

Modernes Verfahren zur Simulation stationärer und instationärer Belastungen beim hydrostatischen und hydrodynamischen Betrieb von Radialgleitlagern unter Berücksichtigung von Wellenbiegung

Vortrag gehalten auf der VDI-Tagung Gleit- und Wälzlagerungen
Gestaltung, Berechnung, Einsatz [0]¹
Wiesloch, 9.Juni 2009

Dr.-Ing. R. Wegmann, Dipl.-Ing. S.-U. Kreja, Prof. Dr.-Ing. K. Brökel
Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD
Universität Rostock, Albert-Einstein-Str. 2, D-18059 Rostock

Kurzfassung

Die Leistungsfähigkeit des Lagerberechnungsprogramms SIRIUS wird anhand der Untersuchung des Einflusses von Wellenbiegung auf die Tragfähigkeit von hydrodynamisch und hydrostatisch geschmierten Lagern dargestellt. Im untersuchten Fall zeigt das hydrostatische Lager eine wesentlich geringere Anfälligkeit gegen Wellenbiegung als das hydrodynamische Lager. Es wird eine Möglichkeit der Anpassung der Lagergeometrie an die Wellenbiegung untersucht.

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation	1
2. Fähigkeiten des Simulationswerkzeugs SIRIUS.....	2
3. Beschreibung einer beliebigen Lage der Welle mit Biegung im Lager.....	3
4. Tragfähigkeit eines hydrodynamischen Lagers bei reiner Wellenkrümmung	3
5. Tragfähigkeit eines hydrostatischen Lagers bei reiner Wellenkrümmung	4
6. Vergleich der Tragfähigkeit von hydrodynamischem und hydrostatischem Lager.....	5
7. Anpassung der Lagerform an die Wellenbiegung.....	5
8. Das instationär belastete Lager mit Wellenbiegung und Verkantung.....	6
Anhang	8
Liste der verwendeten Symbole.....	8
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	12
Literaturverzeichnis.....	13

1. Motivation

Alle wesentlichen Einzeleffekte im Gleitlager wurden bereits einzeln oder in Kombination mit einigen anderen untersucht und dargestellt. Diese finden mehr und mehr Eingang in die praktischen Berechnungen in den Entwicklungsbüros. Die Leistungsfähigkeit moderner anwendungsorientierter Simulationsverfahren zeigt sich dadurch, dass sie auch in der Lage sind, seltener zu berücksichtigende Einflüsse effektiv und mit dem üblichen Komfort darzustellen.

Der Simulation der hydrostatischen Lager wurde in der Vergangenheit wesentlich weniger Aufmerksamkeit gewidmet, da ihre Anwendung wegen des höheren technischen Aufwand nur besonderen Einsatzbedingungen vorbehalten geblieben sind. Für diese geringe Zahl von Anwendungsfällen ist es auch schwierig, spezielle ähnlich komfortable Programme zu erzeugen, wie es sie für hydrodynamische Lager gibt. Deshalb muss es Ziel sein die Berechnung hydro-

¹ Die Online-Version des Vortrages wurde gegenüber der gedruckten Version [0] um die gezeigten Animationen (nur HTML-Version) ergänzt. Außerdem wurden ein Inhaltsverzeichnis, ein Abbildungsverzeichnis, ein Verzeichnis der verwendeten Symbole und zu den Beispielen Tafeln mit Berechnungsparametern hinzugefügt.

statischer Lager in bestehende Berechnungsprogramme zu integrieren, um so den bereits realisierten Berechnungskomfort auch für die erweiterten Anwendungen zu nutzen.

Die Wellenkrümmung gehört zu den eher selten zu berücksichtigenden Einflüssen auf die Lagerberechnung, da Lager oft am Ende einer Welle oder Achse platziert sind, wo kein nennenswertes Biegemoment mehr auftritt und/oder weil sie oft schmal sind. Trotzdem gibt es eine hinreichend Anzahl von Fällen, wo sie nicht vernachlässigt werden sollte. Ein typisches Beispiel ist das Stevenrohrlager am Schiff mit seinem üblichen Breiten-Durchmesser-Verhältnis von Zwei [1],[2].

Anhand der Untersuchung des Einflusses von Wellenbiegung an hydrostatischen und hydrodynamischen Gleitlagern soll hier die Leistungsfähigkeit des Lagerberechnungsprogramms SIRIUS demonstriert werden.

2. Fähigkeiten des Simulationswerkzeugs SIRIUS

Ursprünglich wurde das Programm SIRIUS zur Untersuchung von Kavitation im hydrodynamischen Radialgleitlager entwickelt [3],[4]. Da es von Anfang an als Baukasten konzipiert wurde, besaß es ein großes Erweiterungspotential und wurde Schritt für Schritt weiter entwickelt [5]. 2007 erfolgt dann eine grundsätzliche Überarbeitung, bei der es seine aktuelle Struktur erhielt und damit die Voraussetzungen für ein weiteres Entwicklungspotential [7].

Das Programm "SIRIUS" berechnet den Druckverlauf und weitere daraus resultierenden Größen für das endlich breite stationär und instationär belastete Radialgleitlager. Aus einer vorgegebenen Lagerbelastung kann die resultierende Wellenverlagerung berechnet werden und umgekehrt. Das ist sowohl für den stationären als auch für den instationären Fall möglich. Es kann wahlweise mit der Reynoldsschen Differentialgleichung gearbeitet werden, wobei die Gümbelschen Randbedingungen angenommen werden, als auch mit der erweiterten Schmiertheorie nach Wegmann [3], die Kavitation im Gebiet des sich erweiternden Schmierspalts berücksichtigt.

Es können Formabweichungen der Welle und der Lagerschale von der kreisrunden Form berücksichtigt werden. Diese Formabweichungen können über den Umfang und/oder in axialer Richtung auftreten.

Die Lage der Welle in der Lagerschale kann verkantet sein. Außerdem kann die Biegung der Welle infolge eines Wellenbiegemoments berücksichtigt werden. Verkantung und Biegung können über die Zeit variieren. Sie werden hier als externe Einflüsse angenommen, die nicht vom Druckaufbau im Lager abhängen, diesen aber beeinflussen.

Es können beliebige Schmiernutanordnungen im Lager berücksichtigt werden. Das ist besonders für die Modellierung hydrostatischer Gleitlager eine wichtige Voraussetzung.

Am Lagerrand und in den Schmiernuten bzw. Schmiertaschen können beliebige Drücke vorgegeben werden, mit denen hydrodynamische Gleitlager simuliert werden. Für die Simulation hydrostatischer Lager können verschiedene Systeme der Ölstromverteilung auf die einzelnen Schmiertaschen ausgewählt werden. Das sind zunächst die traditionellen Ölstromverteiler durch Laminardrosseln und durch Gleichverteilung der Ölströme auf alle Schmiertaschen. Durch das Baukastensystem können weitere hydrostatische Ölverteilungssteuerungen eingebaut werden.

Zur grafischen Darstellung der Ergebnisse wird die freie Software Gnuplot [8] genutzt. Die Kommunikation zwischen dem Postprozessor und der Grafik-Software erfolgt über mehrere Textdateien als Datenschnittstellen.

Vermittelt über die Software Gnuplot können Videodateien zur Animationen des zeitlichen Ablaufs der Simulationsergebnisse erzeugt werden. Die hier im Artikel leider nicht gezeigt werden können. Die im Vortrag gezeigten Animationen zu den nachfolgenden Demonstrationsbeispielen finden Sie im Internet auf der Homepage des Autors unter <http://www.rolandwegmann.de/VDI-Lager2009/>.

3. Beschreibung einer beliebigen Lage der Welle mit Biegung im Lager

Das Hauptaugenmerk soll hier auf die Wellenbiegung gelegt werden. Da diese in der Regel mit einer Wellenverkantung gemeinsam auftritt, ist diese mit zu betrachten. Eine beliebige Lage der Welle mit Biegung innerhalb der Lagerschale kann prinzipiell in drei Anteile zerlegt werden:

1. In einen Anteil der achsparallelen Verlagerung der Welle, beschrieben durch die Exzentrizität e und den Verlagerungswinkel γ .
2. Reine Verkantung k und den Winkel γ_k der Ebene, bezogen auf Koordinatensystem 1-2-3.
3. Reine Biegung b_i und den Winkel γ_{bi} der Ebene der Biegelinie, bezogen auf das Koordinatensystem 1-2-3.

Die Winkel γ , γ_k und γ_{bi} sind in der Regel ungleich.

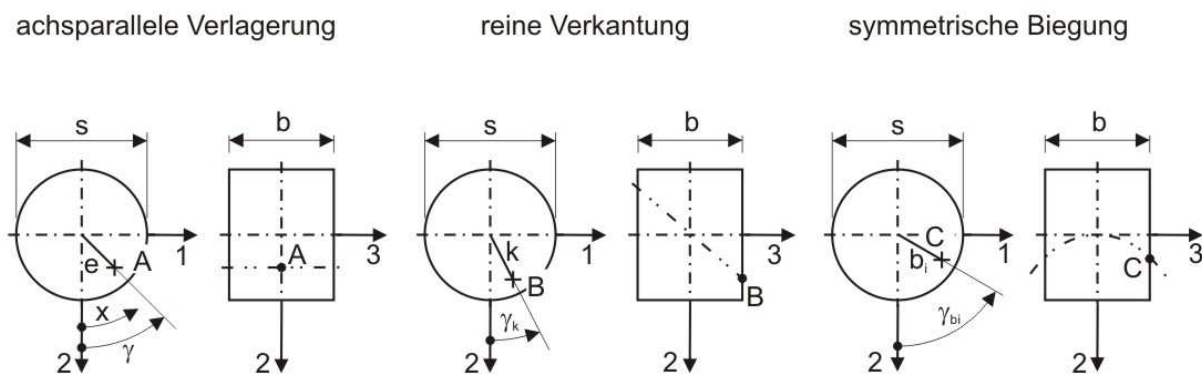


Bild 1: Definition der Parameter der Wellenverlagerung in der Lagerschale

Die Aufteilung der Verlagerung der Welle in o.g. Anteile hat den Vorteil, dass bei der Simulation des Lagerverhaltens diese drei Anteile einer beliebigen Wellenverlagerung einzeln simuliert und ihre Auswirkung auf den Druckaufbau und die Tragfähigkeit einzeln analysiert werden können.

Bild 1 zeigt die Definition der Parameter der Wellenverlagerung im Raum der möglichen Verlagerung der Wellenachse.

Da im Programm SIRIUS ausschließlich mit dimensionslosen Parametern gearbeitet wird, werden die Parameter der Wellenverlagerung analog der dimensionslosen Exzentrizität E mit dem Lagerspiel s dimensionslos gemacht:

$$E = \frac{2 \cdot e}{s} \quad \text{und analog} \quad K = \frac{2 \cdot k}{s} \quad Bi = \frac{2 \cdot b_i}{s}$$

Mit diesen Parametern ergibt sich die Geometrie des Schmierspalts bei ansonsten kreisrunder Lagerschale und Welle durch

$$H(X, Z) = 1 - E \cdot \cos(X - \gamma) - K \cdot Z \cdot \cos(X - \gamma_k) - Bi \cdot Z^2 \cdot \cos(X - \gamma_{bi})$$

4. Tragfähigkeit eines hydrodynamischen Lagers bei reiner Wellenkrümmung

Als Demonstrationsbeispiel wird ein Lager mit der relativen Lagerbreite $b/d=1$ ausgewählt. Das Lager ist statisch belastet. Gegenüber der Lastrichtung ist eine Schmiertasche angeordnet.

Als Tragfähigkeitskriterium wird eine minimale dimensionslose Spalthöhe $H_{\min}=0,2$ angenommen. D.h. wenn das Spiel des Lagers z.B. $s=0,1\text{mm}$ beträgt, muss die minimale Spalthöhe $h_{\min} \geq 0,05\text{mm}$ sein. Die Tragfähigkeit des Lagers ist dann die dimensionslose Belastung $So(H_{\min})$, bei der die minimale Spalthöhe H_{\min} beträgt.

Bild 2 zeigt den dimensionslosen Druckverlauf $P(X, Z)$ im Schmierspalt bei maximaler Lagerbelastung ($H_{\min}=0,2$) bei gerader Welle (links) und bei einer gebogenen Welle mit $Bi=0,4$ (rechts). Die Ebene der Biegelinie soll in Krafrichtung liegen ($\gamma_{bi}=\gamma=0$).

Bei dieser Wellenbiegung ist ein erheblicher Abfall der Lagertragfähigkeit zu beobachten. Zu erklären ist das ganz einfach dadurch, dass die zulässige minimale Spaltdicke $H_{\min}=0,2$ an den Lagerrändern schon erreicht ist, während z.B. über die halbe Lagerbreite die minimale Spaltdicke, die für die Schmierfilmdruckerzeugung durch Keilwirkung sorgt, nur Werte von 0,5 bis 0,6 erreichen und demzufolge in diesen Querschnitten nur ein wesentlich geringerer Druckaufbau erfolgt.

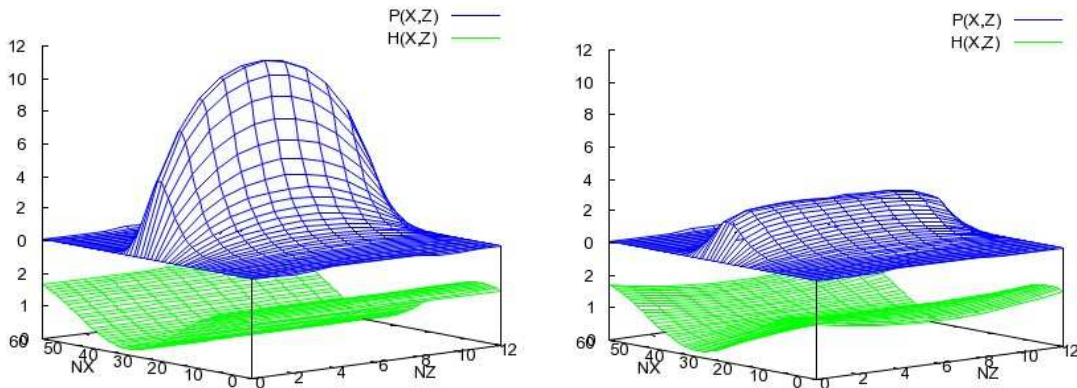


Bild 2: Druckverteilung $P(X,Z)$ und Spalthöhe $H(X,Z)$ über die abgewickelte Schmierspaltfläche im hydrodynamischen Gleitlager bei gerader Welle $Bi=0$ (links) und bei gebogener Welle $Bi=0,4$ (rechts)

5. Tragfähigkeit eines hydrostatischen Lagers bei reiner Wellenkrümmung

Analog zum hydrodynamisch geschmierten Lager soll nun ein hydrostatisches Lager untersucht werden mit gleichen Lagerabmessungen. Auf dem Umfang der Lagerschale sind 10 Schmier-taschen gleichmäßig verteilt. Die Schmierölverteilung auf die einzelnen Schmiertaschen wird durch Kapillardrosseln geregelt. Der dimensionslose Drosselwiderstand wird angenommen mit $R_{cp}=2$. Der dimensionslose Ölstrom wird mit $Q=18,6$ angenommen. Diese sind definiert durch

$$R_{cp} = \frac{8 \cdot l_{cp} \cdot b \cdot s^3}{\pi \cdot d_{cp}^4 \cdot d} \quad \text{und} \quad Q = \frac{8 \cdot q}{r \cdot b \cdot s \cdot \omega}$$

wobei l_{cp} die Länge und d_{cp} der Innendurchmesser der Kapillardrossel sind, q der dimensions-behaftete Ölstrom und ω die Bezugswinkelgeschwindigkeit (z.B. die Drehgeschwindigkeit der Welle) sind.

Dieser Ölstrom wurde so gewählt, dass das hydrostatische Lager bei gerader Welle die gleiche Tragfähigkeit hat wie das hydrodynamische Gleitlager mit gleichen Abmessungen bei ebenfalls gerader Welle und so die beiden Lager vergleichbar sind. Bild 3 zeigt den dimensionslosen Druck-verlauf $P(X,Z)$ im Schmierspalt bei maximaler Lagerbelastung ($H_{\min}=0,2$) bei gerader Welle (links) und bei einer gebogenen Welle mit $Bi=0,4$ (rechts).

Im Unterschied zum hydrodynamischen Gleitlager sind hier nur geringfügige Unterschiede im Druckaufbau und damit in der Tragfähigkeit zu erkennen. Wie ist das zu erklären? Im hydrostatischen Lager erfolgt der Druckaufbau des Schmiermittels außerhalb des Lagers durch eine Hochdruckpumpe. Wie hoch der Druck in der Schmiertasche ist hängt dann nur davon ab, wie leicht das Schmiermittel abfließen kann. In unserem konkreten Fall, wo die Wellenbiegung mit der Belastungsrichtung zusammenfällt, werden die Abflussbedingungen kaum beeinträchtigt, weil bei gleicher minimaler Spaltdicke der Abflusswiderstand in den seitlichen Stegen der Schmiertasche mit dem höchsten Druck kaum verändert wird.

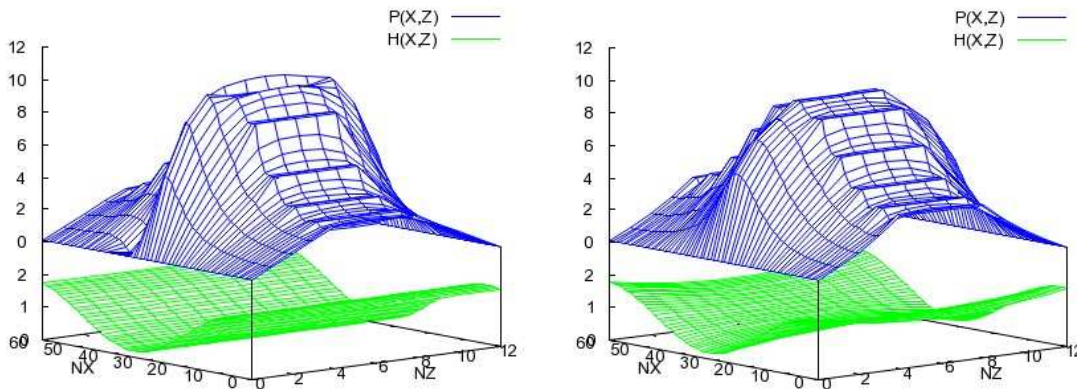


Bild 3: Druckverteilung $P(X,Z)$ und Spalthöhe $H(X,Z)$ über die abgewickelte Schmierspaltfläche im hydrostatischen Gleitlager bei gerader Welle $Bi=0$ (links) und bei gebogener Welle $Bi=0,4$ (rechts)

6. Vergleich der Tragfähigkeit von hydrodynamischem und hydrostatischem Lager

Bild 4 zeigt den Vergleich der Tragfähigkeiten von hydrodynamischem und hydrostatischem Lager über den Parameter Wellenbiegung Bi .

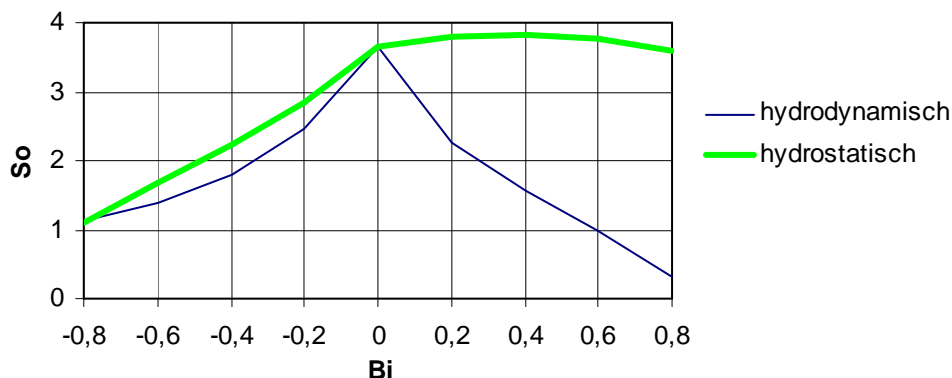


Bild 4: Vergleich der Tragfähigkeiten von hydrostatischem und hydrodynamischem Lager

Während beim hydrodynamischen Lager bei Biegung generell die Tragfähigkeit schnell abnimmt, ist das hydrostatische Lager im Bereich positiver Biegung unempfindlich gegen diese. Das ist der praktisch interessante Bereich, weil die Belastungsrichtung des Lagers und die Richtung der Wellenbiegung oft korrelieren.

7. Anpassung der Lagerform an die Wellenbiegung

Maximale Lagerlast und maximale Biegung der Welle treten oft gemeinsam auf. Deshalb ist es naheliegend zu versuchen, durch eine angepasste Lagerform die Tragfähigkeit des Lagers bei Biegung zu verbessern. Das ist besonders wichtig für das hydrodynamische Lager. Deshalb wird als nächstes versucht, durch eine ballige Lagerschale eine optimale Schmiegun zwischen Welle und Lagerschale für die maximale Lagerbelastung zu erreichen.

Bild 5 zeigt die Definition des Parameters ba , der die Balligkeit einer Lagerschale quantifiziert und wie sich dadurch der Verlagerungsraum verändert.

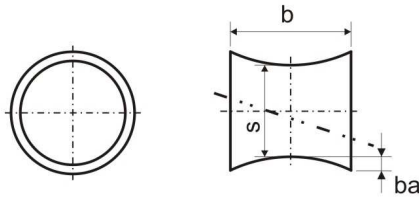


Bild 5: Definition der Balligkeit ba der Lagerschale

Analog zu dem Biegeparameter wird auch der Parameter ba dimensionslos gemacht durch

$$Ba = \frac{2 \cdot ba}{s}$$

Es wird angenommen, dass bei der maximalen Lagerbelastung eine maximale Wellenbiegung von $Bi=0,2$ auftritt. Demzufolge wird die Lagerschale mit einer Balligkeit von 0,2 versehen. Bild 6 zeigt nun den Vergleich der Tragfähigkeit über die Wellebiegung Bi mit und ohne balliger Lagerschale, links für das hydrodynamische Lager und rechts für des hydrostatische Lager.

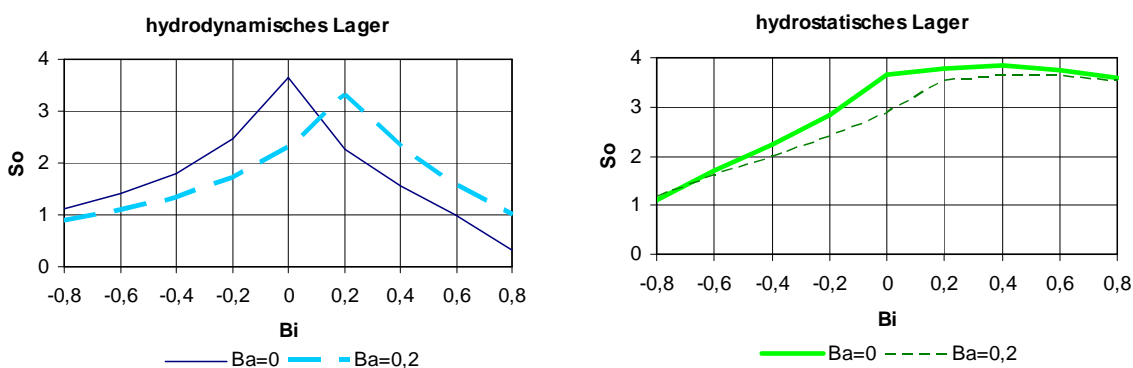


Bild 6: Vergleich der Tragfähigkeit eines Lagers mit und ohne balliger Lagerschale über die Wellenbiegung Bi ; links: hydrodynamisches Lager, rechts: hydrostatisches Lager

Beim hydrostatischen Lager (rechtes Diagramm) bringt die Balligkeit der Lagerschale insgesamt nur eine Verschlechterung der Tragfähigkeit und ist deshalb nicht sinnvoll. Beim hydrodynamischen Lager (linkes Diagramm) liegt das Maximum der Tragfähigkeit jetzt tatsächlich am Punkt der Biegung $Bi=0,2$ und ist gegenüber der maximalen Tragfähigkeit bei gerader Welle nur geringfügig gesunken. Hier kann es durchaus sinnvoll sein, der Wellenbiegung durch eine ballige Lagerschale zu begegnen. Da die Tragfähigkeit aber nach beiden Seiten stark abfällt, ist außerdem zu prüfen, ob die Tragfähigkeit bei anderen Belastungen im Zusammenhang mit anderen Biegungen der Welle auch noch ausreichend ist.

Da Lagerbelastung und Wellenbiegung nicht immer die gleiche Richtung haben, wie in unserem Fall angenommen, können die hier gezeigten Resultate nicht verallgemeinert werden. Unser Beispiel zeigt aber, welche Effekte durch die Wellenbiegung auftreten können und wie man sie behandeln kann. Diese Untersuchungen konnten mit dem Simulationswerkzeug SIRIUS schnell und zuverlässig behandelt werden.

8. Das instationär belastete Lager mit Wellenbiegung und Verkantung

Derartige Untersuchungen sind mit SIRIUS auch an instationär belasteten Lagern möglich. Ihre Darstellung würde aber den Rahmen dieses Vortrages sprengen. Deshalb soll zum Abschluss hier nur noch ein Beispiel der Berechnung der Tragfähigkeit unseres hydrodynamischen und hydrostatischen Lagers bei einer instationären Belastung gezeigt werden. Die beiden Lager sollen wieder die gleichen Abmessungen haben. Als dynamische Belastung wird eine mit der Wellendrehzahl umlaufende Last und synchron dazu eine umlaufende Biegung $Bi=0,2$ angenommen, wie das bei Unwucht der Fall ist. Da reine symmetrische Biegung in der Regel nicht

auftritt, wird die Biegung noch durch eine unlaufende Verkantung $K=0,2$ der Welle in der Lagerschale überlagert.

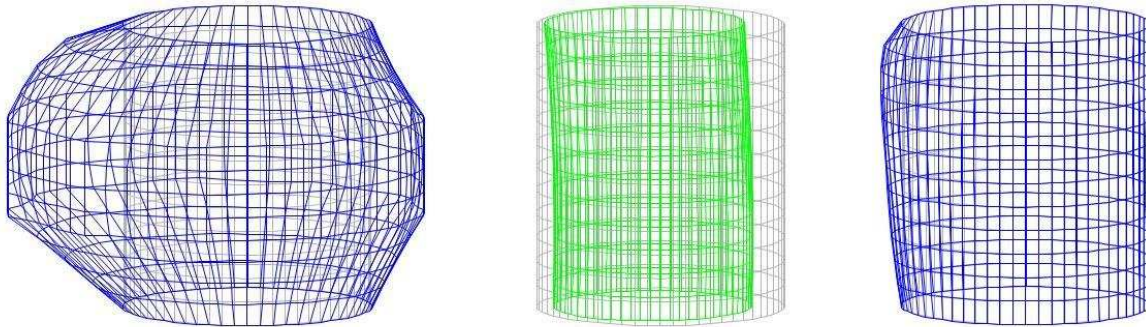


Bild 7: Druckverteilung $P(X,Z)$ zu einem ausgewählten Zeitpunkt aus dem Lastzyklus für das hydrostatische Lager (links) und für des hydrodynamische Lager (rechts) bei gleicher minimaler Spalthöhe $H_{min}=0,2$, gleicher Verkantung $K=0,2$ und gleicher Wellenbiegung $B_i=0,2$

Bild 7 zeigt den Druckverlauf $P(X,Z)$ über den Umfang des Lagers für das hydrostatische Lager (links) und das hydrodynamische Lager (rechts) zu einem ausgewählten Zeitpunkt und die zugehörige Lage der Welle in der Lagerschale (Mitte).

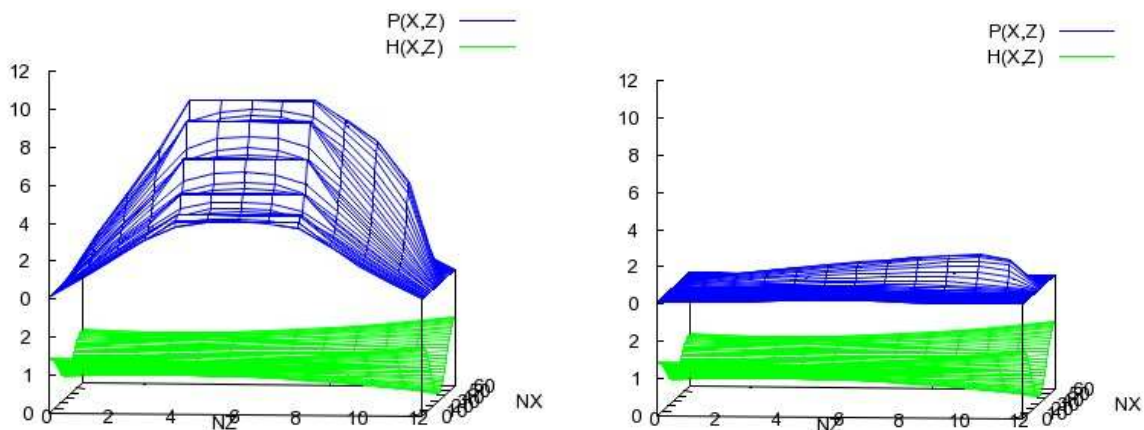


Bild 8: Druckverteilung $P(X,Z)$ und Schmier-spalthöhe $H(X,Z)$ zu einem Zeitpunkt aus dem Lastzyklus für das hydrostatische Lager (links) und für des hydrodynamische Lager (rechts) bei gleicher minimaler Spalthöhe $H_{min}=0,2$, gleicher Verkantung $K=0,2$ und Wellenbiegung $B_i=0,2$

Bild 8 zeigt die gleichen Druckverteilungen noch einmal in einer anderen Ansicht, nämlich über die abgewickelte Schmier-spaltfläche, wobei die Gitterpunkte NZ die axiale Richtung des Lager repräsentieren und die Gitterpunkte NX die Umfangsrichtung.

Auch in diesem Fall ist das hydrostatische Gleitlager gegen die angenommene Verkantung und Biegung weniger anfällig und weist bei gleicher aktueller Spaltgeometrie einen wesentlich höheren Druck im Schmier-spalt auf. Die Darstellungen der Druckverteilung und der Spaltgeometrie über die Zeit, die hier in der gedruckten Ausgabe nicht gezeigt werden können, finden Sie auf der Homepage des Autors unter <http://www.rolandwegmann.de/VDI-Lager2009/>.

Anhang

Liste der verwendeten Symbole

Parameter, mit kleinem Buchstaben beginnend, sind dimensionsbehaftet. Mit großem Buchstaben beginnende Parameter sind die entsprechenden dimensionslosen. Definition der dimensionslosen Parameter siehe [3]

b, B	Lagerbreite
ba, Ba	Balligkeit der Lagerschale gemäß Bild 5
bi, Bi	Betrag der Wellenkrümmung gemäß Bild 1
C	Mischungskonstante
d_{cp}	Innendurchmesser der Kapillaren des hydrostatischen Lagers
e, E	Betrag der Wellenexzentrizität
H	dimensionslose Schmierpalthehöhe
h_{min}, H_{min}	minimale Schmierpalthehöhe
k, K	Betrag der Verkantung gemäß Bild 1
l_{cp}	Länge der Kapillaren des hydrostatischen Lagers
NX, NZ	Anzahl der Gitterpunkt in X- bzw. Z-Richtung des über den Schmierpalt aufgespannten Gitters zur iterativen Berechnung des Druckverlaufs im Lager
NT	Anzahl der Zeitschritte pro Umdrehung
p, P	Schmierfilmdruck
Pr1	(absoluter) Umgebungsdruck am Lagerrand
Pr2	(absoluter) Ölzufuhrdruck in der Schmiertasche
q, Q	Ölstrom der Schmiermittelversorgungseinrichtung des hydrostatischen Lagers
r	Wellenradius
r_{cp}, R_{cp}	Drosselwiderstand der Kapillaren des hydrostatischen Lagers
s	Lagerspiel
So	Sommerfeldzahl (dimensionslose Lagerbelastung)
T	dimensionslose Zeit
X	dimensionslose Umfangskoordinate entlang des Schmierpalts (Winkel in Bogenmaß)
XSo	Stelle (Richtung) der resultierenden Lagerbelastung So
Z	dimensionslose axiale Koordinate entlang des Schmierpalts ($-1 \leq Z \leq +1$)
γ	Richtung der Wellenverlagerung gemäß Bild 1
γ_{bi}	Winkel zwischen der 2-3-Ebene des Koordinatensystems 1-2-3 und der Ebene der Wellenkrümmung gemäß Bild 1
γ_k	Winkel zwischen der 2-3-Ebene des Koordinatensystems 1-2-3 und der Ebene der Wellenverkantung gemäß Bild 1
ω, Ω	relative Winkelgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale

Tafel 1: Liste weiterer Parameter zum Demonstrationsbeispiel hydrodynamisches Lager in Abschnitt 4, 6 und 7

Alle Parameter sind dimensionslos. (Definitionen der dimensionslosen Parameter siehe [3])

$B_i = 0$	0,4	Wellenkrümmung
$\gamma_{bi} = 0$		Winkel der Wellenkrümmung
$H_{min} = 0,2$		minimale Spalthöhe
$E = 0,8$	0,48	Wellenexzentrizität
$\gamma = 0,591$	0,858	Verlagerungswinkel
$S_o = 3,65$	1,57	Sommerfeldzahl, dimensionslose Lagerbelastung
$X_{S_o} = 0$		Stelle (Richtung) der resultierenden Lagerbelastung S_o
$B = 1$		relative Lagerbreite
$C = 0,05$		Mischungskonstante
$N_X = 61$		Anzahl der Gitterpunkt in X-Richtung
$N_Z = 13$		Anzahl der Gitterpunkt in Z-Richtung
$\Omega = 2 \cdot \pi$		relative Winkelgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale
$Pr_1 = 0,1$		(absoluter) Druck am Lagerrand
$Pr_2 = 0,2$		(absoluter) Schmierölzufuhrdruck in der Schmiernut

Hydrodynamisches Gleitlager mit einer Schmiernut gegenüber der Richtung der Lagerbelastung
Zur Berechnung wurde die erweiterte Reynoldssche Differentialgleichung verwendet [3].
Die Lagerschale wird als ideal zylindrisch angenommen.

Tafel 2: Liste weiterer Parameter zum Demonstrationsbeispiel hydrostatisches Lager in Abschnitt 5, 6 und 7

Alle Parameter sind dimensionslos. (Definitionen der dimensionslosen Parameter siehe [3])

$B_i = 0$	0,4	Wellenkrümmung
$\gamma_{bi} = 0$		Winkel der Wellenkrümmung
$H_{min} = 0,2$		minimale Spalthöhe
$E = 0,8$	0,41	Wellenexzentrizität
$\gamma = 0,413$	0,308	Verlagerungswinkel
$S_o = 3,65$	3,84	Sommerfeldzahl, dimensionslose Lagerbelastung
$X_{S_o} = 0$		Stelle (Richtung) der resultierenden Lagerbelastung S_o
$B = 1$		relative Lagerbreite
$N_X = 61$		Anzahl der Gitterpunkt in X-Richtung
$N_Z = 13$		Anzahl der Gitterpunkt in Z-Richtung
$\Omega = 2 \cdot \pi$		relative Winkelgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale
$Pr_1 = 0,1$		(absoluter) Druck am Lagerrand
$R_{Cp} = 2,0$		dimensionsloser Drosselwiderstand der Kapillaren des hydrostatischen Lagers
$Q = 18,6$		Ölstrom der Schmiermittelversorgungseinrichtung des hydrostatischen Lagers

Hydrostatisches Gleitlager mit 10 auf dem Umfang verteilten Schmiertaschen.
Zur Berechnung wurde die Reynoldssche Differentialgleichung mit Gumbelschen Randbedingungen verwendet [3].
Die Lagerschale wird als ideal zylindrisch angenommen.

Tafel 3: Liste weiterer Parameter zum Demonstrationsbeispiel Abschnitt 7, Abbildung 6 hydrodynamisches Lager mit balliger Lagerschale

Alle Parameter sind dimensionslos. (Definitionen der dimensionslosen Parameter siehe [3])

Ba = 0,2		Balligkeit der Lagerschale
Bi = 0	0,2	Wellenkrümmung
$\gamma_{bi} = 0$		Winkel der Wellenkrümmung
$H_{min} = 0,2$		minimale Spalthöhe
E = 0,8	0,8	Wellenexzentrizität
$\gamma = 0,634$	0,609	Verlagerungswinkel
So = 2,29	3,34	Sommerfeldzahl, dimensionslose Lagerbelastung
XSo = 0		Stelle (Richtung) der resultierenden Lagerbelastung So
B = 1		relative Lagerbreite
C = 0,05		Mischungskonstante
NX = 61		Anzahl der Gitterpunkt in X-Richtung
NZ = 13		Anzahl der Gitterpunkt in Z-Richtung
$\Omega = 2 \cdot \pi$		relative Winkelgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale
Pr1 = 0,1		(absoluter) Druck am Lagerrand
Pr2 = 0,2		(absoluter) Schmierölzuhfdruck in der Schmiernut

Hydrodynamisches Gleitlager mit einer Schmiernut gegenüber der Richtung der Lagerbelastung
Zur Berechnung wurde die erweiterte Reynoldssche Differentialgleichung verwendet [3].

Tafel 4: Liste weiterer Parameter zum Demonstrationsbeispiel Abschnitt 7, Abbildung 6 hydrostatisches Lager mit balliger Lagerschale

Alle Parameter sind dimensionslos. (Definitionen der dimensionslosen Parameter siehe [3])

Ba = 0,2		Balligkeit der Lagerschale
Bi = 0	0,2	Wellenkrümmung
$\gamma_{bi} = 0$		Winkel der Wellenkrümmung
$H_{min} = 0,2$		minimale Spalthöhe
E = 0,8	0,8	Wellenexzentrizität
$\gamma = 0,369$	0,440	Verlagerungswinkel
So = 2,88	3,54	Sommerfeldzahl, dimensionslose Lagerbelastung
XSo = 0		Stelle (Richtung) der resultierenden Lagerbelastung So
B = 1		relative Lagerbreite
NX = 61		Anzahl der Gitterpunkt in X-Richtung
NZ = 13		Anzahl der Gitterpunkt in Z-Richtung
$\Omega = 2 \cdot \pi$		relative Winkelgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale
Pr1 = 0,1		(absoluter) Druck am Lagerrand
$R_{Cp} = 2,0$		dimensionsloser Drosselwiderstand der Kapillaren des hydrostatischen Lagers
Q = 18,6		Ölstrom der Schmiermittelversorgungseinrichtung des hydrostatischen Lagers

Hydrostatisches Gleitlager mit 10 auf dem Umfang verteilten Schmiertaschen.
Zur Berechnung wurde die Reynoldssche Differentialgleichung mit Gumbelschen Randbedingungen verwendet [3].

Tafel 5: Liste weiterer Parameter zum Demonstrationsbeispiel Abschnitt 8, Abbildung 7 und 8, hydrostatische Variante

Alle Parameter sind dimensionslos. (Definitionen der dimensionslosen Parameter siehe [3])

$B_i = 0,2$	Wellenkrümmung
$\gamma_{bi} = \Omega \cdot T$	Winkel der Wellenkrümmung
$K = 0,2$	Verkantung
$\gamma_k = \Omega \cdot T$	Winkel der Verkantung
$E = 0,4$	Wellenexzentrizität
$\gamma = \Omega \cdot T$	Verlagerungswinkel
$H_{min} = 0,2$	minimale Spalthöhe
$S_o = 3,28$	Sommerfeldzahl, dimensionslose Lagerbelastung
$X_{So} = \Omega \cdot T + 0,180$	Stelle (Richtung) der resultierenden Lagerbelastung S_o
$B = 1$	relative Lagerbreite
$N_X = 61$	Anzahl der Gitterpunkt in X-Richtung
$N_Z = 13$	Anzahl der Gitterpunkt in Z-Richtung
$N_T = 41$	Anzahl der Zeitschritte pro Umdrehung
$\Omega = 2 \cdot \pi$	relative Winkelgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale
$Pr_1 = 0,1$	(absoluter) Druck am Lagerrand
$R_{Cp} = 2,0$	dimensionsloser Drosselwiderstand der Kapillaren des hydrostatischen Lagers
$Q = 21$	Ölstrom der Schmiermittelversorgungseinrichtung des hydrostatischen Lagers

Hydrostatisches Gleitlager mit 10 auf dem Umfang verteilten Schmiertaschen.

Breite der Schmiertaschen in axialer Richtung = $0,33 \cdot B$

Breite der Schmiertaschen in Umfangsrichtung = $0,033 \cdot \text{Wellenumfang}$

Zur Berechnung wurde die Reynoldssche Differentialgleichung mit Gumbelschen Randbedingungen verwendet [3].

Die Lagerschale wird als ideal zylindrisch angenommen.

Tafel 6: Liste weiterer Parameter zum Demonstrationsbeispiel Abschnitt 8, Abbildung 7 und 8 hydrodynamische Variante

Alle Parameter sind dimensionslos. (Definitionen der dimensionslosen Parameter siehe [3])

$B_i = 0,2$	Wellenkrümmung
$\gamma_{bi} = \Omega \cdot T$	Winkel der Wellenkrümmung
$K = 0,2$	Verkantung
$\gamma_k = \Omega \cdot T$	Winkel der Verkantung
$E = 0,4$	Wellenexzentrizität
$\gamma = \Omega \cdot T$	Verlagerungswinkel
$H_{min} = 0,2$	minimale Spalthöhe
$S_o = 0,41 \text{ bis } 0,70$	Sommerfeldzahl, dimensionslose Lagerbelastung
$X_{So} = \Omega \cdot T + (0,58 \text{ bis } 0,78)$	Stelle (Richtung) der resultierenden Lagerbelastung S_o
$B = 1$	relative Lagerbreite
$C = 0,05$	Mischungskonstante
$N_X = 61$	Anzahl der Gitterpunkt in X-Richtung
$N_Z = 13$	Anzahl der Gitterpunkt in Z-Richtung
$N_T = 41$	Anzahl der Zeitschritte pro Umdrehung
$\Omega = 2 \cdot \pi$	relative Winkelgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale
$Pr_1 = 0,1$	(absoluter) Druck am Lagerrand
$Pr_2 = 0,2$	(absoluter) Schmierölzufuhrdruck in der Schmiernut

Hydrodynamisches Gleitlager mit einer axialen Schmiernut an der Stelle $X = \pi$.

Breite der Schmiertaschen in axialer Richtung = $0,33 \cdot B$
 Breite der Schmiertaschen in Umfangsrichtung = 0
 Zur Berechnung wurde die erweiterte Reynoldssche Differentialgleichung verwendet [3].
 Die Lagerschale wird als ideal zylindrisch angenommen.

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Bild 1: Definition der Parameter der Wellenverlagerung in der Lagerschale 3

Bild 2: Druckverteilung $P(X,Z)$ und Spalthöhe $H(X,Z)$ über die abgewickelte Schmierspaltfläche im hydrodynamischen Gleitlager bei gerader Welle $B_i=0$ (links) und bei gebogener Welle $B_i=0,4$ (rechts)..... 4

Bild 3: Druckverteilung $P(X,Z)$ und Spalthöhe $H(X,Z)$ über die abgewickelte Schmierspaltfläche im hydrostatischen Gleitlager bei gerader Welle $B_i=0$ (links) und bei gebogener Welle $B_i=0,4$ (rechts)..... 5

Bild 4: Vergleich der Tragfähigkeiten von hydrostatischem und hydrodynamischem Lager 5

Bild 5: Definition der Balligkeit b_a der Lagerschale..... 6

Bild 6: Vergleich der Tragfähigkeit eines Lagers mit und ohne balliger Lagerschale über die Wellenbiegung B_i ; links: hydrodynamisches Lager, rechts: hydrostatisches Lager 6

Bild 7: Druckverteilung $P(X,Z)$ zu einem ausgewählten Zeitpunkt aus dem Lastzyklus für das hydrostatische Lager (links) und für des hydrodynamische Lager (rechts) bei gleicher minimaler Spalthöhe $H_{min}=0,2$, gleicher Verkantung $K=0,2$ und gleicher Wellenbiegung $B_i=0,2$ 7

Bild 8: Druckverteilung $P(X,Z)$ und Schmierspalthöhe $H(X,Z)$ zu einem Zeitpunkt aus dem Lastzyklus für das hydrostatische Lager (links) und für des hydrodynamische Lager (rechts) bei gleicher minimaler Spalthöhe $H_{min}=0,2$, gleicher Verkantung $K=0,2$ und Wellenbiegung $B_i=0,2$ 7

Tafel 1: Liste weiterer Parameter zum Demonstrationsbeispiel hydrodynamisches Lager in Abschnitt 4, 6 und 7 9

Tafel 2: Liste weiterer Parameter zum Demonstrationsbeispiel hydrostatisches Lager in Abschnitt 5, 6 und 7 9

Tafel 3: Liste weiterer Parameter zum Demonstrationsbeispiel Abschnitt 7, Abbildung 6 hydrodynamisches Lager mit balliger Lagerschale 10

Tafel 4: Liste weiterer Parameter zum Demonstrationsbeispiel Abschnitt 7, Abbildung 6 hydrostatisches Lager mit balliger Lagerschale 10

Tafel 5: Liste weiterer Parameter zum Demonstrationsbeispiel Abschnitt 8, Abbildung 7 und 8, hydrostatische Variante..... 11

Tafel 6: Liste weiterer Parameter zum Demonstrationsbeispiel Abschnitt 8, Abbildung 7 und 8 hydrodynamische Variante 11

Literaturverzeichnis

- [0] Wegmann, R. ; Kreja, S.-U.; Brökel, K.: Modernes Verfahren zur Simulation stationärer und instationärer Belastungen beim hydrostatischen und hydrodynamischen Betrieb von Radialgleitlagern unter Berücksichtigung von Wellenbiegung. VDI-Berichte 2069 S.161-169; ISBN:978-3-18-092069-6, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2009.
- [1] Barenthin, Torsten: Ermittlung der hydrodynamischen Verhältnisse im Stevenrohrlager unter Berücksichtigung einer gekrümmten Welle und beliebiger Nutgeometrie, Dissertation Uni. Rostock, 2005.
- [2] Brökel, K.; Stückrad, H.: Stark verkantete und gekrümmte Propellerwellen bei unkonventioneller Spaltgeometrie und Schmiernutanordnung - Spezielle Aspekte der Simulation hydrodynamischer Stevenrohrlager. VDI-Fachtagung "Gleit- und Wälzlagerungen" 30./31. Mai 2006 Wiesloch, VDI-Berichte 1942.
- [3] Wegmann, R.: Erweiterung der hydrodynamischen Schmiertheorie durch Einbeziehung des Unterdruckgebietes in die Berechnung instationär belasteter Gleitlager. Dissertation, Universität Rostock, 1978. http://www.rolandwegmann.de/dissertation_rw/
- [4] Brökel, Klaus: Das schwelend belastete Radialgleitlager unter Berücksichtigung der Verformung und eines Schmierstoff-Gas-Gemischs bei beliebiger Spaltgeometrie. Dissertation Universität Rostock 1980.
- [5] Radev, Nedyalko: Individuelle Anpassung von CAD-Systemen und Modellierung eines Pre-Prozessors für spezielle Berechnungs-Software. Dissertation Universität Rostock 2006.
- [6] Kreja, Sven-Uwe: Analyse und Bewertung von Berechnungs- und Konstruktionsmethoden für hydrostatische Radialgleitlager. Diplomarbeit, Uni. Rostock, 2007.
- [7] Wegmann, Roland; Brökel, Klaus: Aktuelle Probleme der numerischen Simulation des hydrodynamischen und hydrostatischen Verhaltens von Spaltströmungen. in Brökel, Feldhusen, Grote, Rieg, Stelzer (Hrsg): 6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2008 / Nachhaltige und effiziente Produktentwicklung. Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik, Shaker Verlag, Aachen, 2008. S.291-303 ISBN: 978-3-8322-7544-0. http://www.rolandwegmann.de/aachen_kt2008/
- [8] Gnuplot Version 4.2.3 <http://www.gnuplot.info>, 2008.

