

## **Analyse der Blasendynamik der Flüssigkeitskavitation im Schmierfilm eines hydrodynamischen Gleitlagers**

**Tom Beckmann, Marcus Schmidt, Jan Ahlrichs, Peter Reinke**

HS für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Von-Ossietzky-Straße 99, 37085 Göttingen

Schlagworte: Gleitlager, Visualisierung, Kavitation

### **Zusammenfassung**

Im Schmierfilm eines hydrodynamischen Gleitlagers kann es unter gewissen Betriebsbedingungen zum Auftreten von Flüssigkeitskavitation kommen. Die Flüssigkeitskavitation lässt sich in drei Kavitationsformen unterscheiden: Pseudo-, Gas- und Dampfkavitation. Lediglich Dampfkavitation kann in Verbindung mit Werkstoffkavitation zum Schaden und späteren Ausfall eines Gleitlagers führen. Eine mögliche Ursache zur Entstehung von Dampfkavitation liegt in der Dynamik der Spaltweitenänderung begründet. Die Autoren haben den erstmaligen Nachweis von implodierenden Dampfblasen im Schmierfilm eines Gleitlagers in Folge einer transienten Spaltweitenänderung vollumfänglich erbracht. Zum Erzeugen der schadensrelevanten Dampfkavitation muss eine kritische Spaltweitenänderungsgeschwindigkeit in Verbindung mit einer kritischen Exzentrizität erreicht werden. Für diese Untersuchungen steht ein bereits umfangreich in vorangegangenen GALA-Fachtagungen vorgestelltes Gleitlager-Modellexperiment zur Verfügung. Mit diesem Modellexperiment ist es möglich, kavitierende Schmierspaltströmungen sowohl qualitativ als auch quantitativ zu untersuchen. Das Experiment beinhaltet ein speziell entwickeltes Fluid, das die Reynolds- und Kavitationsähnlichkeit erfüllt. Das skalierte Lagermodell bildet mit einem kinematischen Mechanismus die kritischen Bereiche einer Wellenverlagerungsbahn nach, die für das Entstehen von Dampfkavitation notwendig sind.

Um den zum Schaden führenden Bereich der oben gewählten Betriebsparameter zu definieren, muss zwischen Verdampfen der Flüssigkeit und dem Ausgasen von Luft unterschieden werden. Dies wird durch die Verwendung von konditionierten Flüssigkeiten realisiert. Ziel ist es, in den erforschten Grenzen, den Parameterteilbereich einzugrenzen, in dem der Dampfblasenzyklus mit einer Implosion der Dampfblasen endet. Damit soll der schadenskritische Parameterbereich weiter eingegrenzt werden. Die gezeigten experimentellen Ergebnisse umfassen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, die eine detaillierte Analyse der Blasenbildung mit einer Geschwindigkeit von 10.000 Bildern pro Sekunde (fps) ermöglicht. Es lässt sich zusammenfassen, dass die Arbeit ein tieferes Verständnis für den Kavitationsprozess in dynamisch belasteten Gleitlagern leistet.

Das Forschungsvorhaben wird gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Projektnummer 462581008.

## Einleitung

Die Definition und die Verwendung des Begriffs „Kavitation“ unterscheidet sich in den unterschiedlichen technischen Anwendungen. Das wissenschaftliche Arbeiten in diesem Themengebiet erfordert somit eine genaue Definition des Begriffs, der betreffenden Umgebung und den vorherrschenden Bedingungen. Abbildung 1 stellt die Begriffsdefinition mit der Einordnung des eigenen Untersuchungsbereichs von Kavitation in einem Flussdiagramm dar. Im Allgemeinen wird Kavitation als das Entstehen von Blasen in einem Kontinuum definiert. Die zweite Ebene resultiert aus dem Begriff Kavitation und ermöglicht eine Unterscheidung des Prozesses basierend auf der Substanz, in der ein Hohlraum auftritt. Es handelt sich um Werkstoffkavitation, wenn der Hohlraum das Ergebnis von Erosion an der Oberfläche z. B. einer Lagerschale oder eines Hydraulikbauteils ist. Handelt es sich bei dem Hohlraum um eine gas- oder dampfgefüllte Blase in einer Flüssigkeit, wird von Flüssigkeitskavitation gesprochen. Um Kavitation in Schmierstoffsubstanzen zu definieren und von anderen Forschungsbereichen wie der Hydraulik abzugrenzen, definieren die Autoren die charakteristischen Strömungsbedingungen in einer dritten Ebene. Die Strömungsumgebung von Schmierstoffspaltströmungen ist ein zweidimensionaler Flüssigkeitsfilm, der von zwei benachbarten Wänden begrenzt wird. Typische Anwendungen dieser Schmierung sind Gleitlager und Quetschfilmdämpfer. Die entstehenden Blasendurchmesser haben dabei die gleiche Größenordnung wie der Schmier-spalt zwischen Welle und Lagergehäuse. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zur Kavitationsforschung im Allgemeinen.

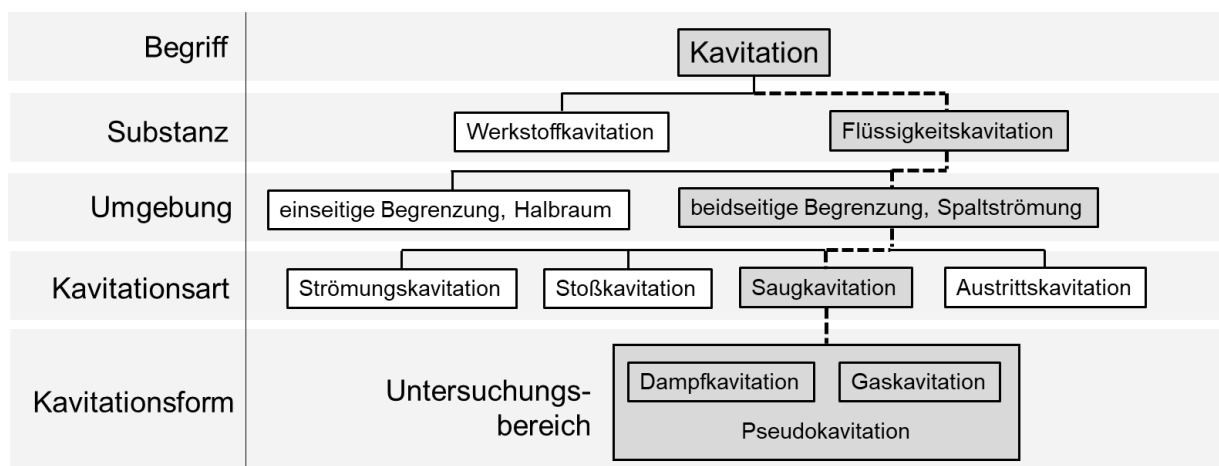


Abbildung 1: Begriffsdefinition Kavitation und Einordnung des Untersuchungsbereichs

Bei Gleitlagern, die den Forschungsgegenstand dieser Arbeit bilden, orientiert sich die Charakterisierung der Kavitationsart an den gängigen Definitionen des aktuellen Forschungsstandes. Diese Definitionen wurden durch umfangreiche Studien von Gläser [1], Garner et al. [2] und Engel [3] festgelegt. Aufgrund der Feststellung von Osterland [4], dass Schmierstoffe immer einen bedeutenden Gehalt an gelöster Luft aufweisen, müssen sowohl Gaskavitation als auch die Dampfkavitation in Betracht gezogen werden. Nach den Erkenntnissen von Braun und Hendricks [5] sowie Braun und Hannon [6] können die Kavitationsformen wie folgt definiert werden:

**Gaskavitation** tritt auf, wenn gelöstes Gas aus dem Schmierstoff freigesetzt wird und sich gasgefüllte Blasen bilden.

**Dampfkavitation** tritt auf, wenn der flüssige Schmierstoff einem lokalen Druck unter seinem Dampfdruck ausgesetzt ist und durch spontane Verdampfung dampfgefüllte Blasen entstehen.

**Pseudokavitation** tritt auf, wenn gasgefüllte Blasen ihr Volumen aufgrund eines Druckgradienten ändern, ohne dass ein Stoffaustausch mit der umgebenden Flüssigkeit stattfindet.

Der Untersuchungsbereich ist aufgrund der drei Kavitationsformen, der Betriebsparameter und des breiten Spektrums an technischen Anwendungen sehr groß. Dennoch gibt es einen wissenschaftlichen Konsens, dass Lagerausfälle aufgrund von Kavitation nur auftreten können, wenn die Betriebsbedingungen das Erzeugen von Dampf ermöglichen. Dieser Beitrag konzentriert sich insbesondere auf die Saugkavitation. Die Autoren dieser Arbeit verwenden die Untersuchungen von Graf und Kollmann [7], in der die für Saugkavitation charakteristischen Betriebsbedingungen angegeben sind. Abb. 2 zeigt die Wellenverlagerungsbahn einer Kurbelwelle im Inneren eines Gleitlagers. Kavitationskritische Bereiche einer Wellenverlagerungsbahn sind gekennzeichnet durch eine hohe Exzentrizität und eine schnelle Änderungsgeschwindigkeit der Schmierfilmdicke. Reinke et al. [8] haben diese Parameter in einer vergangenen Arbeit in einen Faktor  $K$  zusammengefasst und somit die Kinematik der Wellenverlagerung im Hinblick auf Kavitationsgefahr näher beschrieben. Dieser Ansatz ermöglicht die Übertragung auf ein Modellexperiment.

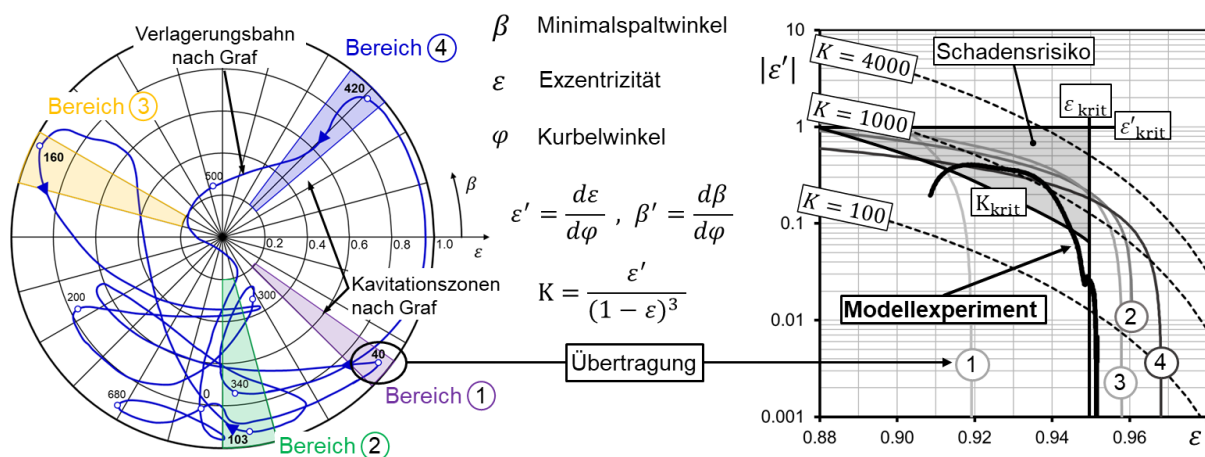


Abbildung 2: Verlagerungsbahn des Modellexperiments im Vergleich zur realen Verlagerungsbahnen nach Graf [7] mit Kavitationsrisiko

## Theoretische Betrachtung

Um Verlagerungsbahnen eines hydrodynamischen Gleitlagers aus Abbildung 2 in einem Modell abzubilden ist eine radiale Verlagerung des Minimalspalt  $h_{\min}$  nötig. Dies ähnelt dem für Gleitlager typischen Prozess der Saugkavitation. Das Gleitlagermodell in Abbildung 3 besteht aus einer rotierenden Welle und einer exzentrisch positionierten Lagerschale. Der geometrische Schmierpalt bildet sich zwischen Welle und Lagerschale aus. Im Betriebspunkt 1 rotiert die Welle mit  $\omega_1$  und erzeugt eine stationäre Druckverteilung  $p_{\text{stat}}$  über dem Sommerfeldwinkel [9]. In Abhängigkeit der geometrischen Verhältnisse bildet sich ein lokales Druckminimum  $p_{\min}$  im divergenten Spalt des Gleitlagers aus. Der Minimalspalt des Gleitlagers bildet sich bei einem Sommerfeldwinkel von  $\varphi = 180^\circ$  aus. Die Untersuchungen im Folgenden beziehen sich auf den Objektbereich des Spaltes von  $\varphi = 179^\circ$  bis  $\varphi = 193.5^\circ$ .

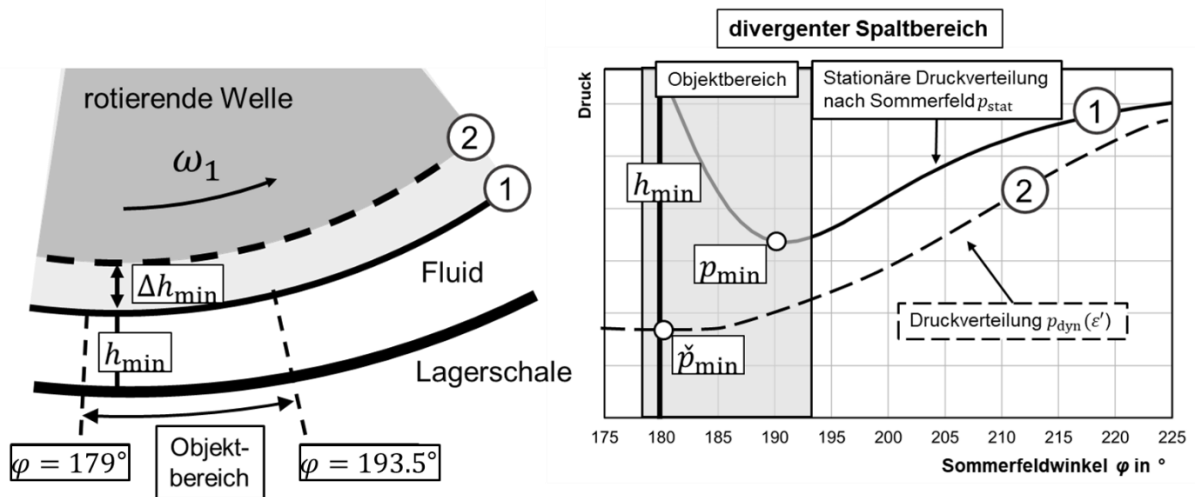


Abbildung 3: Aufbau des Modellexperiments mit Betriebspunkt 1 und 2

Die radiale Verlagerung der Welle  $\Delta h_{\min}$  während des Betriebspunkt 2 erzeugt eine dynamische Druckverteilung  $p_{\text{dyn}}$  mit einem lokalen Druckminimum  $\check{p}_{\min}$  bei  $\varphi = 180^\circ$ . Die Größe dieses Druckminimums ist im Faktor K mit den Parametern Schmierpaltdicke sowie Änderung des Schmierpaltes begründet. Dieser dynamische Druck wirkt additiv auf die stationäre Druckverteilung des Lagers. Kavitation bildet sich im Bereich des lokalen Druckminimums aus, welches das Untersuchungsfenster in Abbildung 2 definiert und somit den eingezeichneten Objektbereich der Kamera vorgibt.

Tabelle 1: physikalische Größen

Bezeichnung	Symbol	Größe
Spaltweite	$H_0$	3.62 mm
Minimalspalt	$H_{\min}$	0.538 mm
Radius Welle	$R_1$	146.44 mm
Radius Lagerschale	$R_2$	150.06 mm
Relative Spaltweite	$\Psi$	2.47%
Winkelgeschwindigkeit	$\omega_1$	8.14 1/s
Reynoldszahl	$Re$	38.2

## Übertragung auf das Modellexperiment

Der Versuchsaufbau in Abbildung 4 ist eine Weiterentwicklung des bereits in vergangenen Gala-Fachtagungen vorgestellten Modellexperiments. Die Welle (2) wird durch die Antriebseinheit (1) drehzahlgesteuert angetrieben. Die Welle rotiert innerhalb der exzentrisch positionieren Lagerschale (3) mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_1$ . Die Lagerschale besteht aus Polymethylmethacrylat (PMMA), das präzise bearbeitet und poliert wurde, um die erforderliche optische Qualität zu erzielen. Die achteckige Außenform bietet einen ungehinderten radialen optischen Zugang zum Schmierpalt. Die tangentialen Flächen des Achtecks sind dabei orthogonal zur optischen Achse des Bildbereichs angeordnet. Die Lagerschale ist auf einer Führungsschiene (4) als radiale Traversierung gelagert.

In der 29. Gala-Fachtagung [10] wurde das Modellexperiment mit radialer Verschiebung der Lagerschale durch einen pneumatischen Aktor und einen Umlenkmechanismus vorgestellt. Diese Aktorik erzeugte eine moderate dynamische Veränderung des Schmierpalts und

ermöglichte eine umfangreiche Untersuchung von Gaskavitation. Das Erzeugen von Dampfkavitation erfordert jedoch einen Ruck und somit eine rapide dynamische Verschiebung der Lagerschale. Aus diesem Grund ist das Modellexperiment um einen Pendelaufbau (5) erweitert, der auf den Boden der Lagerschale schwingt. Beim Aufprall wird die kinetische Energie der Pendelmasse auf die Lagerschale übertragen. Der entstehende Ruck bewirkt eine Verschiebung der Lagerschale. Daraus resultiert die nötige sprunghafte Änderung des Schmierpalts zwischen (2) und (3).

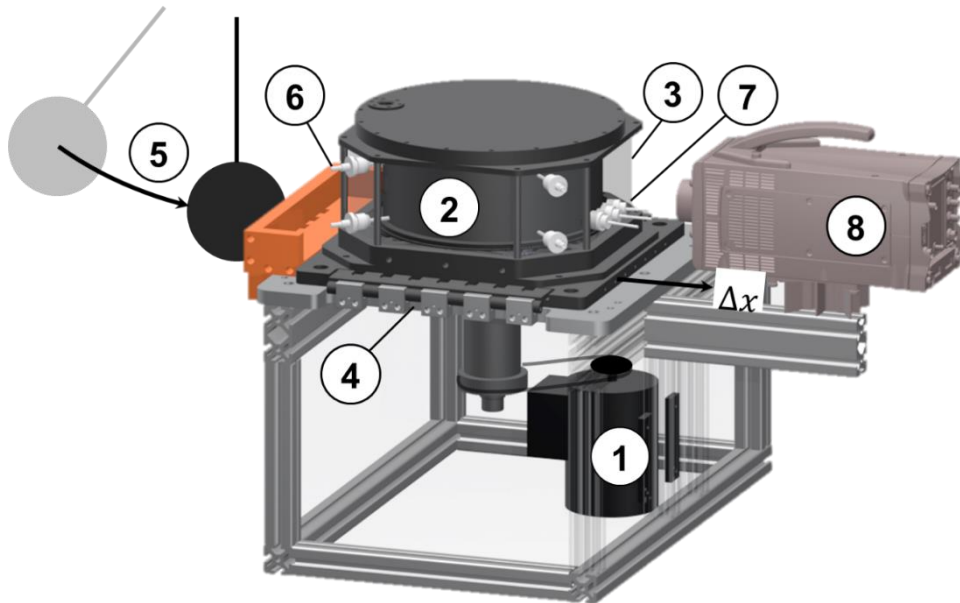


Abbildung 4: Aufbau des Modellexperiments mit radialer Verlagerung der Lagerschale  $\Delta h_{\min}$

Zusätzlich ist das Modellexperiment mit Drucksensoren (6) an der Unter- und Oberseite der Lagerschale sowie drei Wegsensoren (7), die den Schmierpalt zwischen (2) und (3) erfassen ausgestattet. Die verwendete Hochgeschwindigkeitskamera (8) „iXCameras - iSpeed 720“ erzeugt in einer Auflösung von 1512x1098 px bei einer Bildfrequenz von 10 000 Hz die 2D Bildinformation der Blasendynamik im Spalt.

In Abbildung 5 ist der für den Betriebspunkt relevante Objektbereich aus Abb. 2 und Abb. 6 von  $\varphi = 179^\circ \dots 193.5^\circ$  zur Untersuchung des Kavitationsprozesses am Modellexperiment dargestellt.

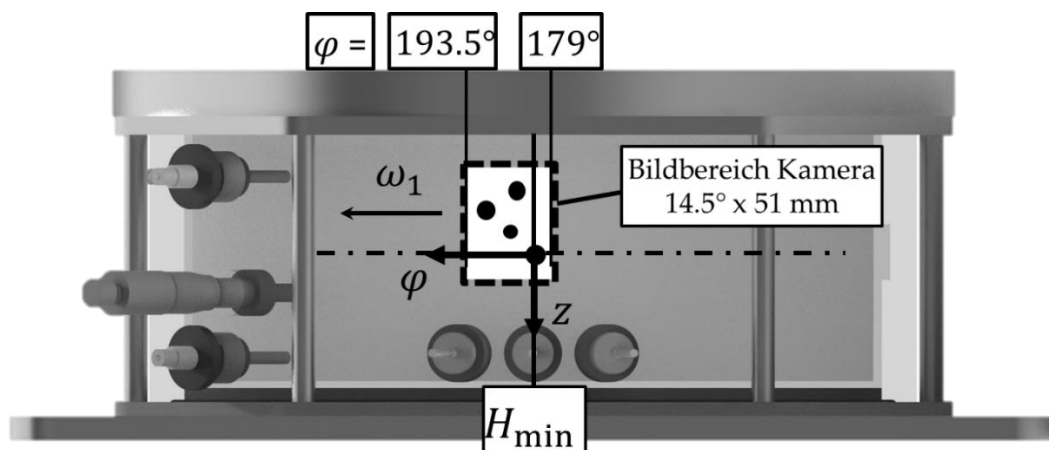


Abbildung 5: Objektbereich am Modellexperiment

Der wichtige Beitrag dieser Arbeit ist es, Dampfblasen ausschließlich durch eine instationäre Veränderung des Schmierpaltes zu Erzeugen. Die Abfolge der Abbildungen 6 a bis g zeigt den gesamten Lebenszyklus einer ausgewählten Dampfblase aus dem Objektbereich. Daraus lassen sich 7 charakteristische Punkte der Blasendynamik wiederfinden und ableiten: Beginn (a), Wachstum (b) maximale Blasengröße (c) Kontraktion (d), instationärer Kollaps (e), Rebound (f) und Reste der kollabierten Blase (g).

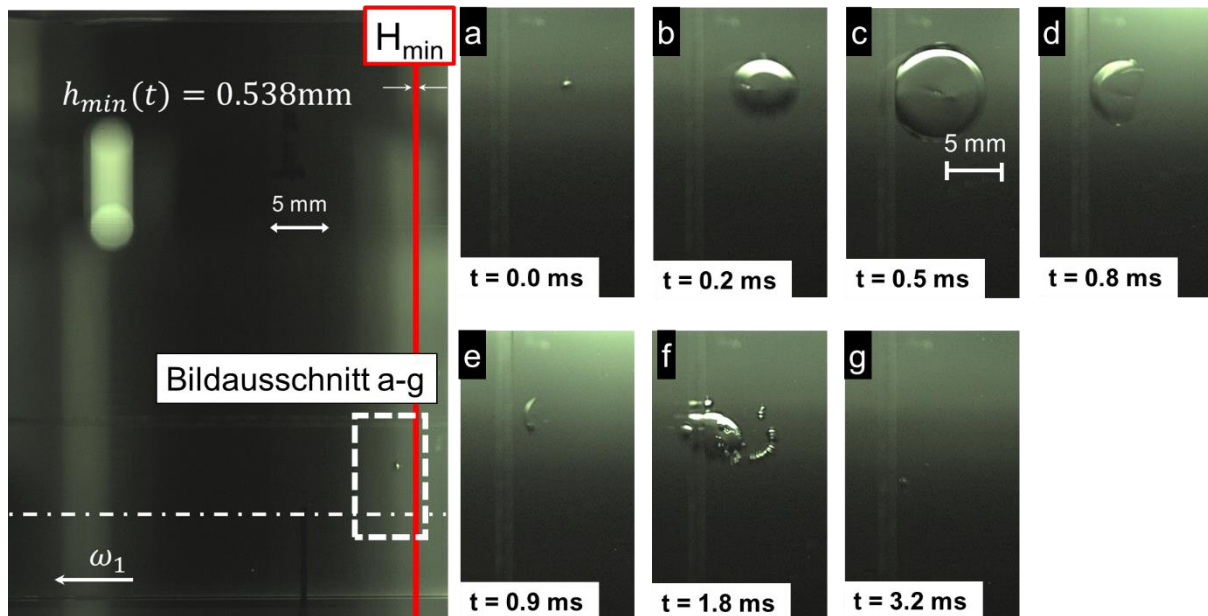


Abbildung 6: Lebenszyklus einer Dampfblase bei instationärer Veränderung des Schmierpaltes

Nach der Entstehung (a) wächst die Blase (b) und erreicht ihre maximale Größe (c) innerhalb von 0,5 ms. Nach einer kurzen Stagnation beginnt die Blase zu schrumpfen (d), gefolgt von ihrem Kollaps (e), der ca. 0,9 ms nach dem Entstehen der Blase beginnt. Die ausgewählte Blase prallt einmal auf (f) und verschwindet dann vollständig (g). Am Ende des Lebenszyklus der Dampfblase sind keine sichtbaren Überreste oder Restgase zu erkennen. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass eine vollständige Kondensation des Dampfes stattgefunden hat.

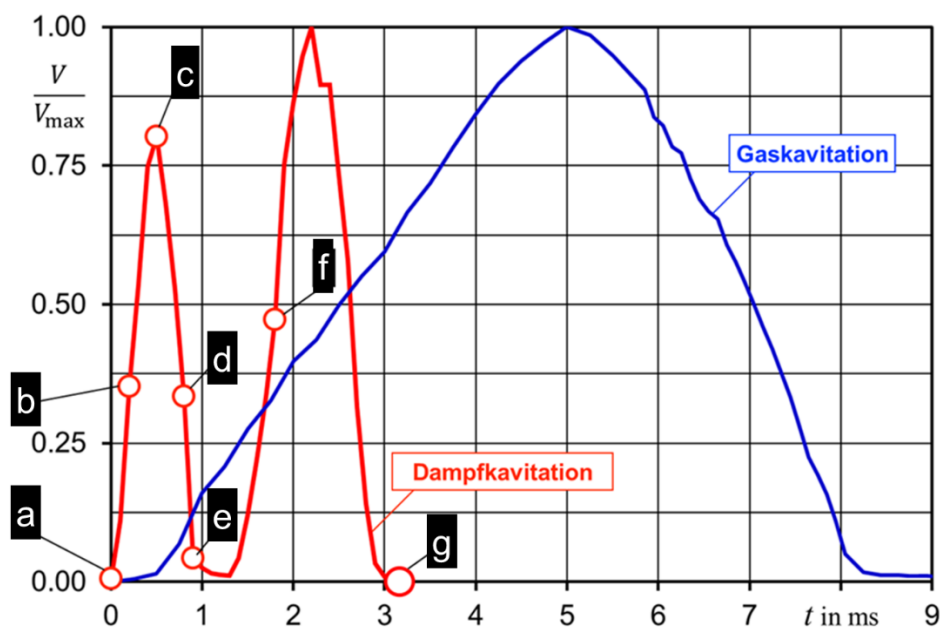


Abbildung 7: Vergleich und Entwicklung des Blasenvolumens von Dampf- und Gaskavitation

Mit Hilfe von Bildbearbeitung lässt sich nach Beckmann et al [10] aus der 2D Bildinformation und der aufgenommenen Messdaten das 3D Blasenvolumen über der Zeit ermitteln. Somit ist es möglich die gesamte Blasendynamik in Abbildung 7 qualitativ abzubilden. Die Lebensdauer einer Dampfblase (3.2ms) im Vergleich zur Zyklusdauer einer Gasblase (8.3ms) ist deutlich kürzer. Die Dampfblase hat nach dem Kollabieren keine Restgasmasse. Die Gasblase wird komprimiert und die Restgasmasse verbleibt im Schmierspalt und sammelt sich während der gesamten Versuchsdauer an.

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden experimentelle Ergebnisse zur Dampfkavitation in einer Schmierspaltströmung mit exzentrischen Spalt vorgestellt. Diese Art der Kavitation wird durch eine instationäre Vergrößerung des Schmierspalts verursacht. Im Gegensatz zu den meisten wissenschaftlichen Arbeiten in diesem Fachgebiet, ist die Ursache der Kavitation in der Dynamik einer äußeren Lagerschale zu einer rotierenden Welle begründet. Diese Art der Dampfkavitation ähnelt der Saugkavitation in einem dynamisch belasteten realen Gleitlager. Ausgehend von bereits in vergangenen Gala-Fachtagungen vorgestellten Ergebnissen im Zusammenhang mit Gaskavitation zeigen die vorliegenden Untersuchungen, dass ein Erzeugen von Dampfkavitation eine rapide Vergrößerung des Schmierspalt erfordert. Demnach wurde ein bestehendes Modellexperiment um einen Pendelaufbau überarbeitet. Die kinetische Energie dieses Pendels wird genutzt, um einen Ruck zu erzeugen. Dieser Ruck erzeugt eine Stoßkraft, um die erforderliche instationäre Verlagerungsgeschwindigkeit der Lagerschale zu erzwingen. Mit einer Zeitauflösung von 10 000 Bildern pro Sekunde ermöglicht eine Hochgeschwindigkeitskamera die gesamte Blasendynamik der Dampfblasen von der Entstehung bis zum Kollaps abzubilden. Die durch Gaskavitation erzeugten Blasen wachsen basierend auf einen Stoffaustausch von gelöster Luft in Kombination mit Pseudokavitation. Dampfblasen hingegen wachsen nur durch den Stoffaustausch infolge des Phasenwechsels der Flüssigkeit oder einer niedrig siedenden Komponente des Flüssigkeitsgemischs. Die Lebensdauer einer Dampfblase ist im Vergleich zur Zyklusdauer einer Gasblase deutlich kürzer. Durch die Analyse der Ergebnisse auf Basis eines bereits entwickelten und erprobten Ansatzes zur Auswertung von Saugkavitation, wird eine klare Kategorisierung von Gaskavitation und Dampfkavitation möglich. Gaskavitation dominiert bei moderater Spaltvergrößerung. Dampfkavitation jedoch benötigte eine schnelle und sprunghafte Spaltvergrößerung, welche durch eine hohe Dynamik in der Wellenverlagerungsbahn verursacht werden kann. Die Versuche am Modellexperiment bestätigen nun diese Erkenntnisse.

## Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Bewilligung des Forschungsvorhabens mit der Projektnummer 462581008.

## Literatur

- [1] H. Gläser: Schäden an Gleit- und Wälzlagerungen. Verlag Technik, Berlin, 1990.
- [2] D. R. Garner, R. D. James, J. F. Warriner: Cavitation erosion damage in engine bearings - Theory and Practice. J. of Engineering for Power, Vol. 102, pp. 847-857, 1980.
- [3] U. Engel: Schäden an Gleitlagern in Kolbenmaschinen - in Bartz W. (Hrsg.): Schäden an geschmierten Maschinenelementen. Zweite Auflage, Expert-Verlag, 1992.
- [4] Osterland, S.; Mueller, L.; Weber, J. Influence of air dissolved in hydraulic oil on cavitation erosion. International Journal of Fluid Power 2021, 22, 373-392, doi:10.13052/ijfp1439-9776.2234.

- [5] Braun, M.J.; Hendricks, R.C. An Experimental Investigation of the Vaporous/Gaseous Cavity Characteristics of an Eccentric Journal Bearing. ASLE Trans. 1984, 27, 1–14. <https://doi.org/10.1080/05698198408981539>.
- [6] M. J. Braun, W. M. Hannon: Cavitation formation and modeling for fluid film bearings – A review. Journal of Engineering Tribology, Vol. 224, pp. 838-863, 2010.
- [7] Graf, G.; Kollmann, K. Untersuchungen der Hauptlager eines 8-Zylinder-4-Takt-Schiffsdieselmotors. In *FVV-Forschungsbericht*, Nr. 2-211/10; FVV: Frankfurt am Main, Germany, 1964; pp. 1–69.
- [8] Reinke, P.; Schmidt, M.; Beckmann, T. *Advanced Model Experiment for the Research of Journal Bearings with Cavitation*; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2019. <https://doi.org/10.4271/2019-01-2331>.
- [9] A. Sommerfeld "Zur hydrodynamischen Theorie der Schmiermittelreibung", Zeitschrift für Mathematik und Physik, Vol. 40, pp 97 155, 1904
- [10] Beckmann, T.; Reinke, P.; Schmidt, M. Experimentelle Untersuchung der instationären, dreidimensionalen Flüssigkeitskavitation in der Schmierspaltströmung, 29. Fachtagung Experimentelle Strömungsmechanik pp.25-1 25-8 ISBN:978-3-9816764-7-1, 2022