

Berechnung 3-dimensionaler hydrodynamischer Tragfähigkeiten für Gleitlager

erschienen bei der GFT-Tribologie-Fachtagung
30.09 - 2.10.2013 in Göttingen

Von: Martin Berger

Kurzfassung:

Hydrodynamische Gleitlager werden auf der Basis von Kennfeldern ausgelegt. Die Berechnungsgrundlage dazu bildet die Reynoldssche Differentialgleichung, welche numerisch gelöst wird, um daraus dimensionslose Kennzahlen zu ermitteln. Diese werden in Auslegungsrichtlinien, z.B. nach DIN 31652 oder VDI 2204, zur Verfügung gestellt und der Konstrukteur kann damit dieses Maschinenelement auslegen. Grundsätzlich gibt es zwei Lagerbauformen um Tragkräfte in radialer und axialer Richtung zu realisieren. Axial- und Radialgleitlager in diversen Ausführungen. z.B. als Kippsegmentlager, segmentierte Ausführungen oder einfache 360°-Lagerbuchse. Treten in einer Anwendung schräge Lasten, also eine Kombination aus radialer und axialer Last auf, so werden diese beiden Bauarten entsprechend kombiniert, oder wenn dies konstruktiv nicht möglich ist, kommen z.B. Schrägkugellager zum Einsatz.

Vorgestellt wird eine Berechnungs- und Darstellungsmethode für hydrodynamische Gleitlager, die aufgrund ihrer Geometrie Lasten in radialer und axialer Richtung realisieren können. Solche Gleitlager besitzen eine zusätzliche Dimension und können 3-dimensionale Lasten tragen. Die hydrodynamische Druckverteilung solcher Geometrien wird an zwei Beispielen vorgestellt und die Möglichkeiten, welche sich daraus ergeben diskutiert. Die Kennzahlen zur Auslegung werden auf Basis der Reynoldsschen Differentialgleichung ermittelt. z.B. lässt sich die Tragfähigkeit schräg wirkender Lasten mit leicht modifizierten Sommerfeldzahlen und den entsprechenden Verlagerungswinkeln bzw. Lastwinkeln beschreiben.

Abstract:

Hydrodynamic plain bearings are usually designed with use of performance characteristics and dimensionless numbers. By numerical solving the Reynolds differential equation these numbers are evaluated and described. Engineers make use of these to design the bearing into an application. Typical German design standards are DIN31652 or VDI2204. Basically two types of hydrodynamic bearings are known to realize loads in radial or axial direction. Plain bearings i.e. bushings or segmented versions and plain thrust bearings as segmented pads or with specific groove designs. In case of combined loads, these two types of bearings have to be combined to handle forces in radial and axial direction or sometimes angular ball bearings will be the choice.

Following a calculation and representation method for hydrodynamic geometries capable to handle loads in axial and radial direction by solving the Reynolds equation will be presented. Such a kind of plain bearing has an additional dimension and is capable to handle loads in 3 dimensions. Examples of hydrodynamic pressure distributions and dimensionless numbers to describe the operating performance will be presented and discussed.

1. Einleitung

Hydrodynamische Gleitlager werden in vielen Bereichen des Maschinenbaus eingesetzt. Besonders wenn hohe Anforderungen an die Laufruhe gestellt sind oder im stationären Betrieb eine große Lebensdauer angestrebt wird. Auch pulsierende Belastungen lassen sich mit dieser Lagervariante beherrschbar realisieren, wie z.B. von Kolbenmaschinen her bekannt ist. Dabei werden dem Konstrukteur über Richtlinien und Normen zwei grundsätzliche Bauformen zur Verfügung gestellt. Lager für radiale und axiale Lasten. Das Radiallager kann 2-dimensionale Tragkräfte in Kombination aus horizontaler und vertikaler Richtung tragen. Eine dritte Krafrichtung in axiale Richtung kann über verschiedene Varianten von Axialgleitlagern realisiert werden. Besteht die Aufgabe darin eine schräge Last zu realisieren, welche über drei Krafrichtungen definiert ist, müssen die beiden Lagerbauformen entsprechend miteinander kombiniert werden. Anschließend werden zwei Geometrien betrachtet, die aufgrund ihres Aufbaus 3-dimensionale Lasten realisieren können.

2. Untersuchte Grundformen

Für Grundlagenuntersuchungen ist es sinnvoll, bekannte und relativ einfach herzustellende Geometrien zu wählen. Gewählt wurden daher ein 45°-Kegel-Lager und eine konkav gekrümmte Lagerschale, wie sie beispielsweise von sphärischen Lagerschalen her bekannt ist.

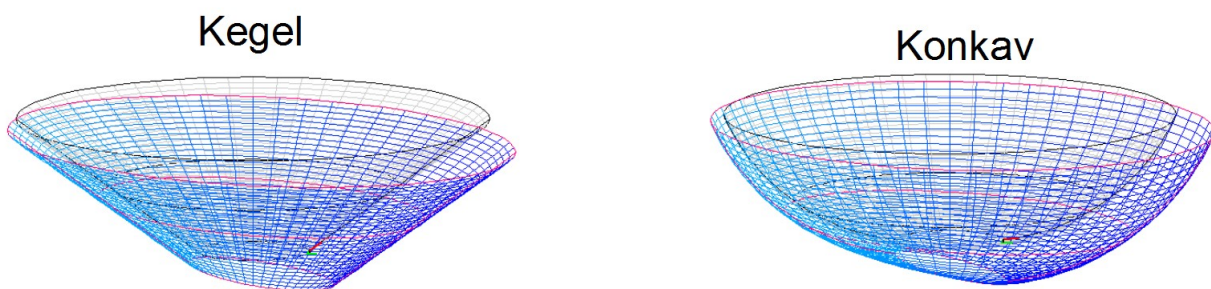


Abb.:1. Grundformen

Bevor jedoch darauf eingegangen wird, welche Tragfähigkeiten diese 3-dimensionalen Grundformen erzeugen können, soll die Herangehensweise zur Ermittlung der Lagerkenndaten erklärt werden.

3. Berechnung 3-dimensionaler Tragfähigkeiten

Die Basis zur Berechnung hydrodynamischer Gleitlager bildet die Reynoldssche Differentialgleichung. Nachfolgend ist eine dimensionslose Form dieser Gleichung dargestellt, welche sich numerisch lösen lässt.

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

Diese partielle DGL berechnet für eine örtliche vorgegebene Geometrie h , einer Fluidviskosität η und bekannten Geschwindigkeiten U, W, V einen hydrodynamischen Druck p . Dieser so berechnete Druck stellt die Basis zur Bestimmung der hydrodynamischer Druckverteilungen dar und wird herangezogen um z.B. die Tragfähigkeit, das Reibungsverhalten oder den Schmierstoffbedarf zu beschreiben. Dazu werden in der Regel dimensionslose Kennzahlen verwendet.

Anschließend werden Kennzahlen vorgestellt mit denen sich die geometrischen Gegebenheiten 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

Die numerische Berechnung 3-dimensionaler Geometrien erfolgt in der gleichen Reihenfolge, wie sie von Radialgleitlagern her bekannt ist:

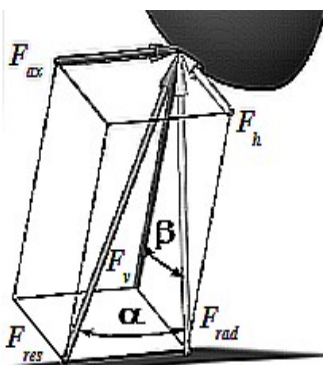
1. Definieren einer Geometrie für Rotor (Welle) und Stator (Lager)
2. Festlegen einer relativen Position (e^*_{rad} ; e^*_{ax}) von Rotor zu Stator
3. Berechnen der örtlichen Spalthöhen und Geschwindigkeiten
4. Lösen der Reynoldsschen Differentialgleichung
5. Berechnen der Lagerkenngrößen

Die Unterschiede bestehen darin, dass die Spaltgeometrie 3-dimensionaler Lager über drei Achsen definiert wird und eine Abhängigkeit von der axialen Komponente e^*_{ax} besitzt. Dieser Einfluss muss berücksichtigt werden.

Wird so eine hydrodynamische Druckverteilung berechnet, kann das Betriebsverhalten ausgewertet werden. Die dazu benötigten Kennzahlen werden anschließend vorgestellt. Die Tragfähigkeit eines Gleitlagers ergibt sich aus dem Integral des Drucks über die zu integrierende 3-dimensionale Oberfläche:

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

Von Interesse sind die Kraftkomponenten in vertikaler, horizontaler und axialer Richtung. Diese Kraftkomponenten werden für die verschiedenen Richtungen über Winkelbeziehungen, siehe Abb.2, ermittelt.



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

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

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

Abb.:2. Kraftkomponenten

Mit diesen Kraftkomponenten kann das Tragvermögen des Lagers beschrieben werden. Die radiale Tragfähigkeit wird mit einer leicht modifizierten Sommerfeldzahl beschrieben. Anstelle der Lagerbreite B kommt hier 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 zylindrische Lager als Sonderfall betrachtet werden können, da in diesem Fall $S \rightarrow B$ und $D_q \rightarrow D$ wird.

Wie bei zylindrischen Gleitlagern üblich, 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 Tragfähigkeit in axialer Richtung berechnet sich wie folgt:

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

Die resultierende 3-dimensionale Tragfähigkeit ergibt sich dann aus der axialen und radialen Kraftkomponente.

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

Die entsprechenden Lastrichtungen lassen sich über den Arcus Tangens bestimmen:

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

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

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 ebenfalls mit einer Kennzahl, in Anlehnung an die genannten Richtlinien, beschrieben. 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:

Damit ein vollständiges Bild mit allen Aspekten einer Lagerauslegung entstehen kann, wäre die Beschreibung weiterer Kennzahlen nötig. Dies würde jedoch den Rahmen dieses Vortrages überschreiten, weshalb hierauf verzichtet werden muss.

5. Das 45°-Kegel-Lager

Wird wie unter Punkt 3 beschrieben verfahren, und bei Vorgabe einer axialen Verschiebung (z.B. $e^*ax=0$) mit unterschiedlichen Exzentrizitäten e^*rad die hydrodynamische Druckverteilung berechnet, erhält man z.B. die folgenden Druckverläufe.

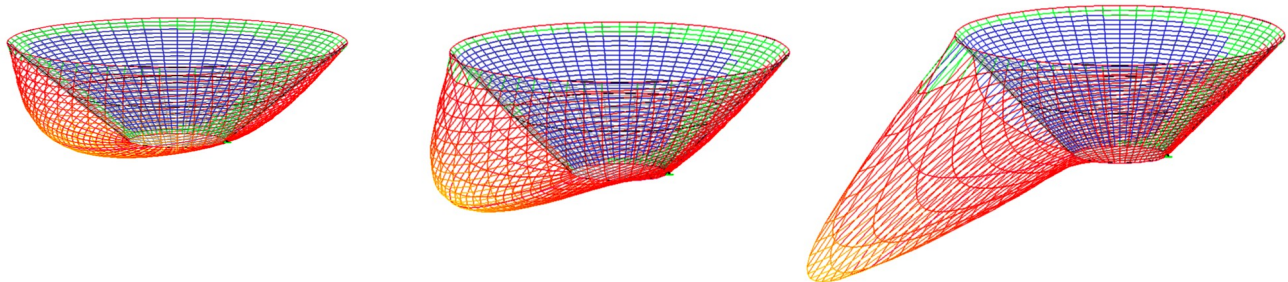


Abb.:3. Druckverläufe 45°-Kegel-Lager unterschiedlicher Exzentrizitäten

Dargestellt sind 3-dimensionale Druckverteilungen unterschiedlicher Relativpositionen von Welle zur Lagerschale. Deutlich zu erkennen ist die schräge hydrodynamische Druckverteilung. Daraus ergeben sich folgende Tragfähigkeitskennwerte.

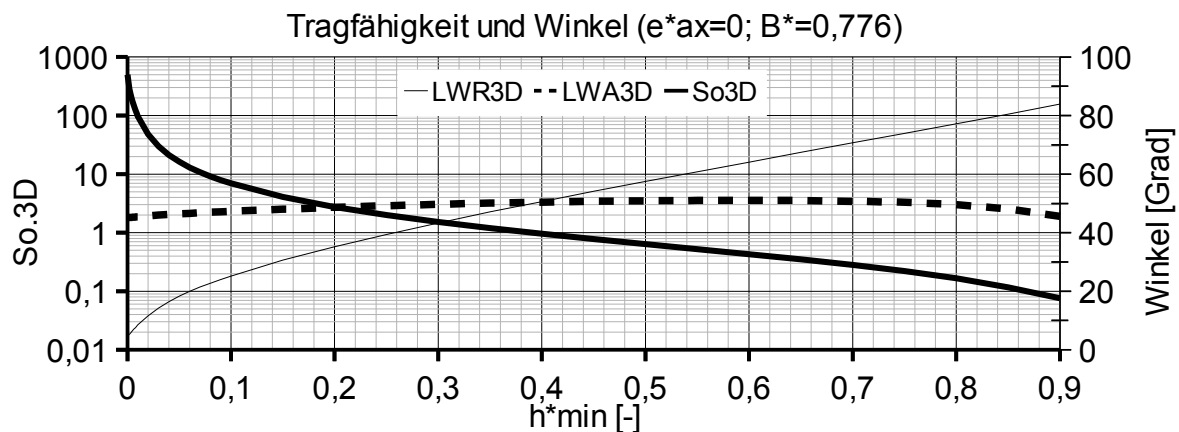


Abb.:4. Sommerfeldzahl und Verlagerungswinkel 45°-Kegel-Lager

Der Verlauf der Sommerfeldzahl ist mit dem eines zylindrischen Lagers sehr ähnlich. Gleiches gilt für den Lastverlagerungswinkel $LWR3D=\beta$. Dieser hat einen typischen Verlauf (siehe auch 360°-Lager). Neu hinzugekommen ist die Krafrichtung in axialer Richtung $LWA3D = \alpha$. Auf diese wird im weiteren Verlauf noch genauer eingegangen. Zunächst soll kurz das Reibungsverhalten angesprochen werden.

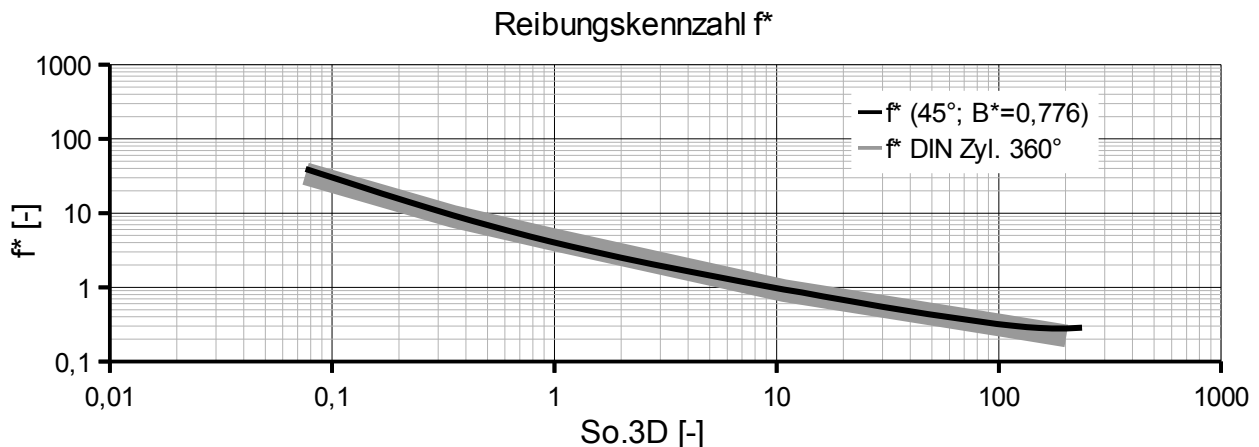


Abb.:5. Reibungskennzahl eines 45°-Kegel-Lagers

Dargestellt ist der Reibungskennzahlverlauf des 45°-Kegel-Lagers im Vergleich mit den Werten nach DIN 31 562 (zyl. 360°-Lager, $B^*=0,75$). Der Verlauf der Kennzahlen deckt sich

relativ gut. Das Reibungsniveau befindet sich demnach in der gleichen Größenordnung. Anschließend soll das Betriebsverhalten 3-dimensionaler Lagergeometrien genauer betrachtet werden. Dazu wird zunächst auf die Darstellungsmöglichkeiten durch Kennfelder eingegangen.

Tragfähigkeitskennfelder 3-dimensionaler Gleitlager enthalten folgende Informationen:

- Jede geometrische Position von Rotor zu Stator, beschrieben durch e^*rad und e^*ax , ergibt eine relative minimale Schmierstalthöhe h^*min , eine Tragfähigkeit $So3D$ und den zugehörigen Lastwinkel α .
- Legt man einen Auslegungsparameter und die axiale Position fest, müssen sich daraus die anderen Größen ergeben und den Betriebszustand eindeutig beschreiben z.B.:
 - Vorgabewerte $So3D, e^*ax$ $\leftrightarrow h^*min, \alpha$ sind festgelegt
 - Vorgabewerte α, e^*ax $\leftrightarrow h^*min, So3D$ sind festgelegt

Damit kann das 45°-Kegel-Lager Kennfeld diskutiert werden. Der Verlagerungswinkel β , verhält sich wie von zylindrischen Lagern her bekannt und wird wegen einer besseren Übersichtlichkeit nicht dargestellt und diskutiert.

Werden unter Vorgabe verschiedener axialer Positionen die Tragfähigkeitskennzahlen und Lastwinkel berechnet, ergibt sich daraus folgendes Bild. Dabei sind die einzelnen Graphen den jeweiligen axialen Positionen wie folgt zugeordnet (z.B. bedeutet: $xx_m01 = e^*ax = -0,1$; oder $_p005 = e^*ax = 0,05$).

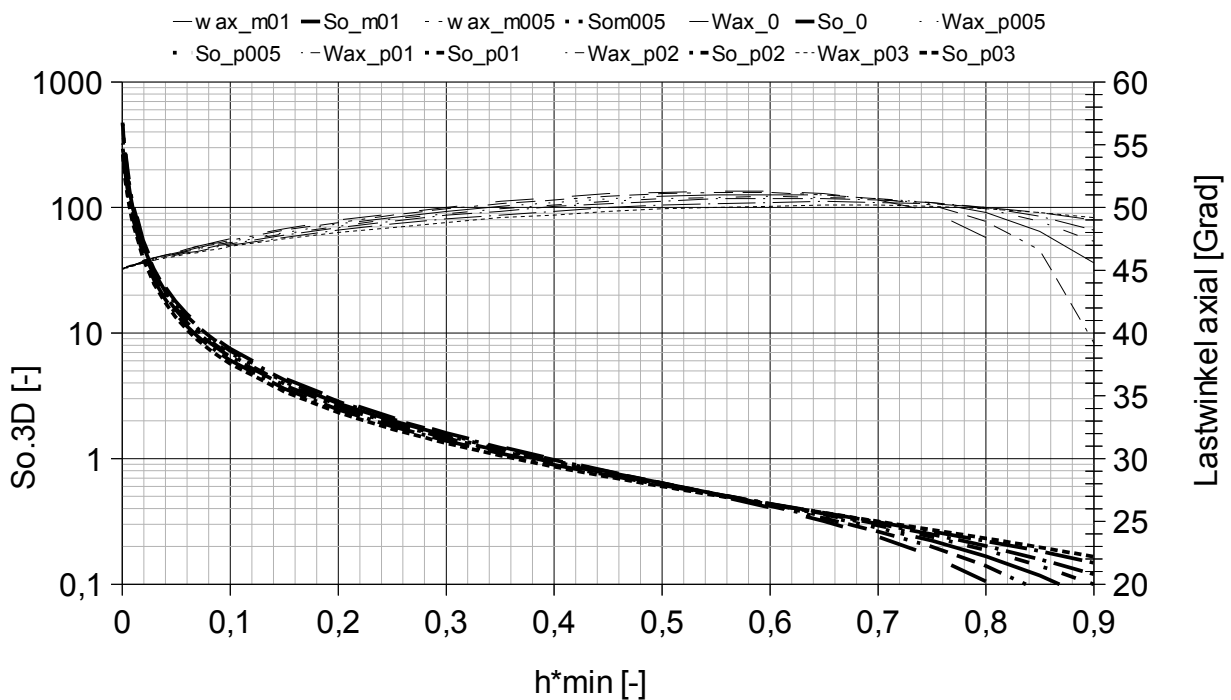


Abb.:6. Kennfeld der Tragfähigkeit 45°-Kegel-Lager

Der Einfluss unterschiedlicher axialer Position auf die Tragfähigkeiten ist gering. Gleiches gilt für den Lastwinkel. Dieses Verhalten ist typisch für eine Kegelgeometrie. Der Lastwinkel α ist nicht konstant und abhängig von $So3D$. Der Lastwinkel α variiert dabei um ca. 6° und strebt nur in Extremlagen ($h^*min \approx 0$ bzw. $> 0,9$) gegen 45°. Abweichungen von der 45°-Winkellage des Kegels sind gleichbedeutend mit einer Verkantung des Lagers um diese Winkeldifferenz. Eine solche Lagergeometrie ist daher ungünstig um variierende Lastzustände ($So3D \neq const.$) bzw. Lastwinkel und damit praxisgerechte 3-dimensionalen Tragfähigkeiten zu realisieren.

6. Das konkave Lager

Als nächstes soll die konkave Geometrie betrachtet werden. Dieser Lagertyp erzeugt z.B. die folgenden hydrodynamischen Druckverteilungen.

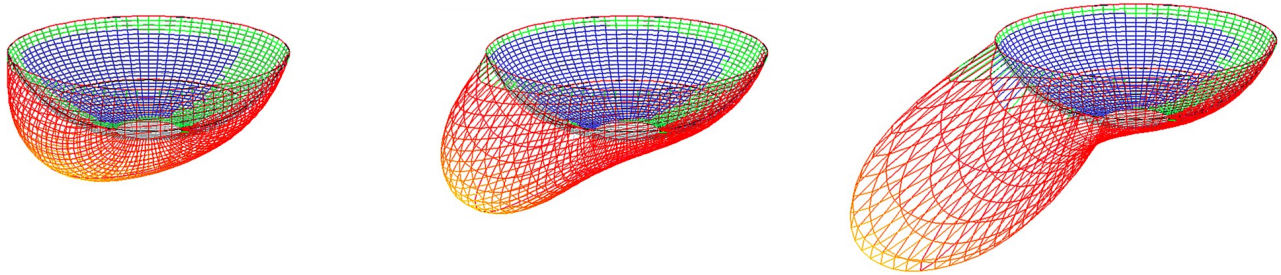


Abb.:7. Druckverläufe einer konkaven Lagerschale mit unterschiedlichen Exzentrizitäten

Das Tragfähigkeitskennfeld dieser Geometrie wird anschließend betrachtet:

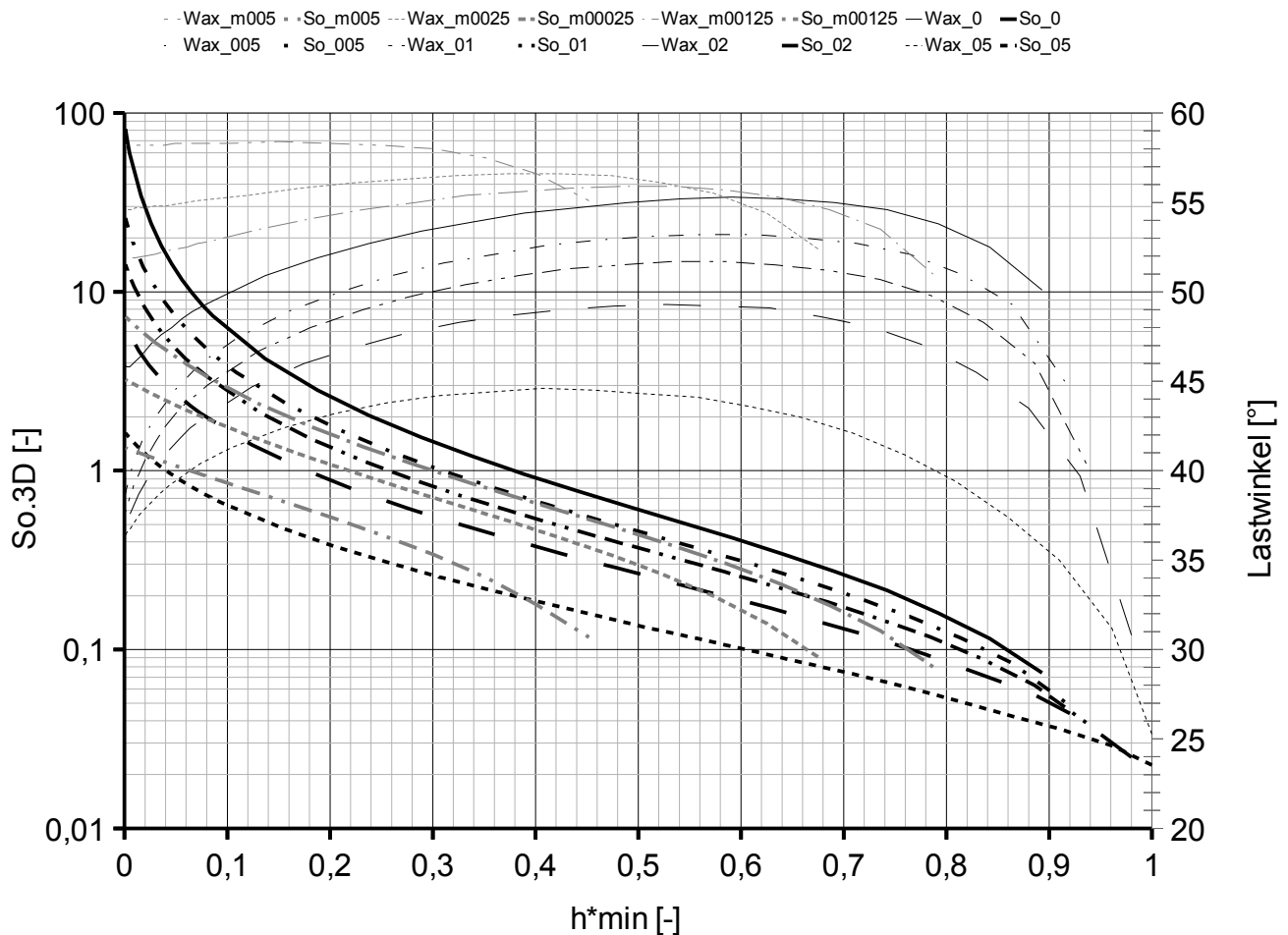


Abb.:8. Tragfähigkeitskennfeld einer konkaven Lagerschale

Die Tragfähigkeit variiert abhängig von der axialen Position des Rotors. Zu jeder axialen Position, gehört ein deutlich unterschiedlicher Tragfähigkeits- und Lastwinkelverlauf. Bei einer axialen Position von $e \cdot ax = 0$ besitzt die Tragfähigkeit ein Maximum. Die anderen axialen Positionen $e \cdot ax \neq 0$ weisen ein kleineres Tragfähigkeitsniveau auf, was bei der Auslegung solcher Lager berücksichtigt werden muss. Das Lager aus dem Beispiel kann Lasten mit einem Lastwinkel von $\alpha = 35^\circ$ bis 55° tragen. Bewegt man sich innerhalb dieses Bereichs, kann mit dem Kennfeld die 3-dimensionale Tragfähigkeit und die relative minimale Schmierstalthöhe bestimmt werden. Die Position von Rotor zu Stator wird sich, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, über ein Wertetriple einstellen. Wird z.B. der $So3D$ -Wert vorgegeben, sind die anderen Größen eindeutig bestimmt.

Dazu einige Beispiele:

Tabelle 2. Wertetripel zur Beschreibung der Rotorposition bei Vorgabe der Tragfähigkeit

Vorgabewert	e^*ax	h^*min	α
$So3D = 2$	0,2	0,08	43°
	0,1	0,14	47°
	0,05	0,18	49°
	0	0,24	53°

Lage und Lastrichtung sind somit eindeutig bestimmt und können mit Richtwerten zur Überprüfung der Betriebssicherheit z.B. $h^*min.lim$ verglichen werden.

Das Kennfeld kann auch bei Vorgabe eines Lastwinkels z.B. 50° genutzt werden um daraus die Tragfähigkeiten und Positionen zu ermitteln.

Tabelle 3. Beschreibung der Rotorposition und Tragfähigkeit bei Vorgabe des Lastwinkels

Vorgabewert	e^*ax	h^*min	$So3D$
$\alpha = 50^\circ$	0	0,89	0,075
	0,05	0,84	0,09
	0,1	0,77	0,13
	0,1-0,2	0,3-0,78	0,13-0,8
	0,1	0,3	0,8
	0,05	0,21	1,7
	0	0,1	6,2

Andere Betriebszustände (Lastwinkel, Schmierstathöhen oder Sommerfeldzahlen) können entsprechend bestimmt werden.

Abschließend soll noch das Reibungsverhalten der konkav gekrümmten Lagerschale angesprochen werden.

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

— f^*_m005 — f^*_m0025 — f^*_0 — f^*_0025 — f^*_005 — f^*_01 — f^*_02 - - f^*_05

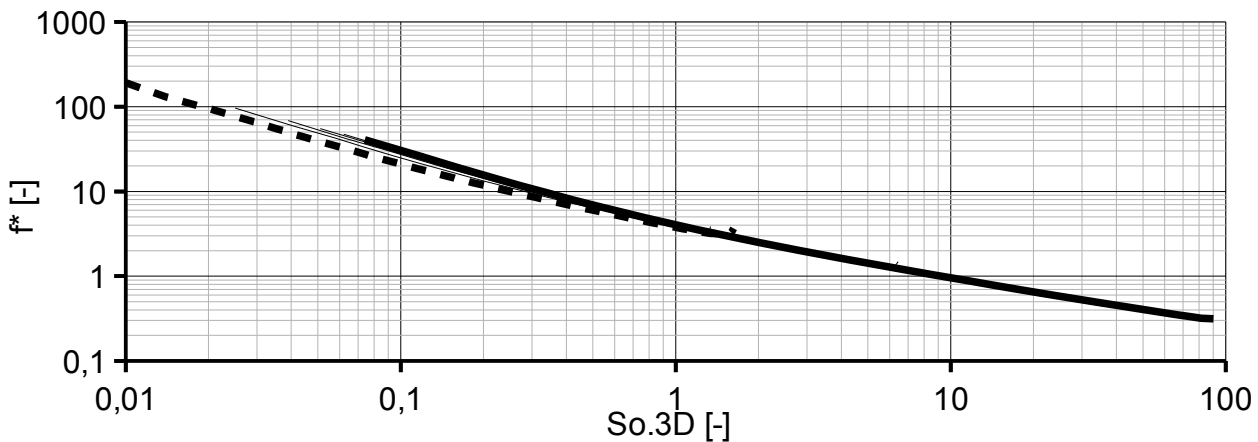


Abb.:9. Reibungskennzahl f^* einer konkaven Lagerschale

Die Reibungskennzahl f^* variiert für die unterschiedlichen axialen Positionen nur unwesentlich. Die einzelnen Graphen liegen sehr dicht nebeneinander und überlagern sich teilweise. Das Niveau der Reibungskennzahl ist wieder mit dem eines zylindrischer Gleitlagers vergleichbar (siehe auch DIN 31 652; $B^*=0,75$).

7. Zusammenfassung

Vorgelegt wurde eine Methode zur Berechnung und Darstellung von 3-dimensionalen hydrodynamischen Tragfähigkeiten für Gleitlager. Anhand von zwei Grundformen wurde gezeigt, dass entsprechende Geometrien 3-dimensionale Tragfähigkeiten erzeugen können. Die Basis für eine numerische Berechnung solcher Gleitlager bildet, unter Berücksichtigung der örtlichen Spalthöhen und Geschwindigkeiten, 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 dieser Basis 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 gleicher Scherfläche.

8. 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
- 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

9. Autorenanschrift

Martin Berger
Akazienweg 12
70538 Oberderdingen
Tel.: 07258 926481
Fax.: 07258 926482
e-mail: martin.berger@tribodoc.de

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 $e^*ax = 0$	$Crad$	m
Lagerdurchmesser	D	m
mittlerer Lagerdurchmesser	Dq	m
relative Verlagerungen axial	e^*ax	-
relative Exzentrizität radial	e^*rad	-
Auslenkung axial	eax	m
Auslenkung radial	$erad$	m
Reibungskennzahl nach DIN 31652	f^*	-
axiale Kraftkomponente	Fax	N
horizontale Kraftkomponente	Fh	N
radiale Kraftkomponente	$Frad$	N
resultierende Kraftkomponente	$Fres$	N
vertikale Kraftkomponente	Fv	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	$So3D$	-
axiale Sommerfeldzahl	$Soax$	-
radiale Sommerfeldzahl	$Sorad$	-
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 $e^*ax = 0$	Ψrad	-
Koordinate in Breitenrichtung	z	m
Dimensionslose Koordinate in Breitenrichtung	\tilde{z}	-
örtlicher normalen Winkel	κ	Grad
Reibungszahl	μ	-