

Entwicklung eines Modellexperiments zur Untersuchung von Saugkavitation in Gleitlagern

Tom Beckmann, Peter Reinke, Marcus Schmidt
Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK),

Schlagworte: Gleitlager, Visualisierung, Kavitation,

Zusammenfassung

Das Vorhersagen von Kavitation in Gleitlagern ist eine der aktuellen Herausforderungen auf dem Gebiet der Fluidodynamik. Hydrodynamische Gleitlager werden aufgrund ihrer geringen Reibung und ihrem minimalen Verschleiß in einer Vielzahl von industriellen Anwendungen eingesetzt. Eine Ursache für mögliche Lagerausfälle ist Saugkavitation. Infolge der transienten Wellenverschiebung baut sich im Schmierpalt eine Saugströmung auf, die mit einem starken Druckgradienten einhergeht. Aufgrund der Dynamik im Schmierpalt kann die Flüssigkeit die durch die Wellenverschiebung verursachte Spaltweitenänderung solange ausgleichen, bis der Fluiddruck den Dampfdruck erreicht. Fällt der Fluiddruck unter den Dampfdruck der Flüssigkeit bildet sich Dampf aus. Diese Kavitationseffekte können im realen Gleitlager aufgrund komplexer Betriebsbedingungen nur schwer analysiert werden. Für diese Untersuchungen wird ein skaliertes Gleitlagermodellexperiment eingesetzt. Um Saugkavitation auf Labormaßstabsebene zu erzeugen, bedarf es der Auswahl eines abgestimmten Betriebspunktes. Dieser Betriebspunkt ergibt sich aus der Interaktion der Kinematik einer Wellenverlagerungsbahn und einem kavitationsfähigen Fluid. Die Autoren dieser Arbeit haben anhand der kavitierenden Taylor-Couette-Strömung den Nachweis erbracht, dass eine Flüssigkeit mit speziellen Kavitationseigenschaften für diesen Betriebspunkt abgestimmt werden kann. Die Flüssigkeit muss drei Kriterien erfüllen: physikalische Kompatibilität, Reynolds-Analogie und Kavitationszahl am Arbeitspunkt. Es gibt bereits erste Untersuchungen in denen Bereiche einer realen Wellenverlagerungsbahn anhand von Exzentrizität und Exzentrizitätsänderung als Kavitationsbereiche charakterisiert werden. Um diese Kavitationsbereiche im skalierten Modell zu analysieren wird ein bereits bestehendes Gleitlagermodellexperiment um eine radiale Verlagerung der Welle erweitert. Beim Übertragen der Kavitationsbereiche einer Wellenverlagerungsbahn von Theorie auf Experiment bestehen konstruktive Grenzen, welche näher erläutert werden. Die Arbeit präsentiert einen experimentellen Ansatz zur Untersuchung von Saugkavitation in einem skalierten Gleitlagermodell. Darüber hinaus werden mechanische und fluiddynamische Ähnlichkeitsgesetze beschrieben, die die Übertragung von Betriebsbedingungen im Lager auf einen Labormaßstab ermöglichen.

Einleitung

Die kompakte Bauform und der nahezu verschleißfreie Betrieb prädestinieren hydrodynamische Gleitlager für die Anwendung in einer Vielzahl von Verbrennungsmotoren. Jedoch kann es unter bestimmten Betriebsbedingungen zur Schädigung des Lagers durch Kavitation kommen. Gläser [1] unterscheidet dabei vier verschiedene Kavitationsarten. Darunter stellt die Saugkavitation eine mögliche Ausfallursache des Lagers dar. Das Phänomen der Saugkavitation entsteht durch eine schnelle Verlagerung der rotierenden Welle gegenüber der feststehenden Lagerschale. Die für Verbrennungsmotoren typische, zeitlich veränderliche Belastung des Kurbeltriebs führt zu einer transienten Wellenverlagerung, die eine Vergrößerung der Spaltweite in der Umgebung des Minimalspalts erzwingt. Unterschreitet dabei der im Schmierfilm entstehende Saugdruck den Dampfdruck der Schmierflüssigkeit erfolgt ein Phasenwechsel von Flüssigkeit zu Dampf. Steigt der lokale Druck wieder an, kommt es zur Implosion der Dampfblasen. In der Nähe der Lagerschale führen diese Implosionen zu einer Belastung des Lagermaterials und nachfolgend zu einer Materialermüdung bis hin zur Materialerosion. Die phänomenologischen Untersuchungen von Garner et al. [2] und Engel [3] an realen Gleitlagern zeigen Schadensbilder mit zungenförmigen Auswaschungen und Materialabtrag auf der Gleitlagerschale. Numerische Arbeiten zu Saugkavitation in Gleitlagern wurden von Schmidt et al. [4] vorgestellt. Die Untersuchungen zeigen eine dreidimensionale Verteilung der entstehenden Dampfstrukturen in Abhängigkeit der Verlagerungsbedingungen.

Motivation zur Entwicklung eines Modellexperiments für Gleitlager

In zahlreichen Fachbeiträgen [1], [2], [3] wird auf Lagerschäden am Kurbeltrieb von Verbrennungsmotoren in Folge von Kavitation hingewiesen. Die in diesen Arbeiten beschriebenen Beispiele basieren auf experimentellen Untersuchungen am Gleitlagerprüfstand oder auf der Auswertung von Lagerschäden im Motorbetrieb. Insbesondere letztere erfordern einen hohen Zeit- und Ressourceneinsatz. Um den Konstrukteur bei der anwendungsorientierten Auslegung zu unterstützen, wurden rechnergestützte Simulationstechniken entwickelt, die die Schmierpaltströmung mit einem zweidimensionalen Ansatz beschreiben. Solche Simulationstechniken stellen Braun and Hannon [5] und Bonneau et al. [6] ausführlich dar. Eigene Forschungsarbeiten [7] und [8] legen aber Belege vor, dass die Kavitation in der Schmierpaltströmung von transienter und dreidimensionaler Natur ist. Die eigenen numerischen Ansätze wurden bereits mit hochaufgelösten Messdaten in einphasigen Strömungen validiert und qualitativ mit Analogieexperimenten [9] belegt. Weiterhin wurden Berechnungsergebnisse dieses numerischen Ansatzes anhand der transienten, kavitierenden Taylor-Couette-Strömung bestätigt [10]. Für eine vollständige Validierung der transienten, dreidimensionalen Simulationen steht eine quantitative Untersuchung von kavitierenden Strömungen in Gleitlager ähnlichen Spaltgeometrien noch aus. Dafür soll ein Modellexperiment entwickelt werden, welches die Schmierpaltströmung nach Ähnlichkeitsgesetzen nachbildet und dabei die Besonderheiten einbezieht, welche die Saugkavitation in Kurbelwellenlagern auszeichnet. Letztlich wird es somit möglich, den transienten, dreidimensionalen Prozess der Kavitation im Schmierpalt besser zu verstehen und zweidimensionale Auslegungswerkzeuge zu verfeinern.

Theoretische Betrachtung der Gleitlagerströmung

In Abb. 1 ist der schematische Aufbau eines Gleitlagers und eine analytisch berechnete, stationäre Druckverteilung über dem Umfangswinkel φ im Schmierpalt nach Sommerfeld [11] dargestellt. Das Gleitlager besteht aus einer Lagerschale mit dem Radius R_2 und einer exzentrisch zur Lagerschale positionierten Welle mit dem Radius R_1 . Der Spalt zwischen Lagerschale und Welle ist mit Flüssigkeit gefüllt. Die Welle rotiert mit einer Winkelgeschwindigkeit ω_1 und erzeugt einen hydrodynamischen Druckaufbau im konvergenten Spaltbereich und eine Druckabsenkung im divergenten Spaltbereich. Die Kenngrößen und die zugehörigen Gleichungen sind in Tab. 1 aufgeführt.

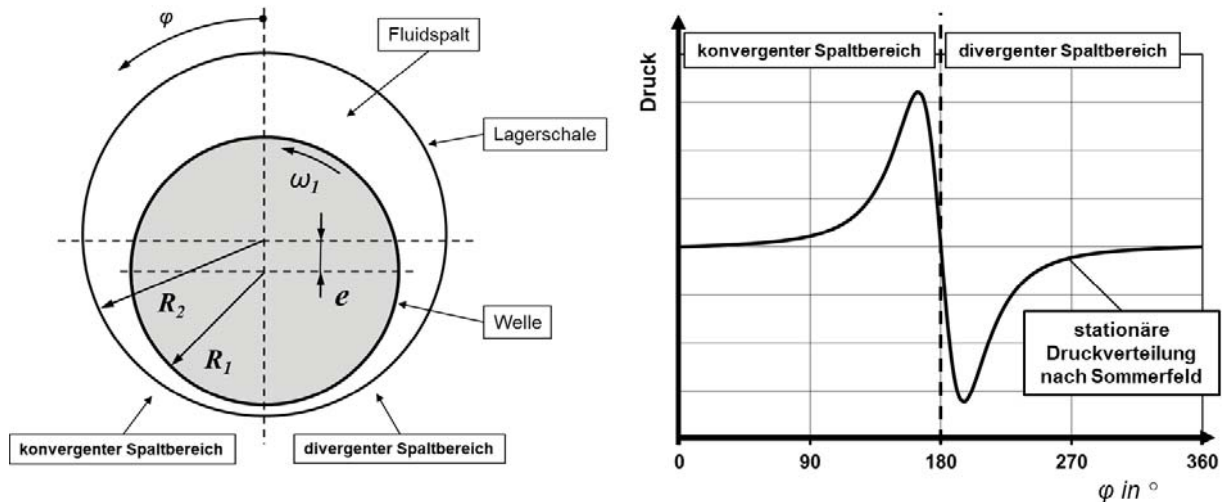


Abb. 1: schematischer Aufbau eines Gleitlagers und stationäre Druckteilung nach Sommerfeld [11] im Schmierpalt

Tabelle 1: Kenngrößen

Spaltweite H_0	$H_0 = R_2 - R_1$	relative Spaltweite ψ	$\psi = \frac{H_0}{R_1}$
relative Exzentrizität ε	$\varepsilon = \frac{e}{H_0}$	Minimalspalt H_{min}	$H_{min} = H_0(1 - \varepsilon)$
Änderung der Exzentrizität ε'	$\varepsilon' = \frac{d\varepsilon}{d\varphi}$	Reynoldszahl Re	$Re = \frac{\rho\omega_1 R_1^2}{\mu} \psi$

Abb. 2. veranschaulicht den Prozessablauf der Saugkavitation. Der Kavitationsprozess ist durch einen Phasenwechsel zwischen flüssiger und gasförmiger Phase gekennzeichnet. Die Ausgangslage wird durch die stationäre Druckverteilung bestimmt, die durch die Rotation und die exzentrische Lage der Welle beschrieben wird. Weiterhin wird angenommen, dass der Schmierpalt vollständig mit Flüssigkeit gefüllt ist und von den Rändern ausreichend viel nachströmen kann. Der lokale stationäre Druck im Schmierpalt sei $p_{stationär}$ (Betriebspunkt 1). Infolge der transienten, radialen Wellenverlagerung und der damit erzwungenen Vergrößerung des Minimalspalts H_{min} entsteht im Schmierpalt die transiente

Druckverteilung (Betriebspunkt 2) und es baut sich ein Saugdruck p_{saug} auf. Die Kavitation setzt ein, da die Schmierflüssigkeit die Volumenänderung aufgrund der Wellenverlagerung nur soweit ausgleichen kann, bis der Dampfdruck p_{Dampf} erreicht wird.

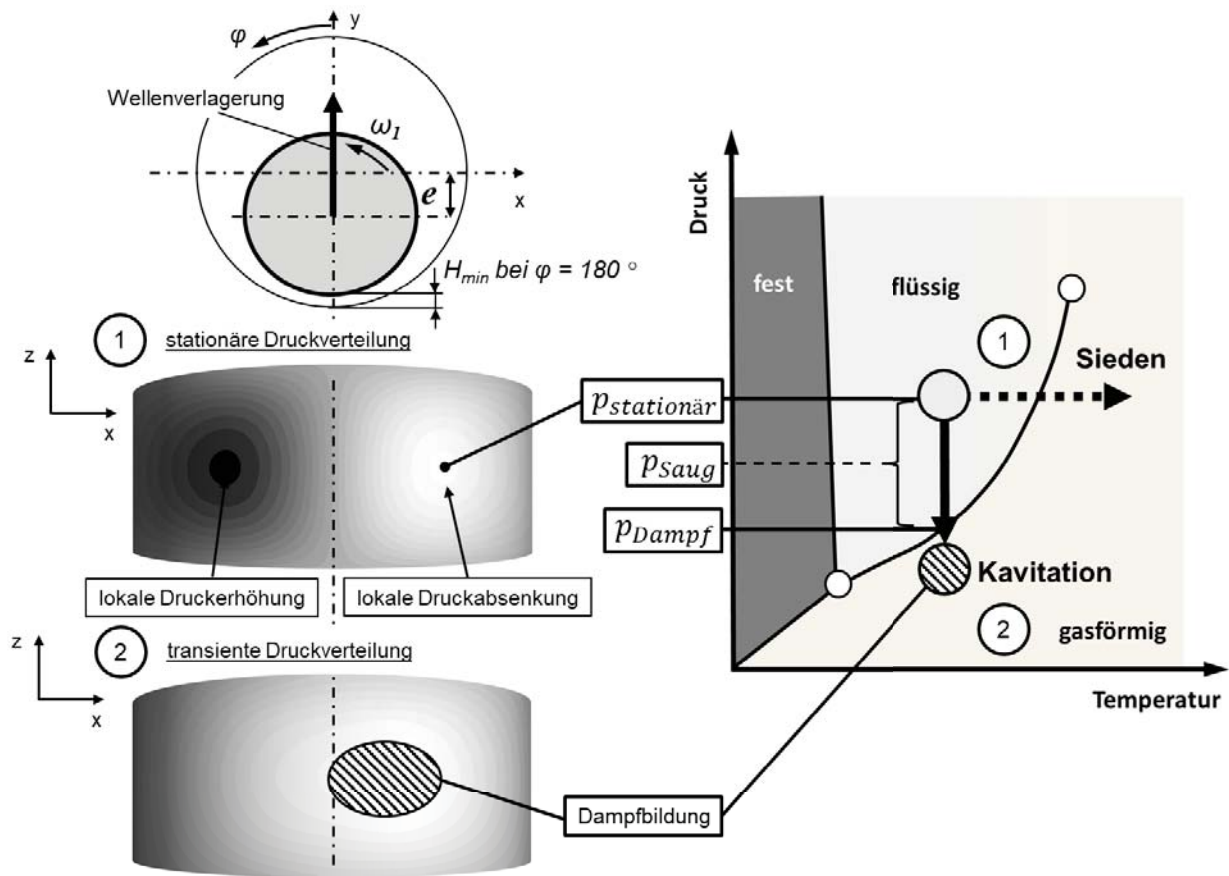


Abb. 2: schematischer Prozessablauf der Saugkavitation im Gleitlager

Übertragung der Gleitlagerströmung auf ein Modellexperiment

In einem Verbrennungsmotor kommt es während eines Lastspiels zu instationären Belastungen der Kurbelwelle. Dadurch durchfährt die Kurbelwelle eine Verlagerungsbahn, die in jedem Kurbelwellenlager einzeln beobachtet werden kann. Dies führt zu einer transienten Änderung der Exzentrizität im Gleitlager. Für das Beispiel eines Kurbelwellenhauptlagers präsentiert Gläser [12] die in Abb.3 dargestellte Verlagerungsbahn. Für die in dieser Arbeit diskutierte Saugkavitation können zwei Bereiche durch einen von Reinke et al. [13] vorgeschlagenen Ansatz identifiziert werden. In dem Ansatz wird die lokale, zeitabhängige relative Exzentrizität ε mit der dazu korrespondierenden Änderung der Exzentrizität ε' über dem Kurbelwinkel φ betrachtet. Daraus ergibt sich ein kinematischer Faktor K , der durch die Gleichung (1) definiert ist.

$$K(\varepsilon) = \frac{\varepsilon'}{(1 - \varepsilon)^3} \quad (1)$$

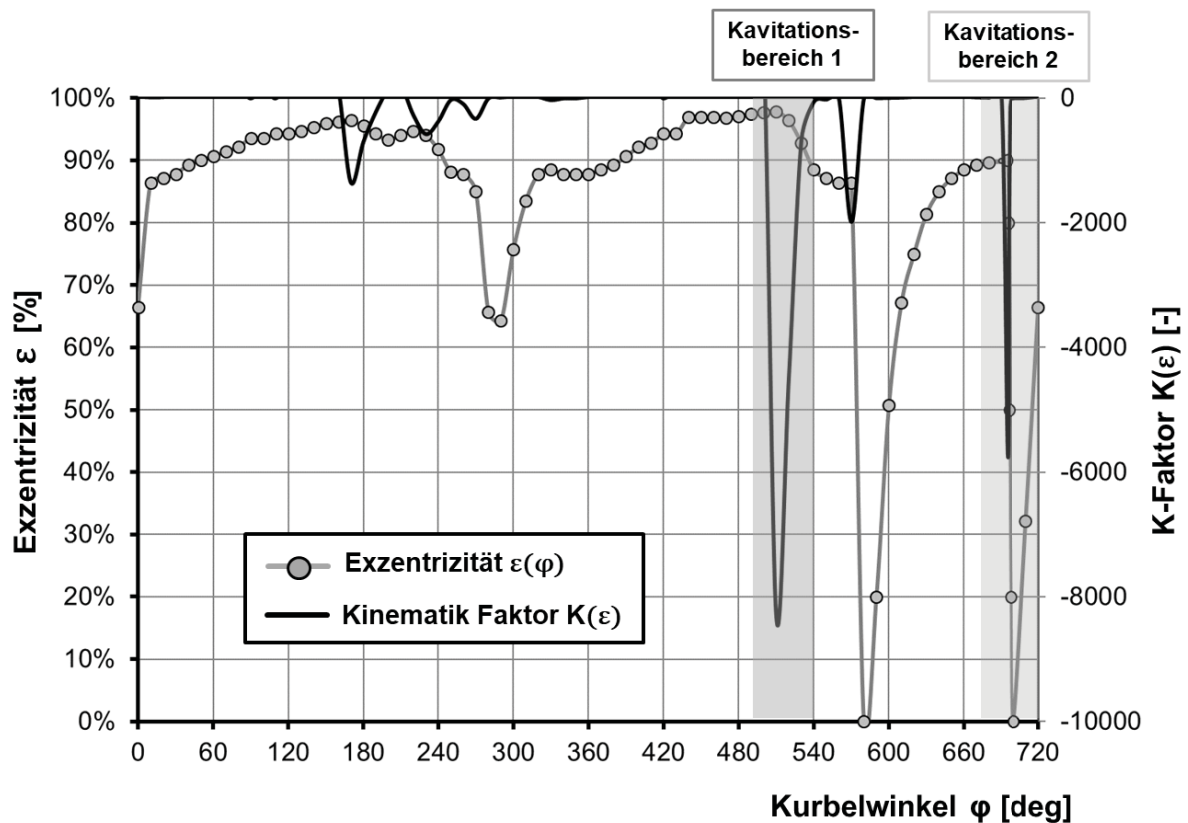


Abb. 3: Exzentrität ε und K-Faktor $K(\varepsilon)$ über dem Kurbelwinkel φ

Für die Saugkavitation sind nur die negativen Werte von K relevant, da sie einer Vergrößerung der Spaltweite in der Umgebung von H_{min} entsprechen. Mit der kinematischen Analyse der Verlagerungsbahn werden kavitationskritische Bereiche identifiziert. Damit wird eine Ähnlichkeitsskalierung mithilfe des kinematischer Faktors K von einem realen Gleitlager auf ein Modellexperiment möglich.

Im Diagramm in Abb. 4 ist die Änderung der Exzentrität ε' über dem Kurbelwinkel gegenüber der relativen Exzentrität ε aufgetragen. Weiterhin sind Kurven mit konstanten kinematischen Faktor $K(\varepsilon) = -1000$ und $K(\varepsilon) = -8000$ dargestellt. Darüber hinaus wurden beide Kavitationsbereiche aus dem Diagramm in Abb. 3 übertragen. Es ist zu erkennen, dass mit größerer relativer Exzentrität, die benötigte Verlagerungsgeschwindigkeit für das Erreichen eines bestimmten kinematischen-Faktors geringer wird. Für die Übertragung auf ein Modellexperiment lassen sich mechanische Grenzen definieren. Aufgrund von Fertigungstoleranzen und der Dynamik der Verstell-Mechanik ergeben sich konstruktive Grenzen für die relative Exzentrität von $\varepsilon = 95\%$ und für die Exzentritätsänderung von $\varepsilon' = 10 \text{ 1/rad}$.

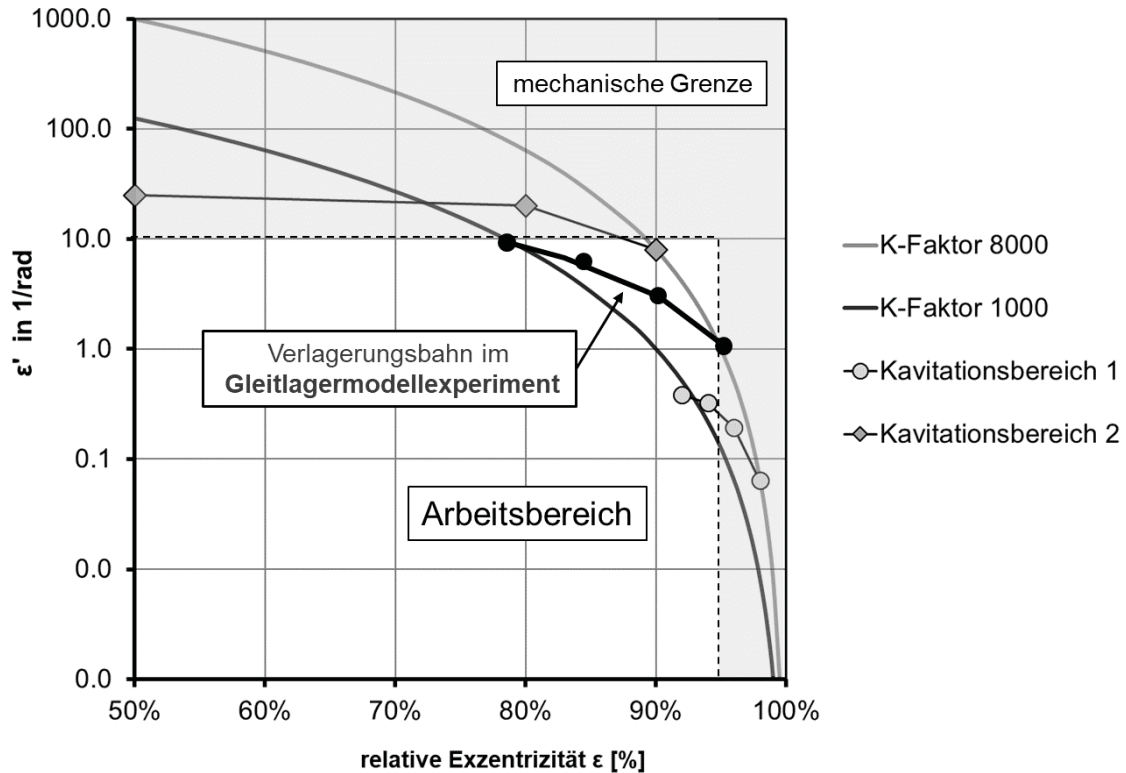


Abb. 4: Exzentrizitätsänderung ϵ' über der relativen Exzentrizität ϵ

Reinke et al. [13] entwickelte einen Ansatz in Gl. (2) zur Skalierung des Druckverhältnisses zwischen einem realen Gleitlager O mit einem Modellexperiment M . Dieses Druckverhältnis resultiert aus der Skalierung folgender Quotienten: relative Spaltweiten Ψ und Lagerabmessungen R_1 zur geometrische Skalierung, Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten T zur Zeitskalierung und dem kinematischen-Faktor $K(\epsilon)$ zur Skalierung der Wellenverlagerung. Über das Druckverhältnis lassen sich so mit Gl. (4) die Anforderungen an Dampfdruck p_{Dampf} und Saugdruck p_{Saug} für das verwendete Fluid im Modellexperiment ermitteln.

$$\frac{^M \Delta p}{^O \Delta p} = \frac{^O \Psi}{^M \Psi} \frac{^M R_1^2}{^O R_1^2} \frac{^O T^2}{^M T^2} \frac{^M K(\epsilon)}{^O K(\epsilon)} \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{\omega_1} \quad (3)$$

$$\Delta p = p_{Dampf} - p_{Saug} \quad (4)$$

Für die qualitative und quantitative Untersuchung von Kavitation muss die Kombination aus geometrischen und physikalischen Bedingungen gegeben sein. Der Ansatz in Gl. (2) wird auf die Entwicklung eines Gleitlagermodellexperiments (GME) zur Untersuchung von Saugkavitation angewendet. Dies erfordert ein skaliertes Modellexperiment in Verbindung mit einem kavitationsfähigen Fluid. Dafür wird ein bereits bestehendes GME zusammen mit dem Fluid nach dem in Abb. 5 dargestellten Schema weiterentwickelt. Die Gültigkeit dieser Vorgehensweise haben die Autoren anhand der kavitierenden Taylor-Couette Strömung [10] bereits nachgewiesen.

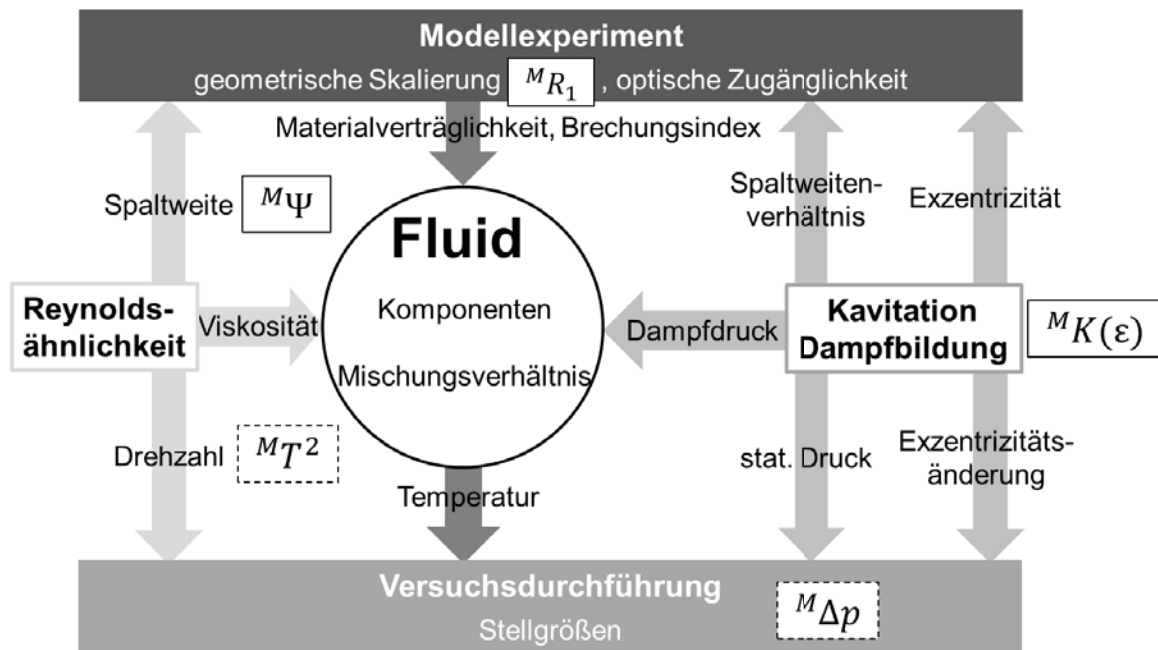


Abb. 5: Parameter zur Entwicklung eines kavitierenden Fluids für die Untersuchung von Saugkavitation im Schmierspalt eines Radialgleitlagers [13]

Das verwendete GME ist aus Acrylglas (PMMA) gefertigt und bietet somit eine optische Zugänglichkeit. Die geometrische Skalierung legt die Hauptabmessungen mit dem Radius $M_{R_1}^2$ und damit verbunden die relative Spaltweite M_{Ψ} fest. Die Fluidmischung basiert auf Alkanen, da diese eine chemische Verträglichkeit zum verwendeten Acrylglas aufweisen. Die radiale Wellenverlagerung wird im GME durch den kinematischen Faktor skaliert. Dabei müssen die vorhandenen konstruktiven Grenzen bei der Umsetzung eines kinematischen Faktors von $K(\varepsilon) = -8000$ berücksichtigt werden. Anhand der Viskosität wird die Reynoldsähnlichkeit eingestellt und gleichzeitig die Zeitskalierung M_{T^2} festgelegt. Das verwendete Fluid besteht aus einem Trägerfluid (Paraffin) und einem Lösungsmittel (Pentan). Es gibt einen direkten Zusammenhang zwischen Viskosität und Dampfdruck. Bei steigendem Anteil an Paraffin steigt die Viskosität an und der Dampfdruck fällt ab.

Tabelle 2: Vergleich der Lagerdaten eines realen Gleitlagers [12] mit dem Modellexperiment

Lagerdaten	Motoren-gleitlager ^o	Model-Experiment ^M	Verhältniswert
Ψ [–]	0.001029	0.0246	0.0418
R_1 [mm]	79.5	146.4	3.39
ω [1/s]	157	25.1	0.0256
Re [–]	38	133	3.50
$K(\varepsilon)$ [–]	-8000	-8000	1.0

Für die Skalierung des Modellperiments zum realen Gleitlager werden die Lagerdaten aus Tab. 2 verwendet. Aufgrund der angeführten Vorgaben an das bestehende GME beschränkt sich die Parametrierbarkeit des Experiments auf die Zeitskalierung M_{T^2} . Weiterhin wird ein

Druckverhältnis von Modellexperiment und realem Gleitlager von 1/100 angestrebt. Um dies zu erreichen, muss das Experiment bei einer höheren Drehzahl gefahren werden. Daraus resultiert eine Abweichung der Reynoldszahl von 38 auf 133, welche vertretbar ist, da die Strömungsform in Form der laminaren Couette-Strömung erhalten bleibt. Das angestrebte Druckverhältnis stellt sicher, dass die stationäre Druckverteilung im Schmierfilm am Betriebspunkt erreicht wird und durch die aufgeprägte transiente Wellenverlagerung eine dynamische Druckabsenkung entsteht, die zu einer lokalen Unterschreitung des Dampfdruckes und zur Kavitation führt.

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt einen Ansatz für ein Modellexperiment vor, welches die Schmierpaltströmung nach Ähnlichkeitsgesetzen nachbildet und dabei die Besonderheiten einbezieht, welche die Saugkavitation in Kurbelwellenlagern auszeichnet. An diesem Modellexperiment mit Gleitlager ähnlichen Spaltgeometrien können hochauflösend Strömungsdaten in kavitierenden Strömungen gemessen werden, um damit transiente, dreidimensionale Simulationsberechnungen quantitativ zu validieren. Die Kombination von numerischen und experimentellen Untersuchungen macht es möglich, den transienten, dreidimensionalen Prozess der Kavitation im Schmierpalt besser zu verstehen und zweidimensionale Berechnungsansätze zu verfeinern. Daraus entstehen schließlich Werkzeuge, die den Konstrukteur befähigen, Gleitlager sicherer gegenüber Kavitation auszulegen und somit den Betrieb von Verbrennungsmotoren zuverlässiger zu machen.

Literatur

- [1] **H. Gläser, 1990:** Schäden an Gleit- und Wälzlagerungen, Verlag Technik GmbH, Berlin.
- [2] **Garner D. R., James R. D., Warriner J. F., 1980:** "Cavitation erosion damage in engine bearings: Theory and Practice", Journal of Engineering for Power, Vol. 102, pp. 847-85
- [3] **Engel, U., 1992:** "Schäden an Gleitlagern in Kolbenmaschinen.", in Bartz W. (Hrsg.): Schäden an geschmierten Maschinenelementen, 2.Auflage, Expert-Verlag
- [4] **Schmidt, M, Reinke, P., Beckmann, T., 2019:** „Numerical simulation of suction cavitation in hydrodynamic journal bearings“ 90th Annual Meeting, February 18-22, 2019 - International Association of Applied Mathematics and Mechanics GAMM e.V., selected for publication in PAMM
- [5] **M. J. Braun, W. M. Hannon, 2010:** Cavitation formation and modeling for fluid film bearings - A review. Journal of Engineering Tribology, Vol. 224, pp. 838-863
- [6] **Bonneau, D., A. Fatu, D. Souchet, 2014:** Thermo-hydrodynamic lubrication in hydrodynamic bearings. Wiley, Hoboken, London
- [7] **Ch. Egbers, P. Gorenz, M. Schmidt, C. Wolf, 2015:** 3-D-CFD-Simulation der Schmierpaltströmung in einem Radialgleitlager. MTZ-Motortechnische Zeitschrift, Ausgabe 07-08/2015 ISSN: 2192-8843
- [8] **P. Reinke, M. Schmidt, 2014:** Lokale, hochauflösende 3D-CFD-Simulation der Schmierpaltströmung in einem instationär belasteten Radialgleitlager. Abschlussbericht Vorhaben Nr. 1154, FVV e.V. Heft 1073
- [9] **M. Nobis, 2017:** Experimentelle Untersuchung der Spaltströmung in einem Modell eines Kurbelwellenhauptlagers. Dissertation BTU Cottbus-Senftenberg, ISBN 978-3-8440-5706-5
- [10] **P. Reinke, M. Schmidt, T. Beckmann, 2018:** The Cavitating Taylor-Couette Flow. Physics of Fluids, Vol.30(10), DOI: 10.1063/1.5049743,
- [11] **Sommerfeld, A., 1904:** "Zur hydrodynamischen Theorie der Schmiermittelreibung", Zeitschrift für Mathematik und Physik, Vol. 40, pp 97-155, 1904
- [12] **Gläser, H., 1974:** "Ein Beitrag zur Berechnung und Konstruktion dynamisch beanspruchter Radialgleitlager unter Berücksichtigung des maximalen Schmierfilmdruckes", Dissertation B, Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt
- [13] **P. Reinke, M.Schmidt, T.Beckmann, 2019:** Advanced Model Experiment for the Research of Journal Bearings with Cavitation, JSAE 20199276, 2019