

## Analyse von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Flüssigkeitskavitation in der exzentrischen Schmierpaltströmung

**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 während des Betriebes Flüssigkeitskavitation auftreten. Die Flüssigkeitskavitation wird in drei Kavitationsformen unterschieden: Pseudo-, Gas- und Dampfkavitation. Dampfkavitation kann in Verbindung mit Werkstoffkavitation zum Ausfall des Lagers führen. Eine mögliche Ursache zur Entstehung von Dampfkavitation liegt in der Kinematik der Wellenverlagerungsbahn der rotierenden Welle begründet. Kavitationskritische Bereiche einer Wellenverlagerungsbahn sind gekennzeichnet durch eine hohe Exzentrizität und eine schnelle Änderung der Schmierfilmdicke. Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss dieser Betriebsparameter hinsichtlich der Kavitationsneigung zu untersuchen und ein tieferes Verständnis zum Auftreten der drei Kavitationsformen im Schmierfilm zu erhalten. Zur Untersuchung haben die Autoren ein bereits in vorangegangenen Veröffentlichungen vorgestelltes Modellexperiment um eine dynamische Veränderung des Minimalspalt es weiterentwickelt. Damit können die kritischen Bereiche der Wellenverlagerungsbahn skaliert in zeitlicher und örtlicher Auflösung untersucht werden. Das Modellexperiment bietet die optische Zugänglichkeit, um den gesamten Kavitationsprozess im Schmierfilm in radialer Richtung zu beobachten. Das dazu verwendete Kavitationsfluid hat einen auf den Betriebspunkt abgestimmten Luftgehalt und Dampfdruck. Der Kavitationsprozess wird unter Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt und die entstehende Blasendynamik anschließend durch Bildauswertung analysiert. Das Modellexperiment zeigt, dass im Schmierfilm sowohl gasförmige als auch dampfförmige Kavitation separat oder in Verbindung miteinander auftreten. In dieser Arbeit wird anhand der oben genannten Betriebsparameter die gesamte Blasendynamik von der Entstehung bis zum Schrumpfen der Blase mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen untersucht. Die Ergebnisse liefern einen Rückschluss auf die entsprechenden Kavitationsformen. Mithilfe dieser Ergebnisse wird ein Beitrag zum Verständnis von Kavitationsprozessen in exzentrischen Spalten geleistet, um die durch Dampfkavitation resultierenden erosionskritische Zonen näher zu identifizieren.

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

## Einleitung

Ein präzises Verständnis über die Schmierpaltströmung in Gleitlagern ermöglicht eine zuverlässige Auslegung dieses Maschinenelements unter dem Einfluss betriebsrelevanter Bedingungen. Wilson [1] sowie Graf und Kollmann [2] weisen nach, dass hydrodynamische Gleitlager in Dieselmotoren hohen dynamischen Belastungen ausgesetzt sind. Hohe Druckunterschiede infolge der Spaltänderung sind dabei charakteristisch. Es entstehen im Schmierpalt des Gleitlagers Bereiche mit niedrigen lokalen Drücken. Fällt der lokale Druck unterhalb eines kritischen Schwellwertes, kann dies zu Kavitation führen. Dieser kritische Schwellwert kann der Sättigungsdruck für gelöstes Gas oder der Dampfdruck der Flüssigkeit sein. Lediglich Dampfkavitation kann jedoch zu Werkstoffkavitation und damit zum Schaden des Gleitlagers führen. Ein besseres Verständnis der kavitationsfördernden Parameter soll bei der anwendungsorientierten Auslegung von Motorlagern helfen, die Performanceziele zu erreichen. Ein Modellexperiment, welches die Schmierpaltströmung nach Ähnlichkeitsgesetzen nachbildet, dient der quantitativen Untersuchung hinsichtlich der Kavitationsneigung um somit ein tieferes Verständnis zum Auftreten der drei Kavitationsformen im Schmierfilm zu erhalten.

## Stand der Forschung

Die Definition und die Verwendung des Begriffs „Kavitation“ unterscheidet sich in den unterschiedlichen technischen Anwendungen. Zum Themenbereich der hydrodynamischen Gleitlager geben Reinke et al. [3] einen fachlichen Überblick und ordnen den Begriff auf Basis einschlägiger Literatur in drei Kavitationsformen ein: Pseudo-, Gas- und Dampfkavitation. Dampfkavitation kann in Verbindung mit Werkstoffkavitation zum Ausfall des Lagers führen. Beim Auftreten des Kavitationsereignisses in Gleitlagern ist die Frage nach der Kavitationsform bzw. den Kavitationsformen, d.h. separat oder in Verbindung, bereits historisch. Braun und Hendricks [4] unterscheiden dabei zwischen drei Arten von Mechanismen die eine Blase entstehen und wachsen lassen:

- a) **Pseudokavitation:** Die Größe der Blase ändert sich aufgrund einer Druckdifferenz  $\Delta p$ . Es findet kein adiabatischer und isothermer Massenaustausch vom Fluid in die Kavität statt.
- b) **Gaskavitation:** Der lokale Druck in der Flüssigkeit sinkt auf den Sättigungsdruck  $p_g$  ab, ist jedoch größer als der Dampfdruck  $p_v$ . Die in der Flüssigkeit gelösten Gaskeime bilden eine separate Gasphase.
- c) **Dampfkavitation:** Der lokale Druck in der Flüssigkeit sinkt unterhalb des Dampfdruckes  $p_v$ . Die flüchtigen Kohlenwasserstoffkeime an den Oberflächen (ähnlich dem Keimsieden) oder bereits vorhandene Verunreinigungen in der Flüssigkeit erzeugen einerseits eine neue Kavität oder andererseits passiert dieser Vorgang innerhalb einer vorhandenen gasförmigen Kavität. Es resultiert ein Gemisch aus gelöstem Gas und Dampf.

Beckmann et al. [5] haben bereits im Tagungsband 2021 die Daten der Verlagerungsbahnen aus Abbildung 1 in den von Graf und Kollmann identifizierten Kavitationszonen in das Kavitationsrisikodiagramm übertragen. Kavitationskritische Bereiche einer Wellenverlagerungsbahn sind gekennzeichnet durch eine hohe Exzentrizität und eine schnelle Änderungsgeschwindigkeit der Schmierfilmdicke. Reinke et al. [6] 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.

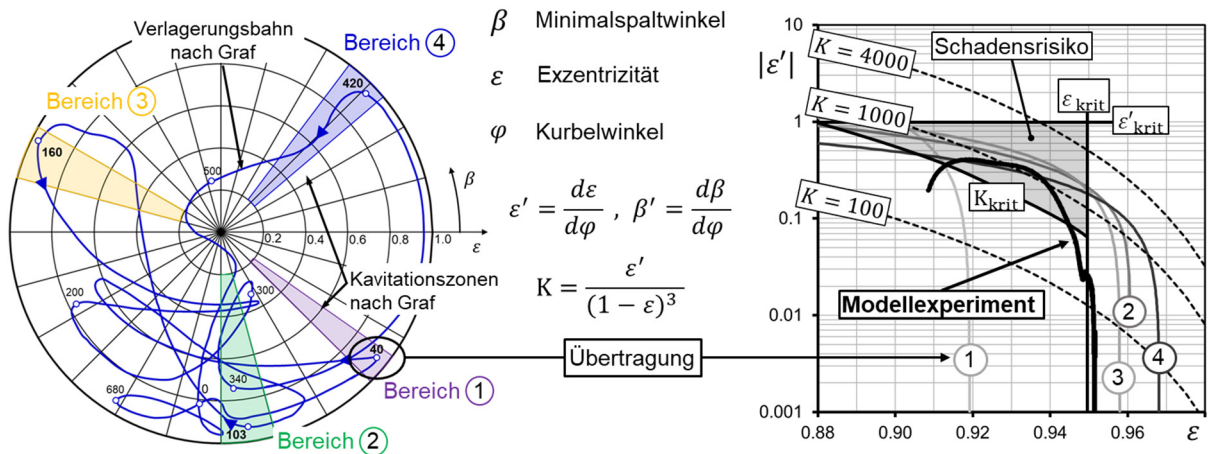


Abbildung 1: Verlagerungsbahn des Modellexperiments im Vergleich zur realen Verlagerungsbahn nach Graf [2] mit Kavitationsrisiko

Bei der Auslegung des Modellexperiments ergeben sich mechanische Obergrenzen in Bezug auf Größe der maximalen Exzentrizität  $\varepsilon_{krit}$  sowie der Übertragung der Verstellgeschwindigkeit als Änderung der Schmierfilmdicke  $\varepsilon'_{krit}$ .

### Theoretische Betrachtung

Um Verlagerungsbahnen eines hydrodynamischen Gleitlagers aus Abbildung 1 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 2 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  $p_{stat}$  über dem Sommerfeldwinkel [7]. 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 beziehen sich lokal auf den Minimalspaltbereich sowie den divergenten Spalt bis  $\varphi = 225^\circ$ .

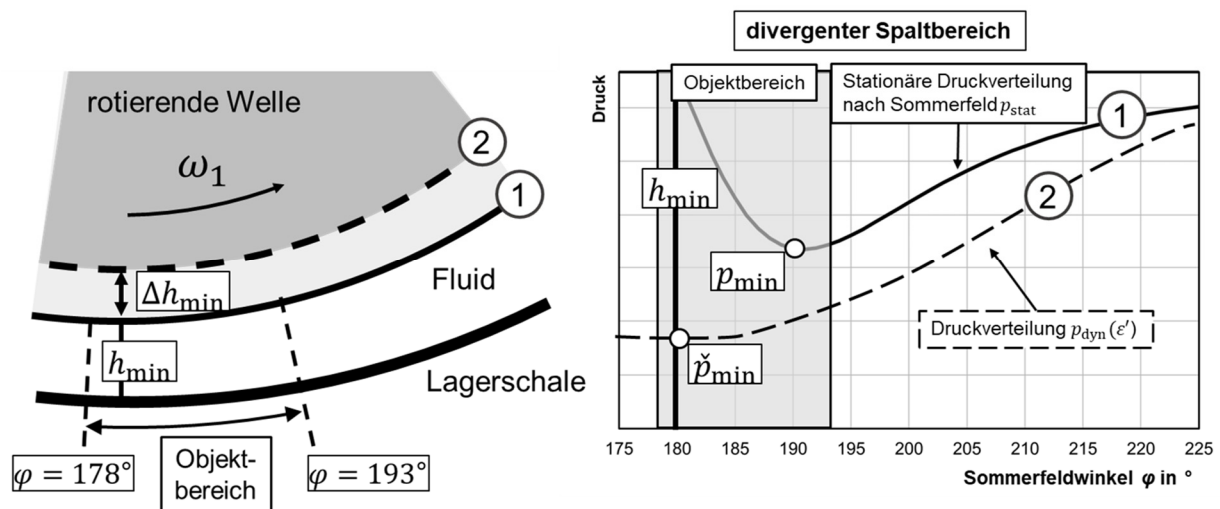


Abbildung 2: Aufbau des Modellexperiments mit Betriebspunkt 1 und 2

Die radiale Verlagerung der Welle  $\Delta h_{min}$  während des Betriebspunkt 2 erzeugt eine dynamische Druckverteilung  $p_{dyn}$  mit einem lokalen Druckminimum  $\check{p}_{min}$  bei  $\varphi = 180^\circ$ . Die

Größe dieses Druckminimums ist im Faktor  $K$  mit den Parametern Schmierfilmdicke sowie Änderung der Schmierfilmdicke begründet. Dieser dynamische Druck wirkt additiv auf die stationäre Druckverteilung des Lagers. Kavitationsblasen bilden 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	$H_{\min}$	0.173 mm
Radius Welle	$R_1$	146.44 mm
Radius Lagerschale	$R_2$	150.06 mm
Relative Spaltweite	$\psi$	2.47%
Winkelgeschwindigkeit	$\omega_1$	12.6 1/s
Reynoldszahl	$Re$	30.7

### Mechanische Übertragung auf ein Modellexperiment

Die Abbildung 3 zeigt den Aufbau des Modellexperiments. Die Welle **1** wird durch die Antriebseinheit **6** drehzahlgesteuert angetrieben. Die Welle rotiert innerhalb der exzentrisch positionieren Lagerschale **2** mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_1$ . Die Lagerschale ist aufgrund der optischen Zugänglichkeit aus transparenten PMMA (Polymethylmethacrylat) gefertigt. Sie ist auf einer Führungsschiene als radiale Traversierung **3** gelagert und wird durch einen Aktuator **5** um den Betrag  $\Delta h_{\min}$  verschoben. Die Anbindung des Aktuators an den Umlenkhebel **4** definiert die maximale Verschiebung der Lagerschale  $\Delta h_{\min}$ . Der Aktuator ist ein Pneumatikzylinder. Die Steuerung des Betriebsdruckes sowie die Regelung der Füllungszeit des Zylinders ermöglichen das Einstellen der Verstellgeschwindigkeit als Änderung der Schmierfilmdicke.

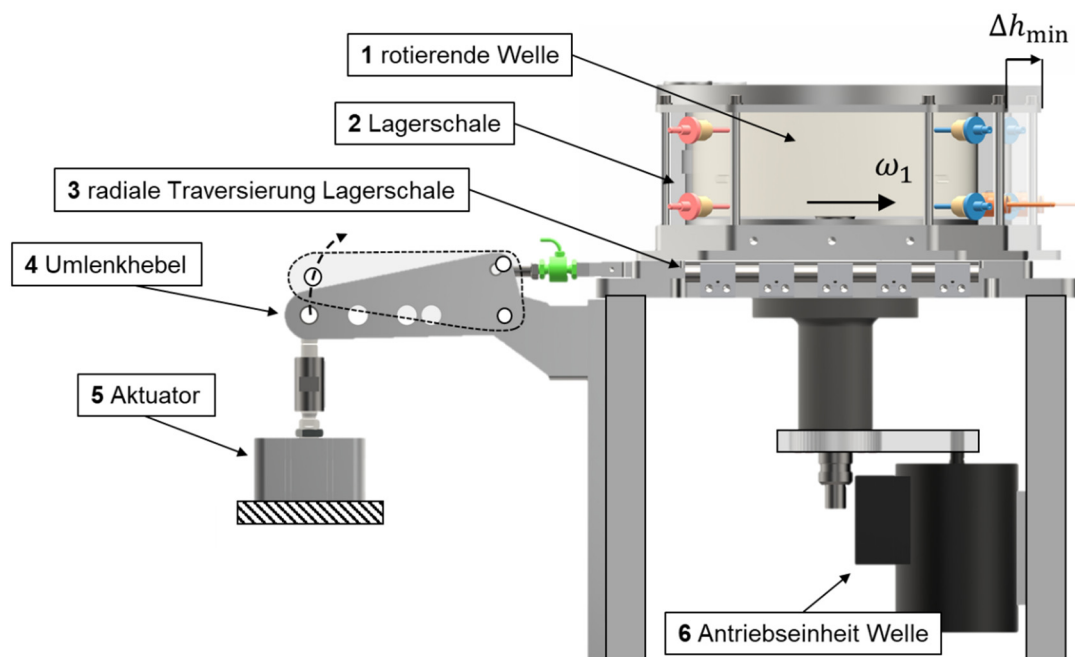


Abbildung 3: Aufbau des Modellexperiments mit radialer Verlagerung der Lagerschale  $\Delta h_{\min}$

Mineralöle, wie sie in Gleitlagern zum Einsatz kommen, lösen im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten eine große Menge an Luft. Osterland et al. [7] untersuchten den Einfluss von gelöster Luft in Hydrauliköl hinsichtlich der Kavitationserosion in Hydraulikpumpen und -ventilen. Hydrauliköl bindet bis zu 10 l Gas pro 100 l Öl. Die Autoren argumentieren anhand ihrer Ergebnisse, dass Gaskavitation die Kavitationserosion reduziert, indem sie die schadigungsrelevante Dampfkavitation dämpft. Im Schmierfilm des Lagers treten die drei Kavitationsformen in der Regel in Verbindung auf. Das verwendete Fluid im Modellexperiment ist reines Paraffin mit einem vollständig gesättigten Luftanteil. Dieser Luftanteil entspricht den realen Fluideigenschaften von Mineralöl im Betrieb von Gleitlagern und prädestiniert sich im Modellexperiment für die Untersuchungen von Gas- und Pseudokavitation. Das Modellfluid ist transparent und chemisch neutral zu den verwendeten Werkstoffen des Modellexperiments.

In Abbildung 4 ist der für den Betriebspunkt relevante Objektbereich aus Abb. 2 von  $\varphi = 178^\circ \dots 193^\circ$  zur Untersuchung des Kavitationsprozesses am Modellexperiment dargestellt. Der Schmierfilm verlagert sich entsprechend der eingezeichneten Verlagerungsbahn „Modellexperiment“ aus Abb. 1. Die verwendete Hochgeschwindigkeitskamera „iXCameras - iSpeed 720“ erzeugt in einer Auflösung von 1680x1242 px bei einer Bildfrequenz von 10 000 Hz am Modellexperiment einen Objektbereich von  $\varphi = 15^\circ \times 50 \text{ mm}$ .

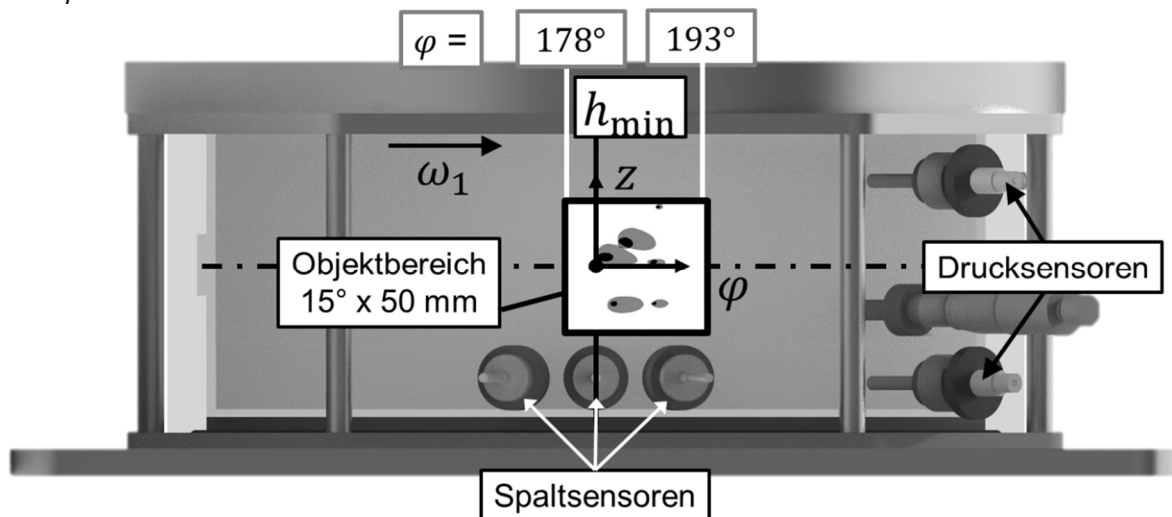


Abbildung 4: Objektbereich am Modellexperiment

Um aus der 2-dimensionalen Bildinformation der Blase die Kavitationsform während des Blasenwachstums und des Blasenschrumpfens abzuleiten sind am Modellexperiment drei Spaltsensoren auf Basis des Wirbelstrommessprinzips sowie zwei Drucksensoren verbaut. Die Spaltsensoren bestimmen die Position der rotierenden Welle in der Lagerschale, sodass im Untersuchungsfenster sowohl die Größe als auch die Lage des Minimalspaltes  $h_{\min}(\varphi_i)$  bekannt ist. Die Drucksensoren sind aufgrund der optischen Zugänglichkeit zum Untersuchungsbereich außerhalb des Objektbereichs positioniert. Eine experimentell validierte Druckmatrix in Abhängigkeit vom Sommerfeldwinkel  $\varphi$  und der Spalthöhe  $z$  ermöglicht den Schluss auf die Größe der Druckabsenkung im Untersuchungsbereich.

Abbildung 5 zeigt das Schema der Binär-Bildausswertung. Während der Spaltänderung durch die Verlagerungsbahn wächst die Blase von Kurbelwinkel  $\phi_i$  zu  $\phi_{i+1}$  und vergrößert ihre Fläche von  $A_i$  zu  $A_{i+1}$ . Die Kamera reglementiert mit ihrer Auflösung im Untersuchungsbereich die kleinstmöglich zu detektierende Blase. Aufgrund der sehr kleinen Spaltweiten hat die Blase bei der Detektion bereits Kontakt an Welle und Lagerschale. Damit wird die zum Massentransfer nutzbare Blasenoberfläche auf die Mantelfläche der Blase reduziert. Der Gastransfer ist damit eingeschränkt. Die Lage der Blase  $\varphi_i, z_i$  bestimmt die Spaltweite  $h_i(\phi_i, \varphi_i)$  in Gleichung (1) sowie die lokale Druckabsenkung  $p_i$ . Bei Pseudo-Kavitation findet kein adiabatischer und isothermer Massenaustausch statt. Ist demnach die Volumenänderung der Blase größer als durch den lokalen Druckgradienten zu erklären, muss Luftmasse aus der Flüssigkeit gelöst worden sein.

$$h_i(\phi_i, \varphi_i) = H_0 \left( 1 + \frac{H_0 - h_{\min}(\phi_i)}{H_0} \cos(\varphi_i) \right) \quad (1)$$

$$V_i(\phi_i, \varphi_i) = A_i(\varphi_i) h_i(\phi_i, \varphi_i) \quad (2)$$

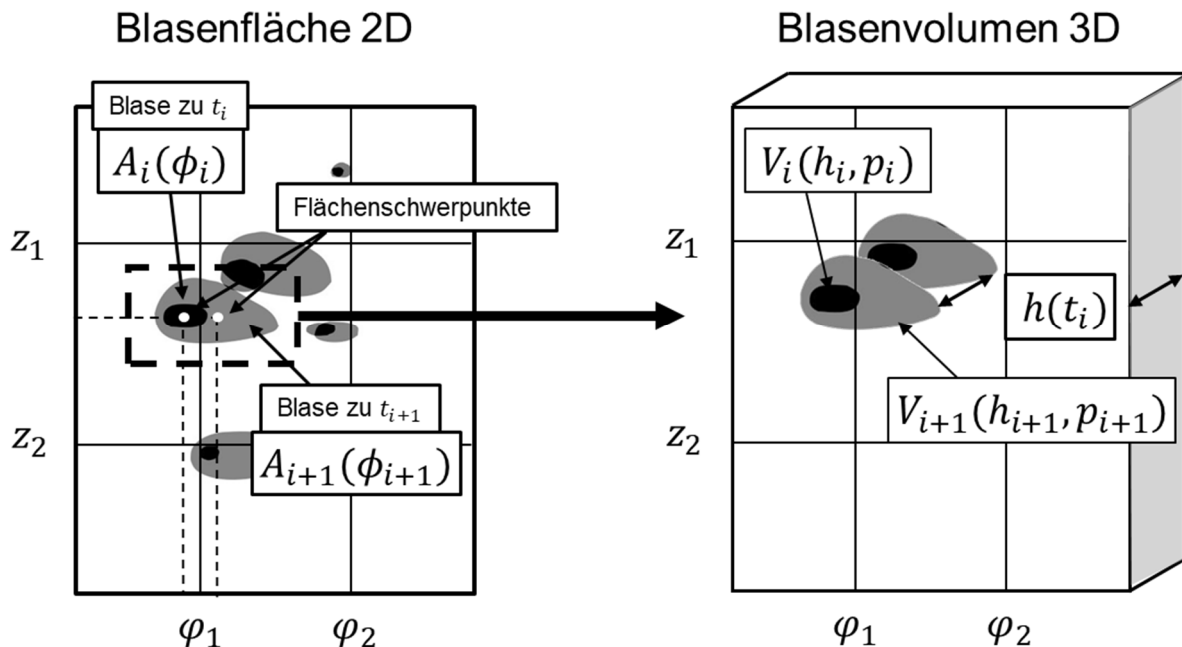


Abbildung 5: Schema der Bildauswertung von einer 2D Blasenfläche zu einem 3D Blasenvolumen

Abbildung 6 zeigt den Verlauf des Blasenvolumens über dem Kurbelwinkel durch die in Abbildung 1 eingetragene Verlagerungsbahn am Modellexperiment. Der Verlauf des Blasenvolumens verhält sich synchron zur Spaltänderung. Während der Phase des Blasenwachstums resultiert das Blasenvolumen aus dem Anteil der Gaskavitation und dem Anteil aus Pseudo-Kavitation. Zu Beginn des Blasenwachstums ist der Anteil an Gaskavitation dominant, da sich die in der Flüssigkeit gelöste Luft nur durch Gaskavitation herauslöst. Es kommt zum Massenaustausch zwischen Flüssigkeits- und Gasphase. Sobald ein Blasenvolumen vorhanden ist, steigt der Anteil an Pseudokavitation bis zum Umkehrpunkt bei von  $\varphi = 186.5^\circ$ .

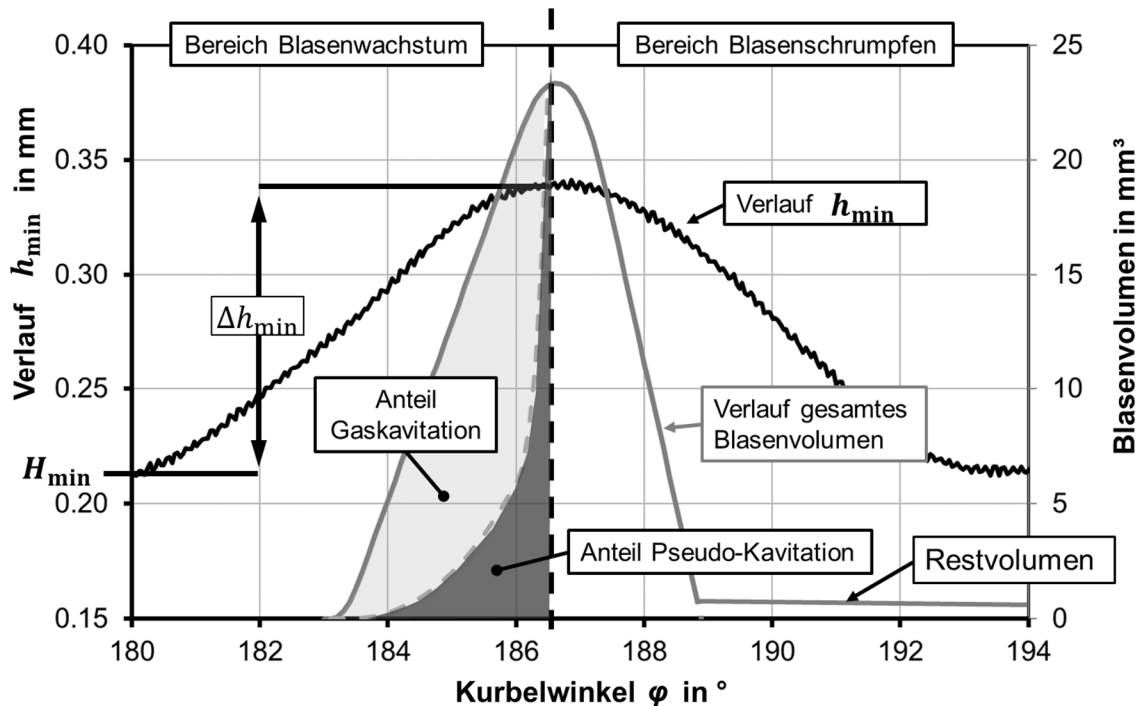


Abbildung 6: Verlauf und Eingliederung Blasenvolumens in die Kavitationsformen durch Spaltweitenänderung  $\Delta h_{\min}$

Der Bereich des Blasenwachstums lässt sich in drei Phasen einteilen: reine Gaskavitation ( $\phi < 184^\circ$ ), Gas- und Pseudo-Kavitation die in Verbindung auftreten ( $\phi = 184^\circ \dots 186.3^\circ$ ) und reine Pseudo-Kavitation ( $\phi > 186.3^\circ$ ).

Im Bereich des Blasenschrumpfens findet kein Massenaustausch statt. Das Restvolumen in diesem Bereich entspricht der ungelösten Luft, die aufgrund von Gaskavitation aus der Flüssigkeit herausgelöst wurde. Darüber hinaus bestätigt die Quellenlage, dass es sich bei dem Schrumpfungsprozess der Blasen ausschließlich um Pseudokavitation handelt und aufgrund der Kürze der Prozesszeit kein Massenstrom auftritt. Die freigesetzte und damit ungelöste Luft sammelt sich somit von Zyklus zu Zyklus an.

## Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt eine Analyse von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen über dem zeitlichen Verlauf der Kavitationsform in einer Schmierspaltströmung mit einem exzentrischen Spalt zwischen einer rotierenden Welle und einer Lagerschale vor. Die Exzentrizität und damit der Schmierspalt wurde mit Hilfe eines Verstellmechanismus an einem Modellexperiment dynamisch variiert, was zu Gaskavitation und Pseudo-Kavitation im Bereich des divergenten Spaltes führte. Die beobachtete Art der Kavitation ähnelte dem für Gleitlager typischen Prozess der Saugkavitation. Es wurde der gesamte Blasenprozess aufgenommen und anhand von Bildauswertung analysiert. In der frühen Phase der Blasenentwicklung dominiert die Gaskavitation. Auf der Grundlage dieser Daten stellten die Autoren fest, dass der Prozess des Blasenwachstums in drei Phasen unterteilt ist: Erstens Gaskavitation, zweitens Gas- und Pseudokavitation und drittens reine Pseudokavitation. Außerdem bestätigen die Daten andere Quellen, wonach es sich bei dem Schrumpfungsprozess der Blasen ausschließlich um Pseudokavitation handelt und aufgrund der Kürze der Prozesszeit kein Massenstrom auftritt. Das freigesetzte Gas sammelt sich somit von Zyklus zu Zyklus an. Künftige Studien werden sich mit der Untersuchung der Dampfkavitation befassen. Daher ist es ein wichtiges Ergebnis nun Bedingungen zu schaffen, die nahezu frei von Gaskavitation sind. Die Quellenlage kommt

übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass Gaskavitation die schadensrelevante Dampfkavitation abschwächt. Das Fluid bedarf daher einer gesonderten Konditionierung des gelösten Luftanteils. Darüber hinaus wird das weiterentwickelte Modellexperiment mit einem Verstellmechanismus zur Spaltänderung die Erforschung von Dampfkavitation ermöglichen. Insbesondere die Entstehung von Blasen ist noch nicht vollständig verstanden, aber im Hinblick auf Materialerosion und der Identifizierung erosionskritischer Zonen ein entscheidender Schritt.

## Dankesworte

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

## Literatur

- [1] Wilson, R.W. Cavitation damage in plane bearings. In *Cavitation and Related Phenomena in Lubrication, Proceedings of the 1st Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Leeds, UK, 14–17 September 1974*; Dowson, D., Godet, M., Taylor, C.M., Eds.; Mechanical Engineering Publications Ltd.: London, UK, 1975; pp.177–184, ISBN 0-85298-324-7.
- [2] 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.
- [3] Reinke, P.; Ahlrichs, J.; Beckmann, T.; Schmidt, M. High-Speed Digital Photography of Gaseous Cavitation in a Narrow Gap Flow. *Fluids* 2022, 7, 159. <https://doi.org/10.3390/fluids7050159>
- [4] 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>.
- [5] Beckmann, T.; Reinke, P.; Schmidt, M. Experimentelle Untersuchung der instationären, dreidimensionalen Flüssigkeitskavitation in der Schmierspaltströmung, 28. Fachtagung Experimentelle Strömungsmechanik pp.25-1 25-8 ISBN:978-3-9816764-7-1, 2021
- [6] 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>.
- [7] A. Sommerfeld "Zur hydrodynamischen Theorie der Schmiermittelreibung", Zeitschrift für Mathematik und Physik, Vol. 40, pp 97 155, 1904