Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik"

7. – 9. September 2021, Bremen

Experimentelle Untersuchung der instationären, dreidimensionalen Flüssigkeitskavitation in der Schmierspaltströmung

Tom Beckmann, Marcus Schmidt, Jan Ahlrichs, Peter Reinke

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

Schlagworte: Gleitlager, Visualisierung, Kavitation,

Zusammenfassung

Kavitation im Schmierfilm eines hydrodynamischen Gleitlagers kann in Verbindung mit Materialerosion zum Ausfall eines Lagers führen. Um die Betriebssicherheit von hydrodynamischen Gleitlagern zu verbessern, ist ein genaues Verständnis über die Betriebsparameter nötig, welche Kavitation in Form von Dampf im Schmieröl fördern. Am Beispiel der Arbeit von Graf und Kollmann [1], die eine sehr detaillierte Analyse von Lagerbelastung und Wellenverlagerungsbahn vorgelegt haben, kann gezeigt werden, dass die kavitationsgefährdeten Bereiche im Viertaktzyklus eines Dieselmotors durch hohe Exzentrizität und eine hohe Änderungsgeschwindigkeit der Schmierfilmdicke gekennzeichnet sind. Diese Bereiche sind in Abb. 1a eingetragen.



In einer aktuellen Arbeit [2] haben die Autoren diesen Ansatz weiterentwickelt und die Parameter Exzentrizität ε und Schmierfilmdickenänderung ε' in einen Faktor K zusammengefasst, der die Kinematik der Wellenverlagerung im Hinblick auf Kavitationsgefahr beschreibt und der eine mechanisch-ähnliche Übertragung auf ein Modellexperiment ermöglicht. Die Daten der Verlagerungsbahnen (Abb. 1a) in den von Graf und Kollmann identifizierten Kavitationszonen 1 - 4 haben die Autoren in das Kavitationsrisikodiagramm in Abb. 1b übertragen.

Die Autoren stellen die Hypothese auf, dass ein Bereich mit relevantem Schadensrisiko existiert, der räumlich von einer kritischen Exzentrizität und der damit einhergehenden geringen Spaltweite begrenzt ist. Zeitlich ist der Schadensrisiko-Bereich von einer Schmierfilmdickenänderung begrenzt, oberhalb der die Entwicklungszeit zu kurz ist, um Kavitation zu begünstigen. Weiterhin muss ein minimaler Faktor K erreicht werden, um die kritische Kavitationszahl zu unterschreiten.

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

Einleitung und Motivation

Einschlägige Fachbeiträge, bspw. Gläser [3, S.123ff], Garner und James [4, S.45ff], Engel [5, S.678ff] beschreiben die von Kavitation verursachten Lagerschäden am Kurbeltrieb von Verbrennungsmotoren. Von gesellschaftlicher Relevanz ist der Dieselmotor als Antriebsaggregat für die maritime Transportwirtschaft, die einen wichtigen Beitrag am globalen Warentransport leistet. Dieselmotoren sind eine wichtige Brückentechnologie, mit der die aktuellen umweltpolitischen Herausforderungen bewältigt werden können. Um die notwendige Abgasreinigung sowie die Verwendung alternativer Kraftstoffe und niedrig-viskoser Öle zu ermöglichen, müssen die Betriebsgrenzen der Motoren verschoben werden, woraus höhere Bauteilbelastungen resultieren, die im Falle der Motorlager in Form von Kavitation auftreten können. Ein besseres Verständnis der kavitationsfördernden Parameter soll dem Konstrukteur bei der anwendungsorientierten Auslegung von Motorlagern helfen, die Performanceziele zu erreichen. Derzeit entspricht es dem Stand der Technik Kavitationsschäden an Gleitlagern phänomenologisch zu untersuchen. Anhand der einschlägigen Literatur [3] werden die Schadensbilder befunden, kategorisiert und empirisch belegte Abhilfemaßnahmen ergriffen. Die Wirkung der Abhilfemaßnahmen wird mit 2D-Berechnungswerkzeugen überprüft, in dem man sogenannte Kavitationsindikatoren bewertet. Eine fundierte Validierung der transienten, dreidimensionalen Simulationen steht dafür noch aus. Ein Modellexperiment, welches die Schmierspaltströmung nach Ähnlichkeitsgesetzen nachbildet, dient der guantitativen Untersuchung von kavitierenden Strömungen in Gleitlager ähnlichen Spaltgeometrien.

Theoretische Betrachtung

Abb. 2 zeigt den schematischen Aufbau eines hydrodynamischen Gleitlagers und die analytisch berechnete, stationäre Druckverteilung über dem Sommerfeldwinkel φ im Schmierspalt nach Sommerfeld [6]. Das Gleitlager besteht aus einer Lagerschale mit dem Radius R_2 und einer exzentrisch zur Lagerschale positionierten Welle mit dem Radius R_1 . Der geometrische Schmierspalt zwischen Lagerschale und Welle ist mit Flüssigkeit (kin. Viskosität v) gefüllt. Die Welle rotiert mit einer Winkelgeschwindigkeit ω_1 und erzeugt damit hydrodynamisch eine stationäre Druckverteilung mit einem Druckmaximum p_{max} im konvergenten Spaltbereich und ein Druckminimum p_{min} im divergenten Spaltbereich. Die Kenngrößen und die zugehörigen Gleichungen sind in Tab. 1 aufgeführt.



Abb. 2: schematischer Aufbau eines Gleitlagers und stationäre Druckteilung nach Sommerfeld [6] im Schmierspalt

Spaltweite H_0	$H_0 = R_2 - R_1$	relative Spaltweite Ψ	$\Psi = \frac{H_0}{R_1}$
relative Exzentrizität <i>ɛ</i>	$\varepsilon = \frac{e}{H_0}$	Minimalspalt H _{min}	$H_{min} = H_0(1 - \varepsilon)$
Änderung der Exzentrizität ε'	$arepsilon' = rac{darepsilon}{darphi}$	Reynoldszahl Re	$Re = \frac{\omega_1 R_1^2}{\nu} \Psi$
Kurbelwinkel	ϕ	Winkelgeschwindigkeit	$\omega_1 = \frac{d\phi}{dt}$

Es kann unter bestimmten Betriebsbedingungen zur Schädigung des Gleitlagers durch Kavitation kommen. Der Begriff Kavitation ist in seiner Verwendung sehr vielschichtig und wird im Folgenden auf die Anwendung im hydrodynamischen Gleitlager eingeordnet. Borbe [7] unterscheidet und präzisiert zwischen *Flüssigkeitskavitation*, d. h. Dampfblasen im Fluid und *Werkstoffkavitation* an der Lagerschale, d. h. Hohlraumbildung durch Materialabtrag. Dabei verursachen die Dampfblasen Implosionen, die den Lagerwerkstoff belasten, was schließlich Erosion zur Folge haben kann. Der Begriff Kavitationsschaden bezieht sich auf die Werkstoffkavitation, während sich Kavitation auf die Flüssigkeitskavitation bezieht und dabei zusammenfassend den Vorgang von der Dampfentstehung über Blasenwachstum und -transport bis zur Implosion umfasst. Braun und Hannon [8] untersuchen Kavitation in hydrodynamischen Gleitlagern mit einem thermodynamischen Ansatz und leiten daraus drei Erscheinungsformen ab: Pseudo-, Gas- und Dampfkavitation, wobei nur die Dampfkavitation zu Erosionsschäden führt. Sie verweisen auf Experimente, welche aufzeigen, dass sowohl gasförmige als auch dampfförmige Kavitation in Lagern separat oder in Verbindung miteinander auftritt.



Abb. 3: Darstellung der Erscheinungsformen von Kavitation nach Mahle [9]

In Abbildung 3 sind die drei Erscheinungsformen nach Mahle [9] für Schmieröle dargestellt. Braun und Hannon [8] stellen fest, dass Dampfkavitation gegenüber Gaskavitation deutlich schneller abläuft und daher die Ursache für Kavitationsschäden ist. Dampfkavitation tritt im Gegensatz zu Pseudo- und Gaskavitation nur infolge schneller Druckabsenkung unterhalb des Dampfdruckes des Schmieröls auf. Für Dampfkavitation eines Schmieröls berechnen Sun und Brewe [10] die charakteristische Zeit für eine Dampfblase [Durchmesser 10mm] von 0.167 ms.

Eine von vier Kavitationsarten nach Gläser [3] ist Saugkavitation. Saugkavitation ist eine mögliche Ausfallursache des Gleitlagers und 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 Schmierfilmdicke in der Umgebung des Minimalspalts erzwingt. Unterschreitet dabei der im Schmierfilm entstehende Saugdruck den Dampfdruck der Schmierflüssigkeit innerhalb einer charakteristischen Zeit, erfolgt der für Dampfkavitation entscheidende Phasenwechsel von Flüssigkeit zu Dampf.

Übertagung auf das Modellexperiment

In Abbildung 4 sind kavitationsgefährdete Bereiche der Wellenverlagerungsbahn aus [1] dargestellt. Diese sind gekennzeichnet durch hohe Exzentrizität und eine hohe Änderungsgeschwindigkeit der Schmierfilmdicke. Es resultiert der eingezeichnete Bereich mit Schadensrisiko, der räumlich von einer kritischen Exzentrizität und einer geringen Spaltweite begrenzt ist. Zeitlich ist dieser Bereich von einer Schmierfilmdickenänderung begrenzt, oberhalb der die Entwicklungszeit zu kurz ist, um Kavitation zu begünstigen. Es muss ein Grenzwert K_{krit} identifiziert werden, um Kavitation zu begünstigen.



Abb. 4: Virtuelle Verlagerungsbahn des Modellexperiments im Vergleich zu realen Verlagerungsbahnen mit Kavitationsrisiko

Um die nötige Dynamik zu Erzeugen und damit Dampfkavitation auf das Modellexperiment zu übertragen, wird die Welle mit einer Spaltverengung bestückt. Die geometrische Spaltverengung erzeugt additiv zur stationären Druckverteilung nach Sommerfeld eine Druckabsenkung im divergenten Spalt. Da die Spaltverengung mit dem Kurbelwinkel umläuft, ergibt sich die in Abbildung 5 schwarz eingefärbte additive Druckabsenkung entlang der stationären Druckverteilung. Das lokale Druckminimum p_{min} wird im divergenten Spalt bei $\varphi = 195^{\circ}$ erreicht, wenn die Spaltverengung an diesem Punkt mit dem Druckminimum p_{min} der stationäre Druckverteilung zusammenfällt. Es entsteht Dampfkavitation im Modellexperiment, wenn p_{min} , den Dampfdruck der Flüssigkeit deutlich unterschreitet.



divergenten Spalt

Durchfährt die Spaltverengung im Betriebspunkt nach Abbildung 5 mit ihrem Minimum h_{min} den divergenten Spaltbereich bei $\varphi = 195^{\circ}$, sinkt der lokale Druck unter den Dampfdruck der Flüssigkeit. Es bilden sich im Nachlauf der Spaltverengung gas- und dampfförmige Blasen aus. Nachdem die Spaltverengung das Druckminimum bei $\varphi = 195^{\circ}$ durchfahren hat, steigt der lokale Druck in wenigen Grad Kurbelwinkel wieder auf das Druckniveau der stationären Druckverteilung an. Der größte Druckgradient wird bei $\varphi = 205^{\circ}$ beobachtet. Hier Verringern die Gasblasen nach isothermer Zustandsänderung ihr Volumen und die Dampfblasen implodieren.

Bei der Übertragung der geometrischen Spaltverengung auf die virtuelle Verlagerungsbahn in Abbildung 4, wird ein Faktor K im Bereich von 1000-4000 erreicht.

Der eingezeichnete Sichtbereich der Kamera stellt den Untersuchungsbereich dar. Die Bilderfolge in Abbildung 6.1 bis 6.3 zeigt den für einen Erosionsschaden relevanten Zerfallsprozess von Dampfkavitation, im Zusammenspiel mit der zeitgleich stattfindenden Gaskavitation, im divergenten Spaltbereich bei $\varphi = 205^{\circ}$. Für den Untersuchungsbereich ist der Kurbelwinkelbereich von $\phi = 238 \dots 244^{\circ}$ relevant. Dies entspricht einem Zeitintervall von $\Delta t = 4ms$. In den folgenden Abbildungen ist sowohl Gas- als auch Dampfkavitation zu beobachten. Das weiß gestrichelte Rechteck der folgenden Abbildungen, zeigt den untersuchten Blasenzerfallsbereich.



Abb. 6.1: Gas- und Dampfblase, Betriebspunkt: Re=88, n=3.2U/s, $\phi = 238^{\circ}$

In Abbildung 6.1 bei $\phi = 238^{\circ}$ liegt die Blase, die mit einem Gas-Dampf-Gemisch gefüllt ist, im Untersuchungsbereich vor. Die Blase löst sich von der Hinterkante der Spaltverengung ab und liegt nahezu ortsfest bei $\phi = 205^{\circ}$.



Abb. 6.2: Separation von Gas- und Dampfblase, Betriebspunkt: Re=88, n=3.2U/s, $\phi = 241^{\circ}$

In Abbildung 6.2, bei $\phi = 241^{\circ}$, kommt es zur Separation von Gas- und Dampfblase. Die Gasblase hat eine elliptische Form und liegt ortsfest, formstabil im Untersuchungsbereich. Die Dampfblase liegt als dünner Film ohne einen geometrischen Formbezug im Schmierspalt.



Abb. 6.2: Gasblase, Betriebspunkt: Re=88, n=3.2U/s, $\phi = 244^{\circ}$

In Abbildung 6.3, bei $\phi = 244^{\circ}$, ist die Dampfblase zerfallen und im Untersuchungsbereich sind nur Gasblasen vorhanden. Für den ausgewählten Betriebspunkt kann eine Zerfallszeit für Dampfkavitation im Modellexperiment von 1ms abgeschätzt werden.

Die geometrische Spaltverengung im Modellexperiment erreicht die nötige Dynamik um Dampfkavitation zu erzeugen. Es ist mit diesem Ansatz nun möglich, virtuelle Verlagerungsbahnen auf das Modellexperiment zu übertragen und so den Bereich mit Schadensrisiko in den Grenzen zu definieren.

Zusammenfassung

Kavitation im Schmierfilm eines hydrodynamischen Gleitlagers kann in Verbindung mit Materialerosion zum Ausfall eines Lagers führen. Es sind kavitationskritische Bereiche anhand der Kinematik ausgewählter Wellenverlagerungsbahnen identifiziert und mittels mechanischer Ähnlichkeit auf ein Modellexperiment übertragen worden. Die Bereiche sind gekennzeichnet durch hohe Exzentrizität und eine hohe Änderungsgeschwindigkeit der Schmierfilmdicke. Lediglich Dampfkavitation führt zum Erosionsschaden. Um Dampfkavitation zu erzeugen, muss eine für das Schmieröl charakteristische Zeit unterschritten werden. Es wird ein Kavitationsfluid verwendet, welches einen auf den Betriebspunkt abgestimmten Dampfdruck hat. Das Modellexperiment ist dafür an der rotierenden Welle mit einer geometrischen Spaltverengung versehen. Die Übertragung der Spaltverengung auf eine virtuelle Verlagerungsbahn verläuft im Bereich des K-Faktors von K=1000...4000. Im Modellexperiment treten Gas- und Dampfkavitation in Verbindung auf. Durchfährt die Spaltverengung das Druckminimum der stationären Druckverteilung bilden sich in ihrem Nachlauf Blasen, die mit einem Gas-Dampf-Gemisch gefüllt sind. Steigt der lokale Druck wieder auf den Druck der stationären Druckverteilung, kommt es zur Separation der Gas- und Dampfblasen. Innerhalb einer charakteristischen Zeit für Dampfkavitation von 1ms zerfällt die Dampfblase im beobachteten Fenster. Es konnte ein erster Nachweis gebracht werden, dass innerhalb des prognostizierten Schadensbereich Dampfkavitation erzeugt wurde. Um ein tieferes Verständnis zum Vorgang der Saugkavitation in hydrodynamischen Gleitlagern zu gewinnen, muss in weiteren Arbeiten die Variation der Größen K, ε und ε' im Parameterfeld der Reynoldszahl Re untersucht werden.

Dankesworte

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

Literatur

[1] G. Graf, K. Kollmann: Untersuchungen der Hauptlager eines 8-Zylinder-4-Takt-Schiffsdieselmotors. FVV-Forschungsbericht Nr. 2-211/10, 1964.

[2] P. Reinke, M. Schmidt, T. Beckmann: Advanced Model Experiment for the Research of Journal Bearings with Cavitation. JSAE 20199276 / SAE 2019-01-2331, 2019.

[3] H. Gläser: Schäden an Gleit- und Wälzlagerungen. Verlag Technik, Berlin, 1990.

[4] 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.

[5] U. Engel: Schäden an Gleitlagern in Kolbenmaschinen - in Bartz W. (Hrsg.): Schäden an geschmierten Maschinenelementen. Zweite Auflage, Expert-Verlag, 1992.

[6] A. Sommerfeld: "Zur hydrodynamischen Theorie der Schmiermittelreibung", Zeitschrift für Mathematik und Physik, Vol. 40, pp 97-155, 1904

[7] P. C. Borbe: Beitrag zur Werkstoffzerstörung durch Strömungskavitation in kalten und warmen Brauchwässern. Dissertation Universität Hannover, 1968.

[8] 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.

[9] Mahle, "Kolben und motorische Erprobung", Vieweg+Teubner Verlag ISBN: 978-3-8348-1452-4

[10] D. C. Sun, D. E. Brewe: Two Reference Time Scale for Studying the Dyn. Cavitation of Liquid Films. NASA Tech. Memo. 103673, AVSCOM Tech. Rep. 90-C-030, 1991.