt wird. Der anschließende Ausbau der Lagerschalen lässt eine Begutachtung des entstandenen Schadensbildes zu. Dabei wird jedoch nur die Auswirkung der Kavitation sichtbar und nachvollziehbar. Über den eigentlichen Entstehungsort und über den Blasentransport kann nur spekuliert werden.

Die visuelle Beobachtung des Kavitationsvorganges in einem im Einsatz befindlichen Kurbelwellenhauptlager ist aufgrund der fehlenden optischen Zugänglichkeit nicht durchführbar. Mittels aktueller Berechnungsprogramme lässt sich der Entstehungsort von Kavitationsblasen im Gleitlager präzise vorhersagen und visuell darstellen. In diesem Zusammenhang sind

experimentelle Untersuchungen sehr wichtig, die das Ergebnis der numerischen Berechnungen bestätigen und unterstreichen. Der im Rahmen dieses Beitrags gezeigte Versuchsaufbau an einem Gleitlagermodell-Experiment dient zur gezielten Erzeugung von Blasen in lokalen Unterdruckgebieten innerhalb der realen instationären Gleitlagerströmung. Dazu wird mittels eines Membrankontakts Wasser mit Kohlenstoffdioxid angereichert. In Unterdruckgebieten innerhalb des Lagermodells wird das Kohlenstoffdioxid wieder aus dem Wasser herausgelöst und es bilden sich folglich Blasen. Der Blasenentstehungsprozess wird mittels Hochgeschwindigkeitskamera und speziell angepasster Beleuchtung dokumentiert. Diese Veröffentlichung leistet einen Beitrag zum besseren Verständnis der Kavitationsblasenentstehung im Schmierpalt von Gleitlagern.

Einleitung

Nemec teilte 1975 die möglichen Erscheinungsformen von Kavitation in Gleitlagern in vier unterschiedliche Arten ein. Dabei wurden die Begriffe Saugkavitation, Austrittskavitation, Strömungskavitation und Stoßkavitation geprägt. Jede dieser Kavitationsarten hat eine andere Entstehungsursache und ein charakteristisches Erscheinungsbild (vgl. Abb. 1).

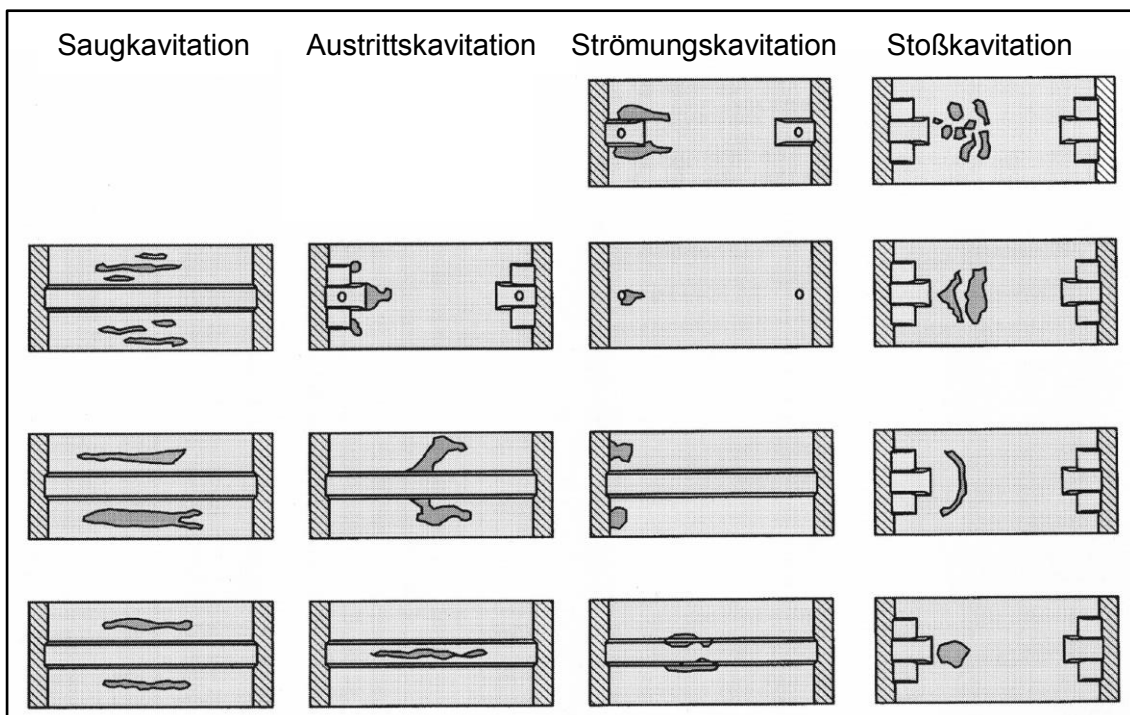


Abb. 1: Schadensbilder an Gleitlagerschalen durch unterschiedliche Kavitationsarten Quelle: *Nemec*

Im Rahmen dieses Beitrags soll hauptsächlich auf die Untersuchung der Entstehung von Stoßkavitation eingegangen werden. Laut *Gläser* 1990 liegt die Ursache der Stoßkavitation in Kurbelwellenhauptlagern in der Dynamik des sich einstellenden Ölstroms. Das über eine radiale Bohrung in der Lagerschale zugeführte Öl wird über die Schmiernut verteilt und strömt zu einem großen Anteil weiter in die radiale Bohrung der Kurbelwelle. Die Bohrung innerhalb der Kurbelwelle dient der Weiterleitung des Öls bis zum unteren Pleuellager. Infolge der Rotation dreht die radiale Kurbelwellenbohrung aus dem Nutbereich heraus und es kommt zu einer schlagartigen Unterbrechung des Ölstroms, welche zu einer kurzzeitigen Unterschreitung des Dampfdruckes führt. Die entstandenen Dampfblasen werden durch die Rotation der Welle weitertransportiert und implodieren wieder in einem Bereich größeren Druckes kurz nach dem Nutende. Die Folge sind nieren-, ring- oder halbmondförmige erosive Auswaschungen in der Lagerschale hinter der Nut (vgl. Abb. 1 rechte Seite).

stellten Lagermodells beträgt $\Psi = 2,5\%$ und ist damit gegenüber einem realen Gleitlager mit einer durchschnittlichen relativen Spaltweite von $\Psi = 0,1\%$ ein Vielfaches größer. Um dennoch eine Vergleichbarkeit der Strömung sicherzustellen, wird die Reynoldszahl Re entsprechend der Gleichung 5 definiert.

$$H_0 = R_2 - R_1 \quad (1) \quad U_1 = \omega \cdot R_1 \quad (4)$$

$$\Psi = \frac{H_0}{R_1} \quad (2) \quad Re = \frac{H_0 \cdot R_1 \cdot \omega}{\nu} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{e}{H_0} \quad (3)$$

Prüfstands Aufbau

Das maßstäbliche Lagermodell besteht aus einem feststehenden Außenzylinder entsprechend der Lagerschale und einem rotierenden Innenzylinder entsprechend der Welle des von *Wolffarth* untersuchten Kurbelwellenhauptlagers. Im Außenzylinder befindet sich eine radiale Bohrung, die in eine über 180° umlaufende Rechtecknut mündet. Über die Bohrung bzw. die Rechtecknut erfolgt die Zugabe des Fluids und gleicht damit der Ölversorgung im realen Kurbelwellenhauptlager. Weiterhin befindet sich im Innenzylinder eine radiale Bohrung, welche das eingebrachte Fluid durch eine hohlgebohrte Antriebswelle wieder aus dem Lagermodell abführt. Um die Wellenverlagerung eines realen Gleitlagers zu berücksichtigen, kann der Außenzylinder gegenüber dem Innenzylinder in einer statisch exzentrischen Stellung montiert werden. Der Antrieb des Innenzylinders erfolgt mithilfe eines Schrittmotors.

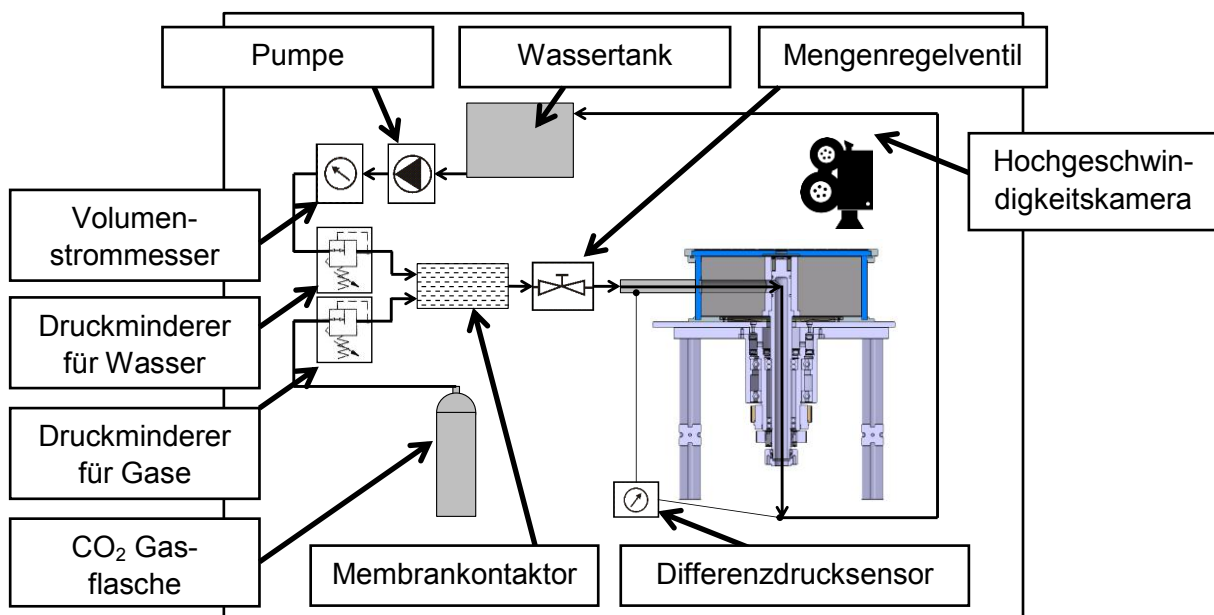


Abb. 3 Prüfstands Aufbau

Das Lagermodell ist an einen hydraulischen Kreislauf angeschlossen, der zur Bereitstellung der einzubringenden Fluidmenge dient (vgl. Abb. 3). Ausgehend von einem Wassertank wird mittels einer regelbaren Kreiselpumpe ein definierter Druck im System erzeugt. Das Mengenregelventil dient zur genauen Einstellung des Versorgungsvolumenstroms. Dieser wird mittels eines Ultraschall-Volumenstrommessers genau quantifiziert.

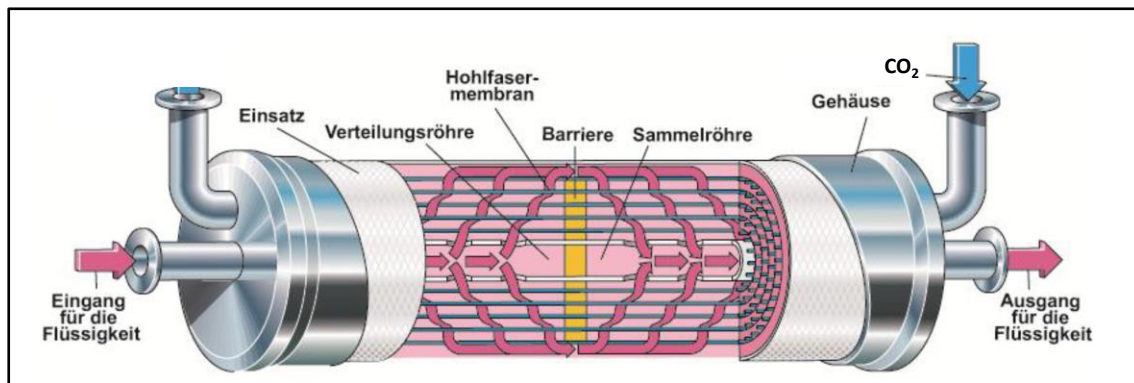


Abb. 4: Membrankontaktor Quelle: *Membrana*

Zur kontinuierlichen Bereitstellung einer ausreichenden Menge an kohlenstoffdioxidhaltigem Wasser kommt ein Membrankontaktor zum Einsatz (vgl. Abb. 4). Im Membrankontaktor diffundiert das Kohlenstoffdioxid über eine große Anzahl an halbdurchlässigen Membranen in das Wasser. Für die Karbonisierung von Wasser wird das Kohlenstoffdioxid auf die Innenseite der Hohlfasermembranen geleitet und das Wasser wird Mantelseitig zugeführt. Ein im Kreislauf vorgeschalteter Druckregler für Wasser sorgt für konstante Druckverhältnisse im Membrankontaktor unabhängig vom eingestellten Versorgungsvolumenstrom. Die mit Kohlenstoffdioxid gefüllte Gasflasche ist ebenso an einen Druckminderer angeschlossen, welcher die Einregulierung eines definierten Druckes auf der Gasseite des Membrankontaktors zulässt. Mit der Variation des Druckverhältnisses zwischen der Gas- und Flüssigkeitsseite im Membrankontaktor kann Einfluss auf die Menge an gelöstem Kohlenstoffdioxid im Wasser genommen werden. *Diamond et al.* berichteten in ihrer Arbeit von 2003 ausführlich über die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser und die Abhängigkeit der erreichbaren Konzentration vom Druck und von der Temperatur. Je höher die erreichte Konzentration an gelöstem Kohlenstoffdioxid im Wasser ist, desto mehr neigt die Flüssigkeit dazu, im Lagermodell an lokalen Unterdruckgebieten Gasblasen zu bilden. Für die optische Erfassung der Blasenentstehung befindet sich in axialer Richtung über dem Lagermodell eine Hochgeschwindigkeitskamera. Die Beleuchtung des Systems erfolgt aus radialer Richtung.

Begleitende numerische Simulationen

Die numerischen Simulationen werden mit dem Programmpaket OpenFOAM durchgeführt. Der 3D-Code basiert auf der Finiten-Volumen-Methode und verwendet die dreidimensionalen, inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen sowie die Massenbilanzgleichung. Wie *Nobis et al.* 2014 bereits beschrieben, werden mit einem blockstrukturierten Rechengitteraufbau nahezu orthogonale Hexaederzellen im Zylinderspalt generiert. Damit können eindeutige Zellnachbarschaftsbeziehungen erzielt werden, welche die Effizienz des numerischen Löser steigern. Für die radialen Bohrungen im Außen- und Innenzylinder wird ein übliches Vernetzungsmuster (O-Netz) gewählt, welches eine wandadaptierte Netzstruktur aufweist. An den Systemgrenzen werden entsprechend der experimentell ermittelten Messwerte die Randbedingungen für Druck und Volumenstrom definiert.

Ergebnisse der Untersuchungen

Die beispielhaften einzelnen Bilder zu Abb. 7 wurden mithilfe der Hochgeschwindigkeitskamera mit einer Bildaufnahmefrequenz von 250 Bildern pro Sekunde aufgenommen. Die eingestellte relative Exzentrizität des Systems beträgt $\varepsilon = 95\%$.

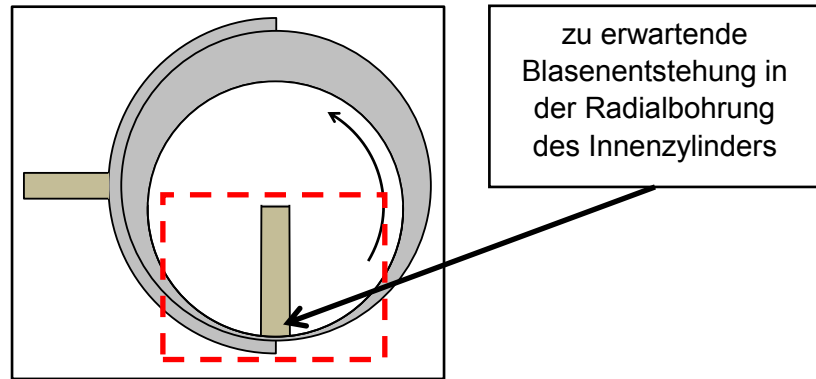


Abb. 5: Sichtbereich der Hochgeschwindigkeitskamera

Die radiale Zuführbohrung im Außenzylinder befindet sich bei einer Winkellage von $\varphi_B = 90^\circ$. Damit befindet sich der engste Spalt direkt am Nutende innerhalb des Sichtbereichs der Hochgeschwindigkeitskamera (vgl. Abb. 5). Verlässt die Auslassbohrung des rotierenden Innenzylinders den Nutbereich, kommt es schlagartig zu einer Änderung der Abströmbedingungen und damit zu einer maßgeblichen Beeinflussung des Strömungsfelds am Ende der Nut bzw. innerhalb der Auslassbohrung. Weiterhin kommt es zu einer über eine Umdrehung periodischen Veränderung des Differenzdrucks zwischen Ein- und Auslass und des zugeführten Volumenstroms.

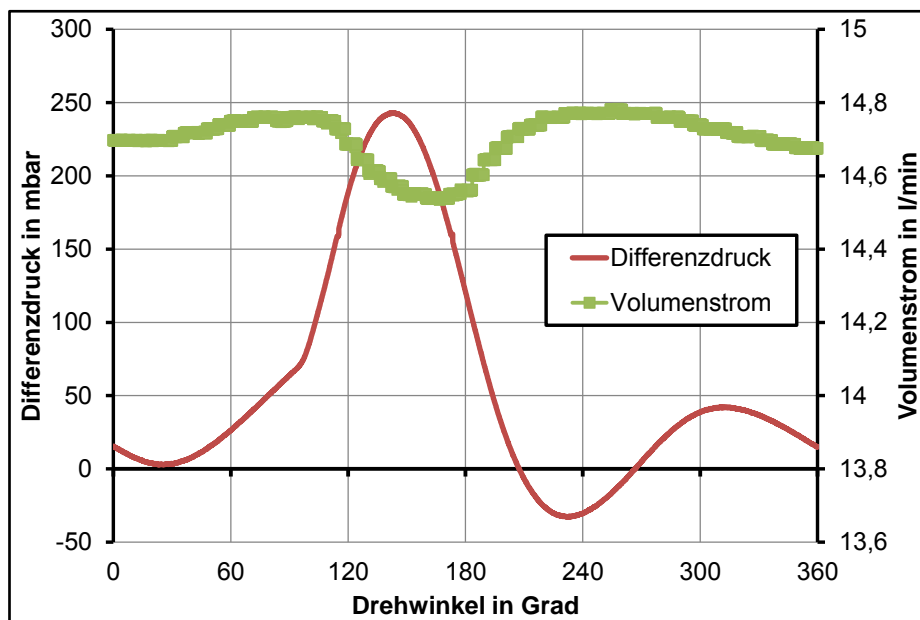


Abb. 6: Differenzdruck zwischen Ein- und Auslass und Volumenstrom über eine Umdrehung des Innenzylinders

Für eine genaue Charakterisierung des Betriebspunktes und für die Definition der Randbedingungen für weiterführende numerische Simulationen werden der Differenzdruck und der Volumenstrom winkelaufgelöst erfasst. Die in Abb. 6 dargestellten Verläufe zeigen die zu den Aufnahmen in Abb. 7 passenden Randbedingungen.

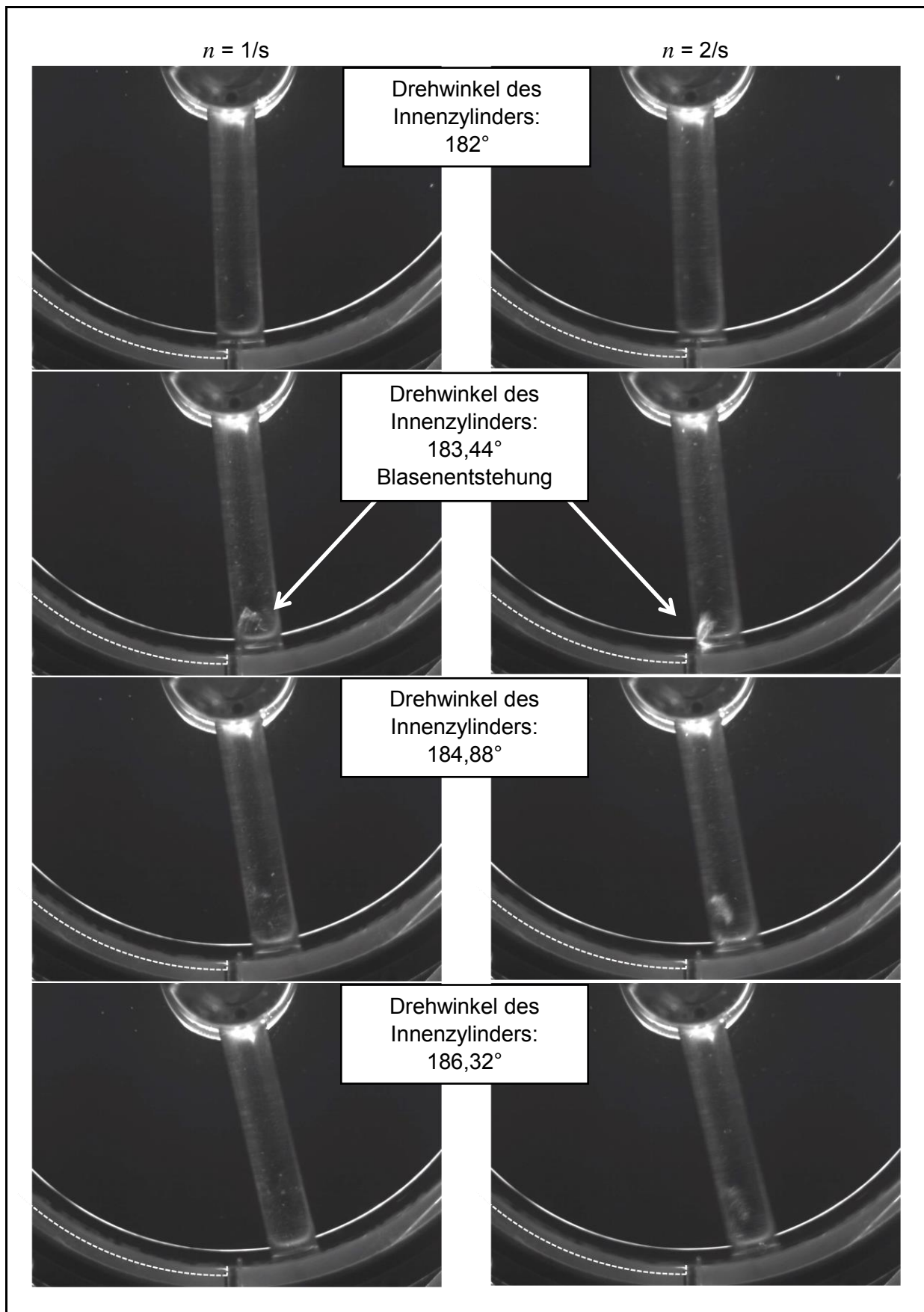


Abb. 7: Blasenentstehung in der Auslassbohrung des Innenzylinders bei $\psi = 2,5\%$, $\varepsilon = 95\%$, $\varphi_B = 90^\circ$, $n = 1/\text{sec}$ (linke Seite), $n = 2/\text{sec}$ (rechte Seite)

Die in der Abb. 7 gezeigten Blasenentstehungsprozesse werden im Wesentlichen durch die Kombination zweier Mechanismen hervorgerufen. Wenn die Auslassbohrung den Nutbereich verlässt und sich damit eine enorme Verkleinerung des Auslassquerschnitts einstellt, kommt es zu einer Forcierung der Strömung und einer maßgeblichen Vergrößerung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Folglich verringert sich der lokale statische Druck. Weiterhin bewirkt die schnelle Verkleinerung des Auslassquerschnitts eine plötzliche Verringerung des Auslassvolumenstroms. Bedingt durch die Trägheit der in der Auslassbohrung strömenden Flüssigkeit wird der Druck nochmals abgesenkt. In der Folge wird ein Druckniveau erreicht, bei dem das Herauslösen von Kohlenstoffdioxid aus dem Wasser beginnt.

Abb. 7 lässt einen visuellen Vergleich der Blasenentstehungsprozesse bei den Drehzahlen $n=1/s$ und $n=2/s$ unter sonst identischen Einstellungsparametern zu. Bei einem Drehwinkel des Innenzylinders von 182° sind keine Blasen im Spalt bzw. in der Auslassbohrung erkennbar. Im nächsten Zeitschritt bei einem Drehwinkel von $183,44^\circ$ lässt sich sowohl bei der Drehzahl von $n=1/s$ als auch bei $n=2/s$ die Blasenentstehung beobachten. Auffallend ist die deutlich markantere Blasenausbildung bei größerer Drehzahl. Die mit größerer Drehzahl schnellere Änderung der Abströmbedingungen ruft lokal größere Druckgradienten hervor und begünstigt damit die Blasenentstehung. Innerhalb der Auslassbohrung können die Blasen stets in der linken Bohrungshälfte, also näher an der sich einstellenden Quetschkante lokalisiert werden. Die nächsten Zeitschritte bei den Winkellagen des Innenzylinders von $184,88^\circ$ bzw. $186,32^\circ$ zeigen den Weitertransport der entstandenen Blasen innerhalb der Auslassbohrung. Offensichtlich wird das herausgelöste Kohlenstoffdioxid zum Teil auch wieder gelöst, denn die entstandenen Blasen treten mit jedem weiteren Zeitschritt deutlich schwächer in Erscheinung.

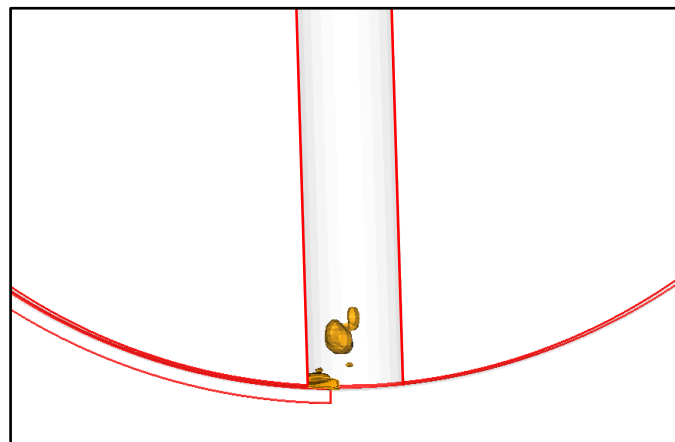


Abb. 8: Ergebnis einer CFD Simulation für bei $\psi = 2,5\%$, $\varepsilon = 95\%$, $\varphi_B = 90^\circ$, $n = 1/\text{sec}$

Abb. 8 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer numerischen Strömungssimulation. Die notwendigen Randbedingungen für Druck und Volumenstrom an den Systemgrenzen werden mithilfe der experimentell ermittelten Messwerte aus dem Modellversuch (vgl. Abb. 6) definiert. Das verwendete mathematische Kavitationsmodell wird entsprechend der Druckverhältnisse im Experiment angepasst. Wie schon die Aufnahmen in Abb. 7 belegen, gilt auch in der numerischen Strömungssimulation die sich einstellende Quetschkante zwischen Auslassbohrung und Nutende als Ausgangspunkt für die Bildung von Kavitäten im Fluid.

Nach Gläser 1990 wird die Kurbelwelle eines Verbrennungsmotors häufig mit einer radialen Durchgangsbohrung und nicht wie im Modell mit einer radialen Sacklochbohrung versehen (vgl. Abb. 9). Damit tritt beim Verlassen der Auslassbohrung des Nutbereichs die gegenüberliegende Seite der Bohrung in den Nutbereich ein. In diesem Fall erfolgt, bedingt durch die

Druckverhältnisse, eine Strömungsumkehr innerhalb der Auslassbohrung und die entstandenen Blasen werden entgegen dem Modellversuch in Richtung der Lagerschale transportiert und können dort entsprechende Schädigungen hervorrufen.

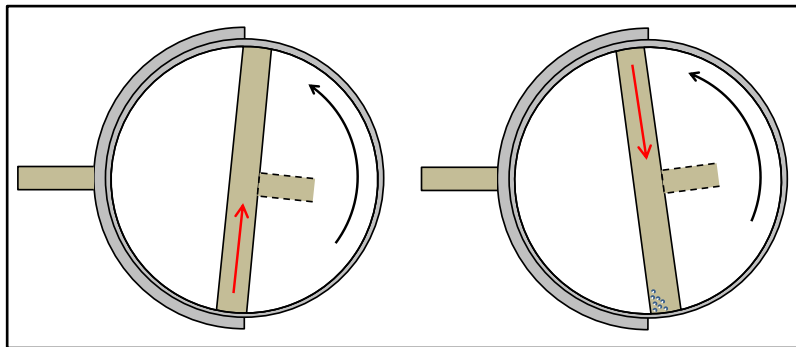


Abb. 9: Strömungsumkehr in der radialen Durchgangsbohrung einer Kurbelwelle

Weiterführende Untersuchungen zum Einfluss des eingestellten Volumenstroms haben gezeigt, dass mit größer werdendem Volumenstrom die Neigung zur Blasenbildung zunimmt. Die visuellen Unterschiede bei der Blasenentstehung sind mit denen bei unterschiedlicher Drehzahl (vgl. Abb. 7) identisch. Dieser Zusammenhang kann mit der generellen Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten sowie dem Vorhandensein größerer Druckgradienten beim Herausbewegen der Auslassbohrung aus dem Nutbereich begründet werden.

Eine naheliegende Maßnahme, um Kavitationsproblemen in realen Gleitlagen zu begegnen, ist die Vergrößerung des Versorgungsdrucks. Damit steigt das generelle Druckniveau im Lager und es wird eine größere Distanz zum Dampfdruckniveau geschaffen. Wie die Visualisierungsversuche zeigen, birgt jedoch die damit einhergehende Vergrößerung des Versorgungsvolumenstroms die Gefahr einer vergrößerten Kavitationsneigung.

Zusammenfassung und Ausblick

Für die experimentelle Untersuchung von Kavitationsschäden an Gleitlagern bleibt meist nur die optische Analyse der geschädigten Lagerschale und der damit verbundene Rückschluss auf die Kavitationsursache. Der eigentliche Blasenentstehungsprozess lässt sich im realen Gleitlager nicht optisch dokumentieren. Mit dem gezeigten Prüfstands Aufbau lassen sich sehr gute Aufnahmen zur Blasenentstehung im Gleitlagermodell generieren. Das Vorhandensein lokaler Unterdruckgebiete innerhalb der instationären Gleitlagerströmung lässt sich mithilfe der vorgestellten Technik visualisieren und die gewonnenen Erkenntnisse können auf die Problemstellung im realen Gleitlager übertragen werden.

Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen wurde speziell auf die modellhafte Abbildung der Stoßkavitation eingegangen. Es wird in den weiterführenden Arbeiten zu prüfen sein, ob sich die gezeigte Technik auch zur Visualisierung der Saug-, Austritts- oder Strömungskavitation eignet. Die Saug- und Austrittskavitation tritt im Zusammenhang mit einer instationären Lagerlast und der damit einhergehenden plötzlichen Verlagerung der Welle innerhalb der Lagerschale auf. Eine dynamische Wellenverlagerung kann im aktuellen Prüfstands Aufbau nicht abgebildet werden, da sich nur eine feste Exzentrizität am System einstellen lässt. Mit einer Weiterentwicklung des Prüfstands soll dieser Anforderung Folge geleistet werden. Die Strömungskavitation tritt an Unstetigkeiten wie z.B. Nuten, Taschen oder Bohrungen in Bereichen großer Strömungsgeschwindigkeiten auf. Die hochaufgelöste Erfassung von Strömungsgeschwindigkeiten mittels laseroptischer Messtechnik stellt einen weiteren wichtigen Punkt für zukünftige Untersuchungen dar.

Verwendete Formelzeichen

B	Lagerbreite
e	Exzentrizität
H_0	mittlere Spaltweite
h	lokale Spaltweite
n	Drehzahl
Q_0	innerer Volumenstrom
Q_{in}	zugeführter Volumenstrom
R_1	Radius Innenzylinder
R_2	Radius Außenzylinder
Re	Reynoldszahl
U_1	Umfangsgeschwindigkeit des Innenzylinders
ψ	normierte Spaltweite
ε	relative Exzentrizität
ν	kinematische Viskosität
φ	Winkel
φ_B	Winkellage der Zuführbohrung
ω	Winkelgeschwindigkeit

Literatur

Nemec, K.L., 1975: „Erkenntnisse zur Problematik der Zuverlässigkeits- und Lebensdauererhöhung von Diesel-Motoren-Gleitlagern“, Maschinenbautechnik 24, pp. 112 – 116, Berlin

Gläser, H., 1990: „Schäden an Gleit- und Wälzlagerungen“, 1. Auflage, Verlag Technik, Berlin, pp. 65 - 68

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

Membrana GmbH, 2015: „Liqui-Cel Membrane Kontaktors; Design & Betriebsanleitung für Membrankontaktoren“, Wuppertal

Greuter E., Zima, S., Hoffmann, W., Liebig, B., 2011: „Motorschäden - Schäden an Verbrennungsmotoren und deren Ursachen“, 4.Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg

Diamond, Larryn W., Akinfiev, Nikolay N., 2003: „Solubility of CO₂ in water from -1.5 to 100 °C and from 0.1 to 100 MPa: evaluation of literature data and thermodynamic modelling“, Fluid Phase Equilibria 208 pp. 265–290

Nobis, M., Reinke, P., Schmidt, M., Klüber, T., Salzmesser, R., Bonitz, T., Selzer, M., Egbers, C., 2014: „Blasenentstehung im hydrodynamisch geschmierten Gleitlager“, 21. GALA Fachtagung, Karlsruhe

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

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.