

VDI-Wissensforum

Moderne Gleitlager

Vortrag

3-dimensionale hydrodynamische Gleitlager

Ingenieurbüro Dr.-Ing. Martin Berger

Akazienweg 12

75038 Oberderdingen

Tel.: +49 (0)7258 92 64 81

Fax.: +49 (0)7258 92 64 82

E-mail: martin.berger@tribodoc.de

www.tribodoc.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	2
2. Stand der Technik.....	2
3. Berechnung 3-dimensionaler hydrodynamischer Tragfähigkeiten.....	2
4. Bestimmung des Reibungsverhaltens.....	5
5. Beschreibung der Tragfähigkeit mittels Kennfelder.....	5
6. Das konkave Lager.....	6
7. Gegenüberstellung mit existierenden Lagerlösungen.....	8
8. Zusammenfassung.....	10
9. Verwendete Literatur.....	10
10. Tabelle der Bezeichner.....	11

1. Einleitung

Hydrodynamische Gleitlager werden in vielen Bereichen des Maschinenbaus eingesetzt. Vorzugsweise dann, wenn eine hohe Laufruhe, oder im stationären Betrieb eine große Lebensdauer erreicht werden soll. Auch dynamische Belastungen lassen sich mit dieser Lagervariante beherrschbar realisieren, wie z.B. von Kolbenmaschinen her bekannt ist. Die Übertragung der Kräfte erfolgt dabei über eine ausreichend dicke Schmierstoffschicht, welche die Gleitpartner vollständig voneinander trennt. Die dabei erzeugte Reibung findet als reine Flüssigkeitsreibung nur im Schmierstoff statt. Den Konstrukteuren werden über Richtlinien und Normen zwei grundsätzliche Bauformen dieses Maschinenelements zur Verfügung gestellt. Lager für radiale und axiale Lasten. Ein Radiallager kann 2-dimensionale Tragkräfte in Kombination aus horizontaler und vertikaler Richtung realisieren. Eine dritte Krafrichtung in axiale Richtung kann über verschiedene Varianten von Axialgleitlagern erzeugt werden. Besteht die Aufgabe darin eine schräge Last zu lagern, welche über alle drei Krafrichtungen definiert ist, müssen die beiden Lagerbauformen entsprechend miteinander kombiniert werden. Dieser Vortrag befasst sich mit hydrodynamischen Gleitlagern, welche aufgrund ihrer Geometrie, 3-dimensionale hydrodynamische Tragfähigkeiten erzeugen.

2. Stand der Technik

Wird im Maschinenbau die Forderung gestellt, schräge Lasten zu lagern, kommen verschiedene Konzepte und Lagerarten zum Einsatz. Werden Wälzlager eingesetzt, stehen einige Varianten zur Verfügung. Z.B. werden verschiedene Axialwälzlager (Kugel, Zylinderrollen, Pendelrollen) mit Rillenkugellagern kombiniert, oder es werden Schrägkugellager bzw. Kegelrollenlager eingesetzt. Wird die Aufgabe mit Gleitlagern gelöst, kommen kombinierte Axial-Radialgleitlager wie in Abb.1 dargestellt oder Bundlager zum Einsatz. Die Radial- und Axialgleitlagerung wird dabei getrennt voneinander betrachtet und ausgelegt. Eine Gleitlagerlösung bestehend aus nur einem Bauteil, vergleichbar mit einem Schrägkugellager, gehört nicht zum Stand der Technik.

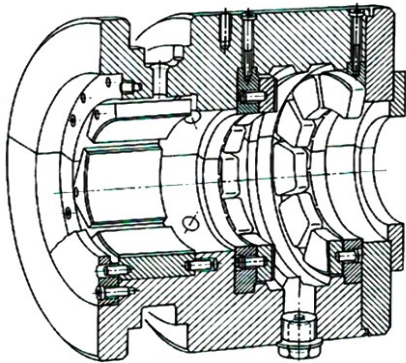


Abb.:1 Kombiniertes Axial-Radialgleitlager

3. Berechnung 3-dimensionaler hydrodynamischer Tragfähigkeiten

Die Basis zur Berechnung hydrodynamischer Drücke in einem Gleitlager bildet die Reynoldssche Differentialgleichung. Nachfolgend ist eine dimensionslose Form dargestellt, welche numerisch gelöst wird.

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left(\frac{\tilde{h}^3}{\tilde{\eta}} \cdot \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} \right) + \frac{1}{B^{*2}} \cdot \frac{\partial}{\partial \tilde{z}} \left(\frac{\tilde{h}^3}{\tilde{\eta}} \cdot \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{z}} \right) = \frac{6 \cdot U_h^*}{\tilde{\eta}} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{x}} + \frac{6 \cdot W_h^*}{B^* \cdot \tilde{\eta}} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{z}} - \frac{12 \cdot V_h^*}{\tilde{\eta}} \cdot \cos(\tilde{x})$$

Diese partielle DGL berechnet für eine örtliche vorgegebene Spalthöhe h , einer Viskosität η und den hydrodynamisch wirksamen Geschwindigkeiten einen hydrodynamische Druckverteilung $p_{(x,z)}$. Sie stellt die Basis zur Bestimmung der

Tragfähigkeit, der Lastrichtungen, des Reibungsverhaltens und des Schmierstoffbedarfs dar. Werden 3-dimensionale Geometrien zur Erzeugung einer räumlichen Tragfähigkeit gebildet, muss diese ebenfalls Gültigkeit besitzen.

Die Lagergeometrie hydrodynamischer Gleitlager wird in der Regel mit dimensionslosen Kennwerten beschrieben. Anschließend werden Kennzahlen vorgestellt mit denen sich die geometrischen Verhältnisse 3-dimensionaler Lager beschreiben lassen, und diese bekannten Kennzahlen zylindrischer Gleitlager gegenübergestellt.

Tabelle 1. Kennzahlen zur Beschreibung der geometrischen Gegebenheiten

DIN31652 / VDI2204	3D-Lager	Anmerkung
$B^* = \frac{B}{D}$	$B^* = \frac{S}{D_q}$	geht für eine zylindrische Form in die DIN/VDI über
$\psi = \frac{C}{D}$	$\psi = \frac{C_{rad}}{D_q}$	geht für eine zylindrische Form in die DIN/VDI über
$e^* = \frac{e \cdot 2}{C} = 1 - h_{min}^*$	$e_{rad}^* = \frac{e_{rad} \cdot 2}{C_{rad}}$	Zusammenhang $e^* \leftrightarrow h_{min}^*$ besteht nicht mehr
nicht definiert	$e_{ax}^* = \frac{e_{ax} \cdot 2}{C_{rad}}$	beschreibt die Auslenkung in axialer Richtung
$h_{min}^* = \frac{h_{min} \cdot 2}{C}$	$h_{min}^* = \frac{h_{min} \cdot 2}{C_{rad}}$	geht für eine zylindrische Form in die DIN/VDI über

Mit diesen Kennzahlen lassen sich die Lager geometrisch beschreiben.

Die numerische Berechnung 3-dimensionaler Geometrien geschieht grundsätzlich nach der gleichen Methode, wie dies von Radialgleitlagern her bekannt ist:

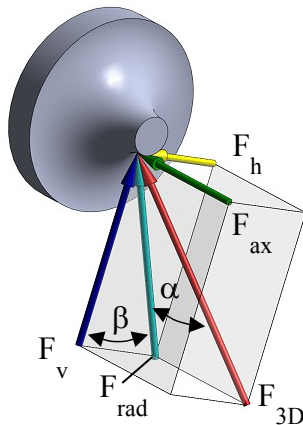
1. Definieren einer Geometrie für Welle und Lager
2. Festlegen einer relativen Position mit (e_{rad}^* ; e_{ax}^*) von Welle zu Lager
3. Berechnen der örtlichen Spalthöhen und Geschwindigkeiten
4. Lösen der Reynoldsschen Differentialgleichung
5. Berechnen der Lagerkenngrößen

Die Unterschiede zu bestehenden Lagergeometrien (z.B. zylindrische Lagerbuchse) bestehen darin, dass die Spaltgeometrie 3-dimensionaler Lager über drei Achsen definiert wird und eine Abhängigkeit von der axialen Komponente e_{ax}^* besitzt. Wird diese berücksichtigt und so eine hydrodynamische Druckverteilung berechnet, kann das Betriebsverhalten beschrieben und ausgewertet werden. Die dazu nötigen Kennzahlen werden anschließend kurz vorgestellt.

Die Tragfähigkeit eines Gleitlagers ergibt sich aus dem Integral des Drucks über die zu integrierende Oberfläche:

$$F = \iint_A p \, dA$$

Die Kraftkomponenten in vertikaler, horizontaler und axialer Richtung werden für die verschiedenen Richtungen ebenfalls aus den Integralen mit den entsprechenden Winkelbeziehungen ermittelt (siehe Abb.2).



$$F_{ax} = \iint_A p \cdot \sin(\kappa) \, d\tilde{x} \, dz$$

$$F_v = \iint_A p \cdot \cos(\kappa) \cdot \cos(\tilde{x}) \, d\tilde{x} \, dz$$

$$F_h = \iint_A p \cdot \cos(\kappa) \cdot \sin(\tilde{x}) \, d\tilde{x} \, dz$$

Abb.:2 Kraftkomponenten

Mit diesen Kraftkomponenten kann das räumliche Tragvermögen eines 3-dimensionalen Lagers berechnet werden. Die Tragfähigkeiten lassen sich z.B. mit der bekannten Sommerfeldzahl beschreiben. Diese muss jedoch leicht modifiziert werden, damit die geometrischen Eigenheiten einer 3-dimensionalen Geometrie berücksichtigt werden können. Anstelle der Lagerbreite B kommt die Bogenlänge S der tragenden Kontur zum Einsatz und der Lagerdurchmesser D wird durch den mittleren Durchmesser D_q ersetzt. Dies hat den Vorteil, dass kreiszylindrische Lager als Sonderfall betrachtet werden können. In diesem Fall geht $S \rightarrow B$ und $D_q \rightarrow D$ über. Man erhält dann die bekannte Sommerfeldzahl.

Wie von zylindrischen Gleitlagern her bekannt, wird die resultierende radiale Tragkraft aus den horizontalen und vertikalen Kraftkomponenten berechnet.

$$F_{rad} = \sqrt{F_v^2 + F_h^2} \quad So_{rad} = \frac{F_{rad} \cdot \psi^2}{S \cdot D_q \cdot \eta \cdot \omega}$$

Die Tragfähigkeitskennzahl in axialer Richtung berechnet sich aus der axialen Kraftkomponente:

$$So_{ax} = \frac{F_{ax} \cdot \psi^2}{S \cdot D_q \cdot \eta \cdot \omega}$$

Die resultierende 3-dimensionale Tragfähigkeit ergibt sich dann aus der vektoriellen Summe der axialen und radialen Kraftkomponenten:

$$F_{res} = \sqrt{F_{rad}^2 + F_{ax}^2} \quad So_{3D} = \frac{F_{res} \cdot \psi^2}{S \cdot D_q \cdot \eta \cdot \omega}$$

Die entsprechenden Lastrichtungen lassen sich über den Arcus Tangens bestimmen:

$$\text{radiale Richtung:} \quad \beta = \arctan \frac{F_h}{F_v}$$

$$\text{axiale Richtung:} \quad \alpha = \arctan \frac{F_{ax}}{F_{rad}}$$

Somit sind sowohl die Richtungen als auch die Tragfähigkeiten bekannt und können für die Lagerauslegung und die weiteren Betrachtungen herangezogen werden.

4. Bestimmung des Reibungsverhaltens

Das Reibungsverhalten wird wieder mit einer Kennzahl beschrieben (siehe DIN 31652 bzw. VDI 2204). Diese Kennzahl berechnet sich aus dem Integral der Reibungsschubspannungen über die genutzte 3-dimensionale Oberfläche des Lagers.

$$f^* = \frac{\mu}{\psi} = \frac{1}{So \cdot 4} \cdot \iint_A \left(\frac{\tilde{h}}{2} \cdot \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} + \frac{U_h^*}{\tilde{h}} \right) d\tilde{x} d\tilde{z}$$

Anmerkung:

Zur vollständigen Beschreibung wären weitere Kennzahlen nötig. Dies würde jedoch den Rahmen dieses Vortrags überschreiten, weshalb hierauf verzichtet wird.

5. Beschreibung der Tragfähigkeit mittels Kennfelder

Wird, wie unter Punkt 3 beschrieben, die hydrodynamische Druckverteilung berechnet, erhält man für die jeweilige Lagergeometrie die entsprechenden Druckverläufe (siehe Beispiel Abb.: 5). Daraus lassen sich dann weitere gleitlagerspezifische Kenngrößen ermitteln. Werden die Tragfähigkeitskennwerte So_{3D} , α , β und die relativen minimalen Schmierstalthöhen h_{min}^* berechnet, lässt sich für eine axiale Position (z.B. $e_{ax}^* = 0$) daraus folgendes Diagramm erstellen.

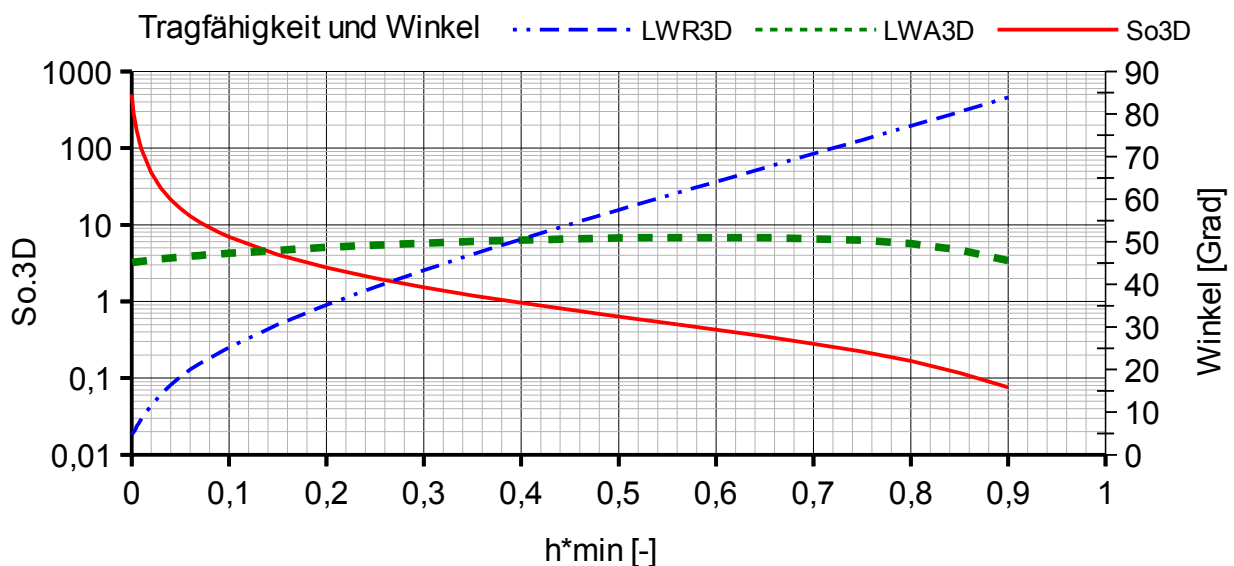


Abb.:3 Sommerfeldzahl und Verlagerungswinkel eines 3-dimensionalen-Lagers

Dargestellt ist ein typischer Verlauf einer 3-dimensionalen Lagergeometrie. Die Tragfähigkeit, ausgedrückt durch die Sommerfeldzahl So_{3D} , steigt mit abnehmender relativer Schmierstalthöhe progressiv an. Der Verlauf des Lastverlagerungswinkels $LWR3D = \beta$ hat ebenfalls einen typischen Verlauf, wie er von 360°-Lagern her bekannt ist (Gümbelkurve). Im weiteren Verlauf wird eine rotationssymmetrische Geometrie betrachtet. Der β -Verlauf ist immer ähnlich und beinhaltet wenig neue Informationen. Wegen einer besseren Übersichtlichkeit wird das β -Verhalten deshalb nicht weiter diskutiert und dargestellt.

Neu hinzugekommen ist die Krafrichtung in axialer Richtung $LWA3D = \alpha$. Diese ist für die Funktionsweise einer 3-dimensionalen Gleitlagergeometrie von zentraler Bedeutung, weshalb diese in den Focus der Betrachtungen genommen wird.

Vorher werden noch die Darstellungsmöglichkeiten des Betriebsverhaltens mittels Kennfelder angesprochen. Für den sinnvollen Einsatz solcher Lager benötigt man Mittel und Methoden, womit sich diese auslegen lassen. Eine anschauliche Möglichkeit bieten Kennfelder. Diese können das Betriebsverhalten abbilden und eine Bewertung der technischen Nutzbarkeit zulassen. Tragfähigkeitskennfelder 3-dimensionaler Gleitlager müssen einige Bedingungen erfüllen und eindeutige Informationen zur Verfügung stellen. Aus dieser Notwendigkeit heraus lassen sich Bedingungen formulieren, welche die Zusammenhänge der geometrischen Gegebenheiten zu den Betriebskennwerten herstellen:

1. Aus jeder geometrischen Position der Welle innerhalb des Lagers, beschrieben durch e_{rad}^* und e_{ax}^* , ergibt sich eine relative minimale Schmierstathöhe, h_{min}^* , eine Tragfähigkeit So_{3D} und die zugehörigen Lastwinkel α und β
2. Ist ein 3-dimensionaler Belastungskennwert So_{3D} oder α und die axiale Position e_{ax}^* festgelegt, müssen sich daraus die anderen Größen ergeben und den Betriebszustand eindeutig beschreiben z.B.:
 - Vorgabewerte So_{3D}, e_{ax}^* $\leftrightarrow h_{min}^*, \alpha, \beta$ sind festgelegt
 - Vorgabewerte α, e_{ax}^* $\leftrightarrow h_{min}^*, So_{3D}, \beta$ sind festgelegt

Damit kann das Betriebsverhalten 3-dimensionaler-Lager diskutiert werden.

6. Das konkave Lager

Das Betriebsverhalten eines 3-dimensionalen-Gleitlagers soll anhand einer konkaven Lagerschale dargestellt werden.

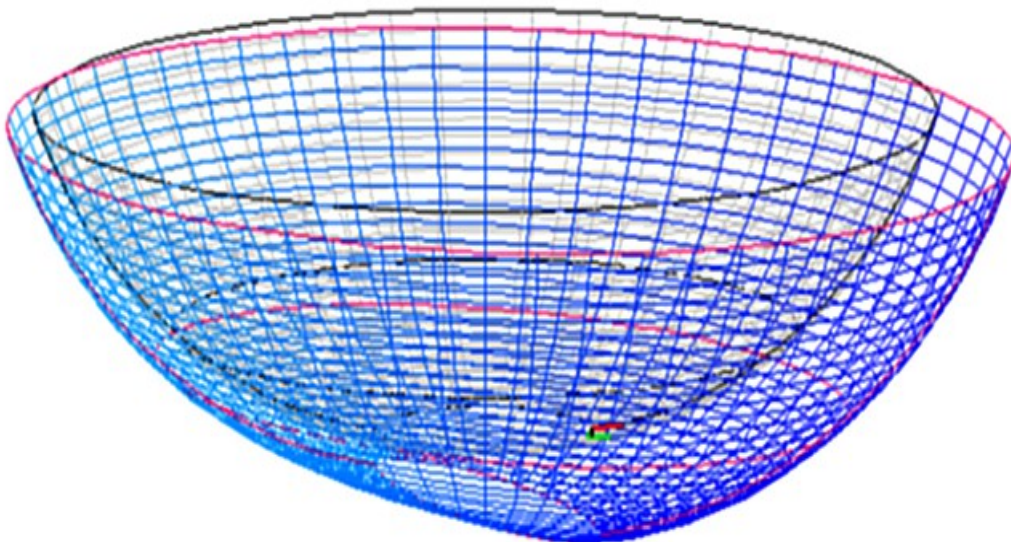


Abb.:4 Konkave Lagerschale mit Gegenkörper (dimensionslose Darstellung)

Damit die spezifischen Eigenschaften dieser Lagergeometrie untersucht werden können, berechnet man nach den Berechnungsansätzen aus Kapitel 3 die entsprechenden Tragfähigkeiten und Lastrichtungen. Dazu wird die axiale Position konstant gehalten ($e_{ax}^* = \text{const.}$) und die radiale Exzentrizität (z.B. $e_{rad}^* \rightarrow 0,1 \dots 0,995$) variiert. Dieser Lagertyp erzeugt damit z.B. die folgenden hydrodynamischen Druckverteilungen.

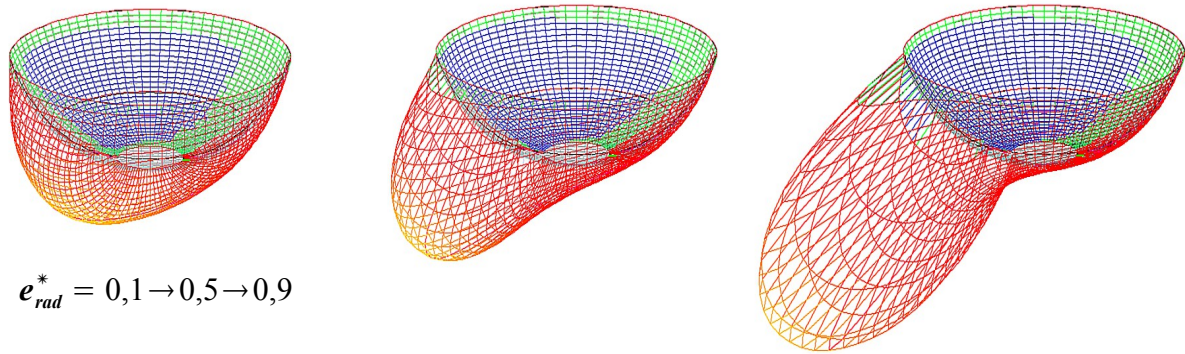


Abb.:5 Druckverläufe einer konkaven Lagerschale

Ein Kennfeld zur Beschreibung des Betriebsverhalten entsteht, wenn die axiale Position ebenfalls variiert wird ($e_{ax}^* = -0,05 \dots 0,1 \neq \text{const.}$). Das so erzeugte Tragfähigkeitskennfeld wird anschließend betrachtet (darin bedeutet: $Wax_{xx} = \alpha$, $So_{xx} = So_{3D}$):

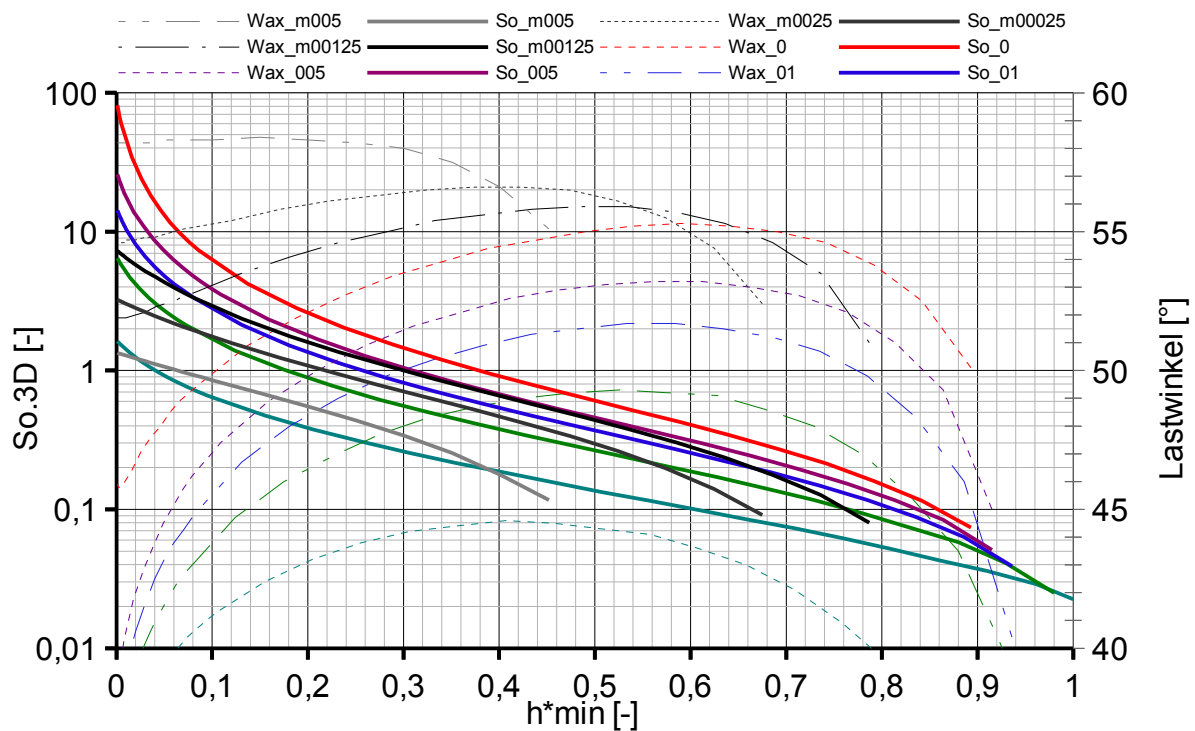


Abb.:6 Tragfähigkeitskennfeld einer konkaven Lagerschale

Die Tragfähigkeit variiert abhängig von der axialen Position des Rotors. Zu jeder axialen Position, gehört ein unterschiedlicher Tragfähigkeits- und Lastwinkelverlauf.

Diese Geometrie besitzt ein Tragfähigkeitsmaximum bei $e_{ax}^* = 0$ (roter Graph). In dieser axialen Lage werden die größten hydrodynamischen Tragfähigkeiten erzeugt. Ein solches Verhalten gilt es bei der Auslegung solcher Maschinenelemente zu berücksichtigen.

Dieses Lager würde man z.B. für einen Lastwinkelbereich von $\alpha = 45^\circ$ bis 55° vorsehen.

Aus dem Kennfeld lässt sich die geometrische Lage (h_{min}^* , e_{ax}^*) und die Lastrichtung α eindeutig bestimmen. Die minimale Schmierstathöhe kann dann mit Richtwerten zur Überprüfung der Betriebssicherheit z.B. $h_{min.lim}^*$ verglichen werden.

Das Reibungsverhalten der konkav gekrümmten Lagerschale stellt sich wie folgt dar:

Reibungskennzahl (konkav, $B^*=0,748$)

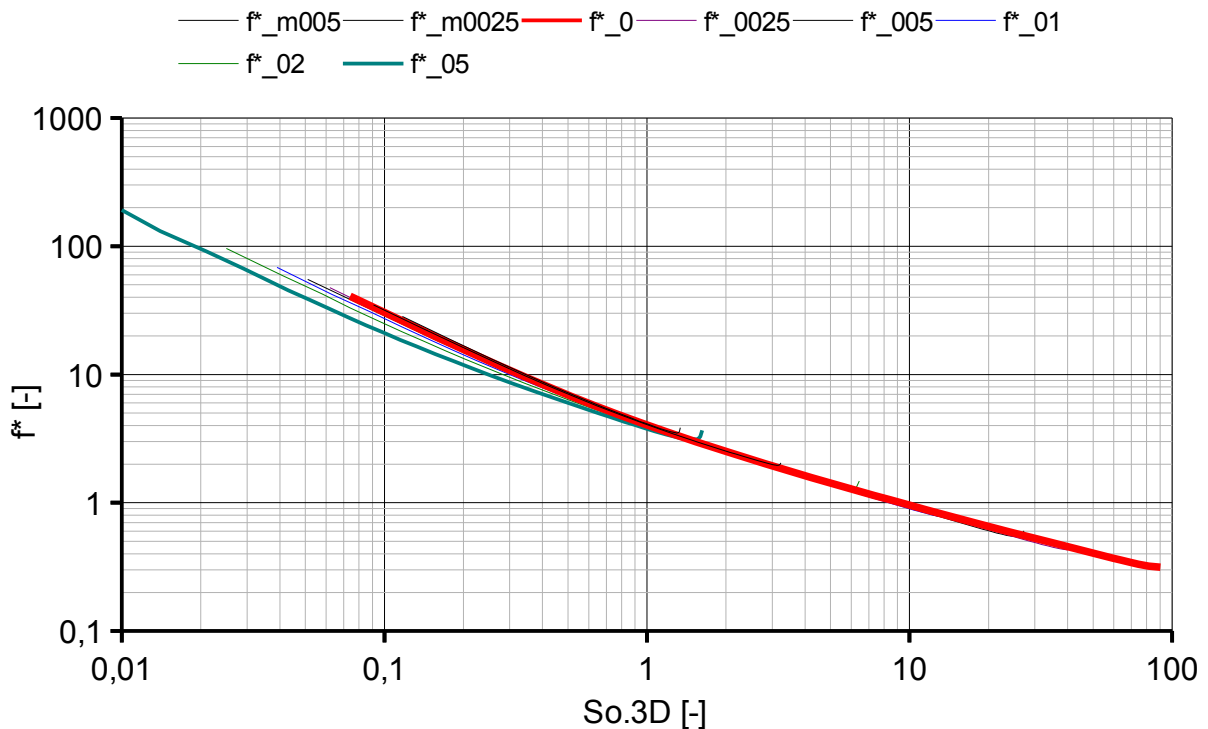


Abb.:7 Reibungskennzahl f^* einer konkaven Lagerschale

Die Reibungskennzahl f^* variiert für unterschiedliche axialen Positionen ($e_{ax}^* = -0,05 \dots 0,5$) nur unwesentlich. Die einzelnen Graphen liegen sehr dicht nebeneinander und überlagern sich teilweise. Da es sich wie anfänglich beschrieben um reine Flüssigkeitsreibung handelt, ist dieses Verhalten nachvollziehbar. Das Niveau der Reibungskennzahl ist mit dem eines zylindrischer Gleitlagers vergleichbar (siehe auch DIN 31 652; 360°-Lager; $B^*=0,75$).

7. Gegenüberstellung mit existierenden Lagerlösungen

In diesem Kapitel wird das Betriebsverhalten eines 3-dimensionalen hydrodynamischen Gleitlagers, mit bekannten Lagerlösungen verglichen werden. Dazu wird ein fiktiver Belastungsfall durchgerechnet, der es ermöglicht, eine Gleitlagervariante nach dem Stand der Technik, Wälzlager und die vorher vorgestellten konkave Geometrie gegenüberzustellen. Ausgangspunkt soll ein Berechnungsbeispiel aus der DIN 31653 (Beispiel A.2: Axialgleitlager mit 24 Keilflächensegmenten) sein. Damit eine schräge Last als Vorgabe des Vergleichs herangezogen werden kann, wurde der dort vorgestellte Belastungsfall um eine entsprechende Radiallast ergänzt und somit ein Lastwinkel von $\alpha = 50^\circ$ erzeugt. Damit ist es möglich, die Kennwerte der Lagerschale aus Abb. 6 zu nutzen. Für die Gleitlagerlösungen wurde die Vorgabe gemacht, dass die Schmierstoffviskosität gleich ist. Die Wälzlagerlösungen erhielten die Vorgaben, dass der Bauraum der Lager ähnlich der Gleitlagervariante ist und eine Lebensdauer von mindestens 10000 h erreicht wird. Dies entspricht einer Gebrauchsdauer von ca. 1,5 Jahren, wenn die Lagerung 7 Tage die Woche, 24 Stunden lang betrieben wird.

Tabelle.:2 Gegenüberstellung bekannter Lagerlösungen

$F_{3D} = 52216 \text{ N}$ $\alpha = 50^\circ$ $n = 1000 \text{ min}^{-1}$	Gleitlager DIN 31653/2¹⁾ axial+radial [mm]	Wälzlager DIN 625/711 axial+radial [mm]	Kegelrollen- lager²⁾ DIN 720 [mm]	3D-Gleitlager Konkav [mm]	
Axiallast $F_{ax} = 40000 \text{ N}$	z = 24 Keilflächen $D_i = 280$ $D_a = 380$	Typ 51160 $D_i = 300$ $D_a = 380$ $H = 62$	Typ 32040X $D_i = 200$ $D_a = 310$ $B = 70$	$D_i = 62$ $D_a = 258$ $B = 73$	$D_i = 42$ $D_a = 174$ $B = 50$
Radiallast $F_{rad} = 33564 \text{ N}$	360°-Lager $D_B = 270$ $B = 90$	Typ 6056 $D_i = 280$ $D_a = 420$ $B = 65$		$D_q = 169$ $S = 127$	$D_q = 114$ $S = 86$
$C_{rad} \text{ [mm]}$	0,405	0,08	0	0,204	0,138
$h_{min} \text{ [}\mu\text{m]}$	21,4	Wälzkontakt	Wälzkontakt	21,4	10,0
$L_h (7/24)$	>>	$\approx 10000 \text{ h}$		>>	
Reibungszahl	0,0062/0,0042	0,0013/0,0015	0,0015	0,0036	0,0021
$P_{f,axial/radial} \text{ [W]}$	4130/1993	926/923	-	-	-
$P_{f,ges} \text{ [W]}$	6123	1848	1046	1555	548
spez. Leistung [W/mm ²]	0,058	0,016	0,019	0,026	0,021
Leistungsbedarf	100 % ¹⁾ (585%)	30% (177%)	17% (100%) ²⁾	25% (149%)	9% (52%)

Aus diesen Berechnungen heraus ergibt sich im direkten Vergleich des Leistungsbedarfs von 3-dimensionalem Gleitlager zum erweiterten Beispiel aus der DIN31652 ein erheblicher Unterschied. Der Bedarf an Antriebsleistung um die Reibung zu überwinden ist beim 3D-Gleitlager nur $\frac{1}{4}$ so groß. Dieser positive Effekt ergibt sich aus der kleineren Reibung, den Durchmessern und den damit verbundenen geringeren Gleitgeschwindigkeiten. Die Betriebssicherheit ausgedrückt durch die minimale Schmierstalthöhe bleibt dabei gleich (Vorgabe für die Gegenüberstellung).

Über die Baugröße des Lagers kann eine weitere Optimierung erfolgen. Werden z.B. kleinere Schmierstalthöhen zugelassen, kann sogar der Leistungsbedarf von Wälzlager unterschritten werden. Die dabei erzielbare Lebensdauer sollte, durch den angestrebten Zustand der Flüssigkeitsreibung, in der für Gleitlager üblichen Größenordnung liegen.

Weitere Möglichkeiten das Betriebsverhalten zu optimieren ergeben sich durch die Wahl eines anderen Schmierstoffs oder einer anderen 3-dimensionalen Geometrie.

8. Zusammenfassung

Vorgestellt wurde eine Methode zur Berechnung, Darstellung und Bewertung von 3-dimensionalen Gleitlagern. Anhand eines Beispiels wurde gezeigt, dass entsprechende Geometrien 3-dimensionale Tragfähigkeiten erzeugen können. Die Basis für eine numerische Berechnung solcher Gleitlager bildet die Reynoldssche Differentialgleichung. Mit dieser lässt sich numerisch eine hydrodynamische Druckverteilung berechnen, welche zur Bestimmung weiterer Lagerkennzahlen genutzt wird. Die prinzipielle Vorgehensweise ist mit der von zylindrischen Gleitlagern identisch. Der Unterschied besteht in den Ergebnissen. Hier gilt es die zusätzliche axiale Kraftkomponente zu berücksichtigen. Das Betriebsverhalten lässt sich mit leicht modifizierten Lagerkennzahlen wie z.B. nach DIN 31652 oder VDI2204 beschreiben. Auf der Basis dieser numerischen Berechnungen lassen sich Kennfelder zur Beschreibung des 3-dimensionalen Betriebsverhaltens erstellen. Damit ist eine Bewertung zur Eignung der gewählten Geometrie und eine Auslegung solcher Lager möglich. Die erzielbaren schrägen Tragfähigkeiten bewegen sich in der gleichen Größenordnung wie sie von Radialgleitlagern her bekannt sind. Jedoch gibt es je nach gewählter Geometrie einiges zu beachten. z.B. kann ein solches Lager abhängig von der axialen Position ein Tragfähigkeitsmaximum besitzen. Das Niveau der Reibung solcher Lager befindet sich, da es sich um Flüssigkeitsreibung handelt, in der gleichen Größenordnung wie bei Radialgleitlagern mit äquivalenter Scherfläche.

9. Verwendete Literatur

- Bartsch, H.J.: Taschenbuch Mathematischer Formeln 13. Aufl.
Thun und Frankfurt/Main: Verlag Harri Deutsch 1990
- Berger, M.: Numerische Lösung der Reynoldsschen Differentialgleichung
zur Berechnung von Gleitlagerdaten
Diplomarbeit Fachhochschule Düsseldorf 1995
- Beitz,W;Küttner, K.-H.: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau
Springer Verlag: Berlin, Heidelberg 1990
- Engeln-Müllges, G;
Reuter,F.: Numerik-Algorithmen 8.Auflage
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1996
- DIN 31 651-4 DIN-Taschenbuch 198, Gleitlager 2
Beuth Verlag GmbH: Berlin, Köln 1991
- VDI 2204 Auslegung von Gleitlagern Blatt 1-2

10. Tabelle der Bezeichner

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit
Lastverlagerungswinkel axial	α	Grad
Lagerbreite	B	m
Lastverlagerungswinkel radial	β	Grad
relative Lagerbreite	B^*	-
Lagerspiel	C	m
Lagerspiel radial bei $e_{ax}^* = 0$	C_{rad}	m
Lagerdurchmesser	D	m
mittlerer Lagerdurchmesser	D_q	m
relative Verlagerungen axial	e_{ax}^*	-
relative Exzentrizität radial	e_{rad}^*	-
Auslenkung axial	e_{ax}	m
Auslenkung radial	e_{rad}	m
Reibungskennzahl nach DIN 31652	f^*	-
axiale Kraftkomponente	F_{ax}	N
horizontale Kraftkomponente	F_h	N
radiale Kraftkomponente	F_{rad}	N
resultierende Kraftkomponente	F_{res}	N
vertikale Kraftkomponente	F_v	N
örtliche dynamische Schmierstoffviskosität	η	Pa s
örtliche Schmierpalhöhe	h	m
relative minimale Schmierpalhöhe	h_{min}^*	-
örtlicher Druck	p	N/m ²
Bogenlänge der Lagerkontur	S	m
3-dimensionale Sommerfeldzahl	So_{3D}	-
axiale Sommerfeldzahl	So_{ax}	-
radiale Sommerfeldzahl	So_{rad}	-
Gleitgeschwindigkeit in Umfangsrichtung	U	m/s
Gleitgeschwindigkeit in Spalthöhenrichtung	V	m/s
Gleitgeschwindigkeit in axialer Richtung	W	m/s
Winkelgeschwindigkeit	ω	1/s
Koordinate in Umfangsrichtung	x	m
Winkelkoordinate in Umfangsrichtung	\tilde{x}	-
relatives Lagerspiel nach DIN 31652	ψ	-
relatives Lagerspiel bei $e_{ax}^* = 0$	ψ_{rad}	-
Koordinate in Breitenrichtung	z	m
Dimensionslose Koordinate in Breitenrichtung	\tilde{z}	-
örtlicher Normalenwinkel	κ	Grad
Reibungszahl	μ	-