

# **Hydrodynamische 3D-Gleitlager, Auslegung, Eigenschaften und Anwendungsgebiete**

## **3-dimensional plain bearings, calculation, properties and applications**

Dr.-Ing. Martin Berger

Erschienen am 27-28.06.2017: VDI Gleit- und Wälzlagertagung (Schweinfurt)

### **1. Kurzfassung**

Der Vortrag befasst sich mit hydrodynamischen 3D-Gleitlagern. Diese können wegen ihrer speziellen Geometrien 3-dimensionale Lasten realisieren. Das Maschinenelement Gleitlager erhält dadurch eine zusätzliche Dimension und kann aufgrund dieser Eigenschaften sehr individuell an eine Anwendung angepasst werden. Die hydrodynamischen Tragfähigkeiten solcher 3D-Gleitlager werden für einige Varianten vorgestellt und das daraus resultierende spezifische Verhalten angesprochen. Ebenso werden einige Gleitlagerkennwerte angeführt und anhand von Anwendungsbeispielen das Potenzial dieses Maschinenelementes aufgezeigt.

### **2. Abstract**

Based on their specific geometries 3-dimensional plain-bearings are capable of handling loads in three directions. The possibility to achieve a unique hydrodynamic bearing solution offers high flexibility and can be designed specifically for the needs of the application. A method to describe the performance of these bearings will be presented. Furthermore the characteristics of these bearings will be discussed and some application examples will be shown in order to help engineers identify potential new uses for these novel machine elements.

### **3. Einleitung**

Hydrodynamische Gleitlager werden in vielen Bereichen des Maschinenbaus eingesetzt. Die Übertragung der Kräfte erfolgt dabei über eine ausreichend hohe Schmierstoffschicht, welche die Gleitpartner durch die Ausbildung einer hydrodynamischen Tragfähigkeit vollständig voneinander trennt. Die Reibung findet dann als reine Flüssigkeitsreibung im Schmierstoff statt. 3D-Gleitlager können aufgrund ihrer individuell gestaltbaren Geometrie, anwendungsspezifische 3-dimensionale Tragfähigkeiten erzeugen.

#### 4. Vorstellung einiger geometrischer Grundformen hydrodynamischer 3D-Gleitlager

Die Möglichkeiten ein 3D-Gleitlager zu gestalten sind sehr vielfältig. Grundsätzlich kann, bei Einhaltung gewisser Gesetzmäßigkeiten, jede rotationssymmetrische Kontur eine hydrodynamische Tragfähigkeit erzeugen. Im weiteren Verlauf sollen einige Grundformen aufgeführt werden, welche zum einen relativ einfach herzustellen sind und sich in Anwendungen bereits als sinnvoll und leistungsfähig erwiesen haben. Die Möglichkeit der Lagergestaltung über 3D-Gleitlager besitzt eine hohe Flexibilität und kann daher individuell für eine spezifische Lageraufgabe konstruiert werden.

##### 4.1. Das 3D-Gleitlager mit konvexer Kontur bestehend aus 3 Teilabschnitten

Ein solches Lager besteht aus zwei geraden Abschnitten, einem zylindrischen Teilabschnitt und einen kegeligen, welche über einen Radius stetig miteinander verbunden sind. Dabei ist bezogen auf die Rotationsachse des Lagers, diese Anordnung konvex (zur Rotationsachse hin gewölbt) angeordnet. In Bild 1 ist ein solches Lager dargestellt. Die jeweiligen Längen der Teilabschnitte, ihre Winkelanzahl und der Radius bestimmen die spezifische Tragfähigkeitscharakteristik des Lagers.

##### 4.2. Das 3D-Gleitlager mit konkaver Kontur bestehend aus 3 Teilabschnitten

Ein 3D-Gleitlager mit konkaver Kontur (siehe Bild 2) besteht z.B. aus zwei geraden Abschnitten, einem zylindrischen Teilabschnitt und einen kegeligen, welche über einen Radius stetig miteinander verbunden sind. Dabei ist bezogen auf das Lager diese Anordnung konkav (von der Rotationsachse weg gewölbt) angeordnet .

##### 4.3. Das 3D-Gleitlager mit S-Kontur bestehend aus 5 Teilabschnitten

Ein 3D-Gleitlager mit S-Kontur besteht aus drei geraden Abschnitten, zwei zylindrischen Teilabschnitten und einen kegeligen, welche über Radien stetig miteinander verbunden sind (siehe Bild 3).

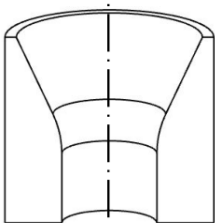


Abbildung 1: Konvex

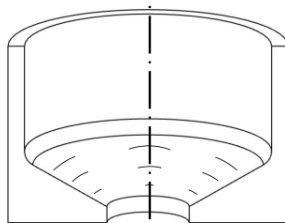


Abbildung 2: Konkav

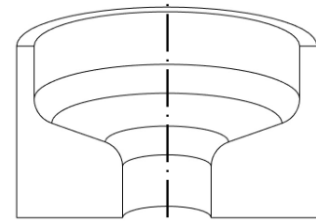


Abbildung 3: S-Kontur

#### 4.4. Die Möglichkeit der Modifikation bestimmter Teilabschnitte

Eine weitere Möglichkeit die Tragfähigkeitscharakteristik eines 3D-Gleitlagers anzupassen besteht darin, Teilabschnitte der Lagerkontur in Umfangsrichtung mit Erhebungen oder Vertiefungen auszustatten (siehe Bild 2, Linienzüge im kegeligen Abschnitt). Diese erzeugen dann eine lokale hydrodynamische Wirkung. Welche Effekte sich daraus ergeben wird im weiteren Verlauf anhand der konkaven Kontur beschrieben.

### 5. Beschreibung der technisch nutzbaren Lagereigenschaften

Die Form eines 3D-Gleitlagers bestimmt das Betriebsverhalten. Damit dieses beschrieben und untersucht werden kann, bieten sich neben praktischen Versuchen auch Simulationsrechnungen an.

#### 5.1. Rechnerische Beschreibung der Lagereigenschaften

Die Basis zur Berechnung hydrodynamischer Druckverteilungen bildet die Reynoldssche Differentialgleichung. Nachfolgend ist eine dimensionslose Form dargestellt.

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left( \frac{\tilde{h}^3}{\tilde{\eta}} \cdot \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} \right) + \frac{1}{\mathbf{B}^{*2}} \cdot \frac{\partial}{\partial \tilde{z}} \left( \frac{\tilde{h}^3}{\tilde{\eta}} \cdot \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{z}} \right) = \frac{6 \cdot \mathbf{U}_h^*}{\tilde{\eta}} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{x}} + \frac{6 \cdot \mathbf{W}_h^*}{\mathbf{B}^* \cdot \tilde{\eta}} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{z}} - \frac{12 \cdot \mathbf{V}_h^*}{\tilde{\eta}} \cdot \cos(\tilde{x})$$

Diese partielle DGL berechnet für eine örtliche vorgegebene Spalthöhe, einer Viskosität, den geometrischen Gegebenheiten und den hydrodynamisch wirksamen Geschwindigkeiten einen Druck. Die numerische Lösung und Auswertung der Gleichung stellt die Basis zur Bestimmung der Tragfähigkeit, ihrer Lastrichtung und weiterer Kennwerte dar. Für 3D-Gleitlager mit einer räumlichen Tragfähigkeit besitzt diese ebenfalls Gültigkeit. Die Berechnung und Auswertung 3-dimensionaler Geometrien geschieht nach den gleichen Methoden, wie dies z.B. von Radialgleitlagern her bekannt ist. Durch lösen der Reynoldsschen DGL werden Kennfelder bestimmt, mit diesen dann eine Auslegung möglich ist. Die Unterschiede zu zylindrischen Lagerbuchsen bestehen darin, dass die Spaltgeometrie über drei Achsen definiert werden muss und diese Lager dadurch eine Abhängigkeit von der axialen Position besitzen. Es ist deshalb sinnvoll bei der Beschreibung in Diagrammform mit Kurvenscharen zu arbeiten. Das Betriebsverhalten soll mit bekannten Kennwerten diskutiert werden. Dazu müssen einige Vereinbarungen getroffen werden. Damit aus hydrodynamischer Sicht geometrische Ähnlichkeit besteht, kommt Anstelle der Lagerbreite  $\mathbf{B}$  (zylindrisches Lager) beim 3D-Gleitlager die Länge  $\mathbf{S}$  der Lagerkontur zum Einsatz und der Lagerdurchmesser  $\mathbf{D}$  wird durch den mittleren Durchmesser  $\mathbf{D}_q$  der Kontur ersetzt (siehe Bild 13). Damit können die Ergebnisse und Eingangsgrößen in bekannter Form (siehe [1],[2]) wie z.B. mit der Sommerfeldzahl oder

weiteren Kennwerten angegeben werden. Zur Bestimmung der Kraftkomponente wird die vektorielle Summe aus der horizontalen und vertikalen Last berechnet. Die 3-dimensionale Last ergibt sich dann aus den axialen und radialen Kraftkomponenten (siehe Bild 14):

$$\text{radiale Last } F_{rad} = \sqrt{F_v^2 + F_h^2}, \text{ 3-dimensionale Last } F_{res} = \sqrt{F_{rad}^2 + F_{ax}^2}.$$

Damit lassen sich dann die entsprechenden Sommerfeldzahlen berechnen.

$$\text{Radial } So_{rad} = \frac{F_{rad} \cdot \psi^2}{S \cdot D_q \cdot \eta \cdot \omega}, \text{ axial } So_{ax} = \frac{F_{ax} \cdot \psi^2}{S \cdot D_q \cdot \eta \cdot \omega} \text{ und 3D } So_{3D} = \frac{F_{res} \cdot \psi^2}{S \cdot D_q \cdot \eta \cdot \omega}$$

Die dazu gehörigen Lastrichtungen ergeben sich über den Arcus Tangens (siehe Bild 14):

$$\text{radiale Richtung } \beta = \arctan \frac{F_h}{F_v} \quad \text{axiale Richtung } \alpha = \arctan \frac{F_{ax}}{F_{rad}} = \text{Lastwinkel.}$$

Somit können aus den Betriebsparametern heraus, sowohl die Lastrichtungen als auch die zugehörigen Tragfähigkeitskennzahlen für die Lagerauslegung und weitere Betrachtungen herangezogen werden. Im weiteren Verlauf werden anhand dieser Kennwerte Aussagen zum Betriebsverhalten gemacht. Dazu wird ausschließlich die 3-dimensionale Sommerfeldzahl und der Lastwinkel  $\alpha$  benutzt und darüber Zusammenhänge zu anderen Kennwerten hergestellt. Grundsätzlich könnten weitere Kenngrößen angegeben werden, was aber den Umfang dieses Vortrages überschreiten würde. Im folgenden werden daher nur einige Diagramme vorgestellt, womit sich das spezifische Verhalten der Lagervarianten durch Kennfelder beschreiben lässt.

## 5.2. Betriebseigenschaften eines konvexen 3D-Gleitlagers nach Bild 1

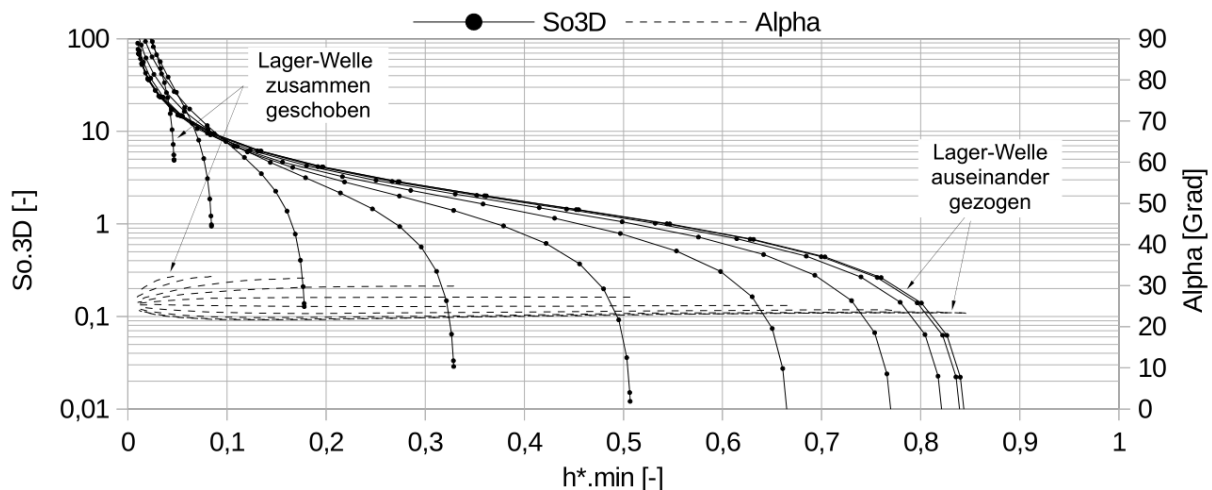


Abbildung 4: Tragfähigkeitskennfeld eines konvexen 3D-Gleitlagers

Wie man in Bild 4 erkennen kann, besitzt ein solches Lager für jede axiale Position (einzelner Graph der Kurvenscharen) einen typischen Sommerfeldzahlverlauf mit einer Progression bei kleineren minimalen Schmierfilthöhen. Der nutzbare Lastwinkel  $\alpha$  bewegt sich in einem relativ schmalen Bereich von ca. 25 – 30°.

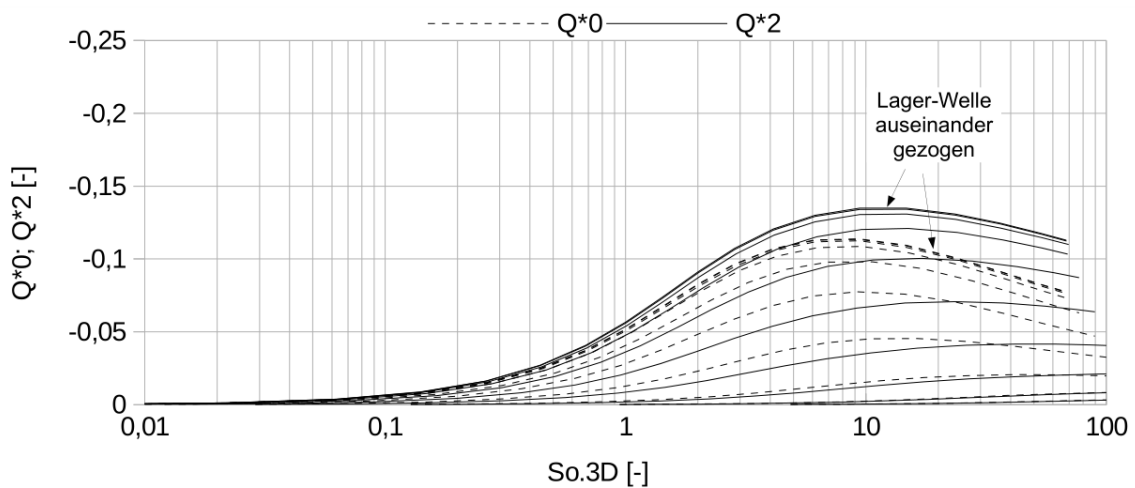


Abbildung 5: dimensionsloser Seitenfluss eines konvexen 3D-Gleitlagers

In Bild 5 ist der dimensionslose Seitenfluss an den Lagerrändern dargestellt. Bei der gewählten Lagervariante tritt der Schmierstoff über einen weiten Nutzungsbereich zu ungefähr gleichen Anteilen an den Lagerrändern aus  $Q^*0 \approx Q^*2$  (Pos. 0/2 siehe Bild 13). Lediglich bei höheren Sommerfeldzahlen und großen axialen Verschiebungen (Welle ist weit herausgezogen) tritt am größten Durchmesser des Kegels merklich mehr Schmierstoff aus.

### 5.3. Betriebseigenschaften eines konkaven 3D-Gleitlagers nach Bild 2

Diese Variante wurde im kegeligen Bereich durch 6 sinusartige Erhebungen, in der Größenordnung des Lagerspieles, modifiziert.

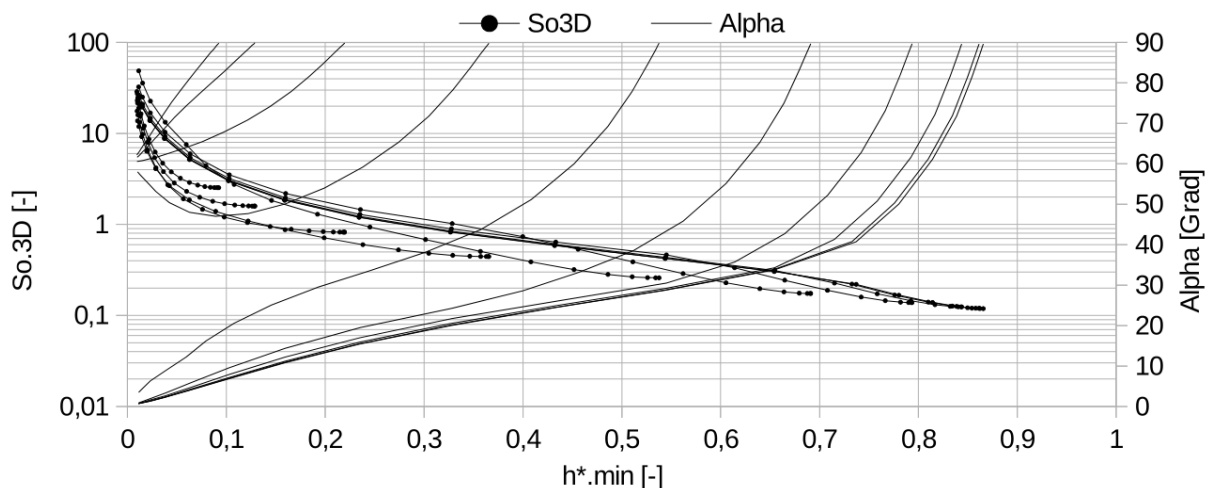


Abbildung 6: Tragfähigkeitskennfeld eines konkaven 3D-Gleitlagers (modifiziert)

Bemerkenswert ist die dadurch erzeugte Veränderung der realisierbaren Lastwinkel. Der nutzbare Lastwinkelbereich bewegt sich in einem Bereich von  $\alpha = 0 - 90^\circ$ .

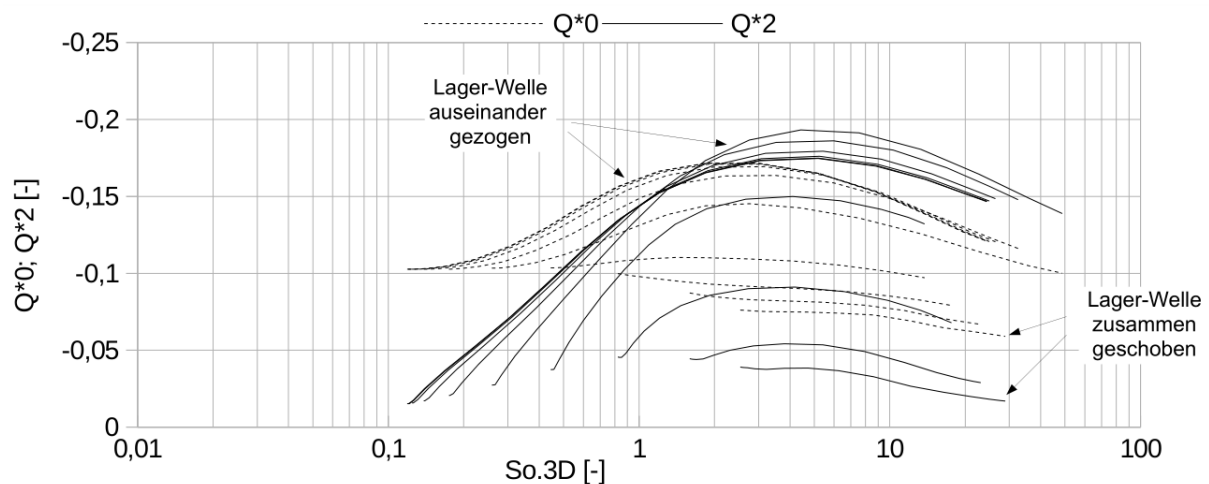


Abbildung 7: dimensionsloser Seitenfluss eines konvexen 3D-Gleitlagers (mod.)

Das konkave 3D-Gleitlager nach Bild 2 besitzt durch die Modifikation des kegeligen Bereiches einen größeren Grunddurchsatz des Schmierstoffes am unteren Lagerrand (siehe  $Q^*0$ -Verlauf). Bei größeren axialen Abständen von Welle zum Lager und  $So_{3D} > 1$  kehrt sich dieses Verhältnis um.

#### 5.4. Betriebseigenschaften eines 3D-Gleitlagers mit S-Kontur nach Bild 3

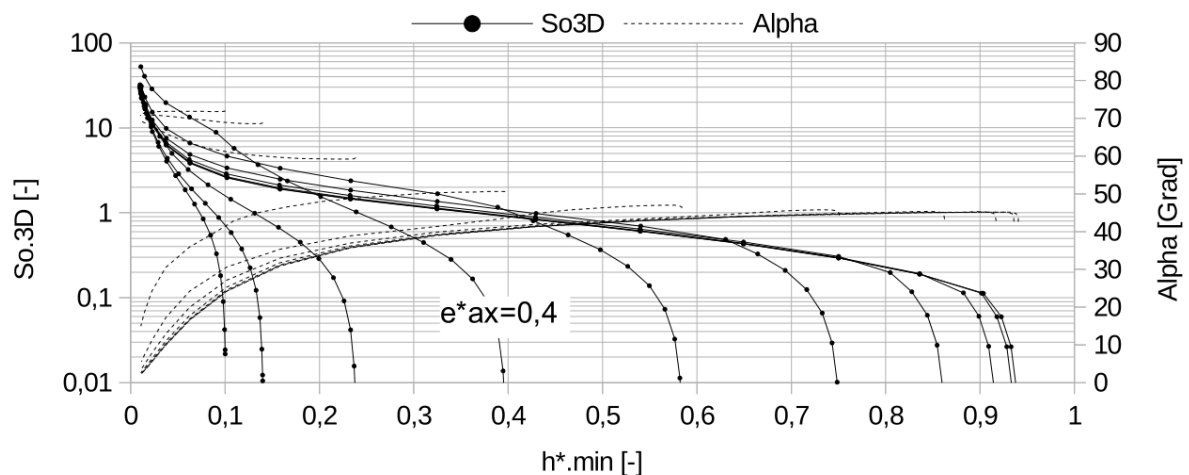


Abbildung 8: Tragfähigkeitskennfeld eines 3D-Gleitlagers mit S-Kontur

Das Lager nach Bild 3 wurde für größere konstante Lastwinkel entworfen. Der nutzbare Lastwinkel  $\alpha$  bewegt sich in einem Bereich von ca. 45 - 70°. Zudem besitzt diese Variante, abhängig von der axialen Position, einen Bereich mit höherer Tragfähigkeit ( $e^*ax=0,4$ -Verlauf). Hier verläuft die Sommerfeldzahl bei kleineren Schmierpalthöhen oberhalb der anderen Graphen und deutet auf ein Maximum der Tragfähigkeit hin. Dies ist für Anwendungen mit konstanten Lastwinkeln (z.B. schrägverzahntes Zahnrad  $\rightarrow \alpha = 50^\circ$ ) vorteilhaft und kann für eine Optimierung der Tragfähigkeit genutzt werden.

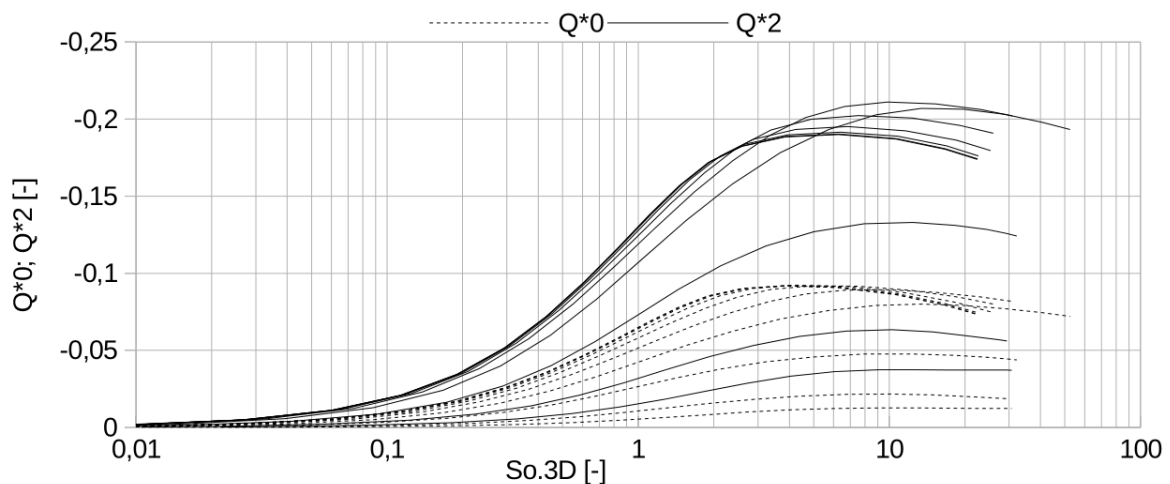


Abbildung 9: dimensionsloser Seitenfluss eines 3D-Gleitlagers mit S-Kontur

Bei der Lagervariante mit S-Kontur tritt am größeren Durchmesser der Kontur (Pos. 2) mehr Schmierstoff aus wie am kleineren Durchmesser (Pos. 0). Ein solches Lager besitzt somit eine Förderrichtung. Diese Betriebseigenschaft kann z.B. genutzt werden um den Schmierstoff bewusst in eine Richtung zu fördern. Oder im Umkehrschluss die Menge an Schmierstoff die z.B. von einer berührungslosen Dichtung zurückgehalten werden soll zu minimieren.

### 5.5. Das Reibungsverhalten der 3 Lagervarianten

Das Reibungsverhalten von 3D-Gleitlagern wird, wie auch bei anderen hydrodynamischen Gleitlagern, von der Scherung des Schmierstoffs bestimmt. Durch die Abhängigkeit des örtlichen Schergefälles von der axialen Position der Welle im Lager, sollte diese berücksichtigt werden. Für die Auslegung einer Lagerstelle bietet es sich daher an einen Zusammenhang zu verwenden, der sich aus den Betriebsparametern und Kennfeldern des Lagers bestimmen lässt. Im Anschluss werden dazu Regressionsgleichungen aufgeführt womit dies möglich ist.

Konvexes 3D-Gleitlager nach Bild 1:  $f^* = 7,28 \cdot e_{ax}^*^{-0,399} \cdot So_{3D}^{-0,826}$  ( $R^2 = 0,986$ )

Konkaves 3D-Gleitlager (mod.) nach Bild 2:  $f^* = 4,75 \cdot e_{ax}^*^{-0,191} \cdot So_{3D}^{-0,737}$  ( $R^2 = 0,996$ )

3D-Gleitlager mit S-Kontur nach Bild 3:  $f^* = 6,10 \cdot e_{ax}^*^{-0,389} \cdot So_{3D}^{-0,865}$  ( $R^2 = 0,988$ )

Nach Berechnung der Sommerfeldzahl und durch Bestimmung der axialen Position  $e^*_{ax}$  aus dem Tragfähigkeitsdiagramm kann die Reibungskennzahl  $f^*$  berechnet werden. Der Betrag der Exponenten gibt Auskunft darüber, wie groß der jeweilige Einfluss ist.



## 6. Besonderheiten, Vor- und Nachteile

In diesem Abschnitt sollen die Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel kurz zusammengefasst werden. Dazu werden zunächst allgemeinere Aussagen getroffen:

- a) Über die Länge und Anordnung der Teilabschnitte einer 3D-Gleitlagerkontur kann das Betriebsverhalten eingestellt werden. Darüber lässt sich das Lastniveau, als auch der nutzbare Lastwinkelbereich, variieren (vgl. Bild 4, 6, 8).
- b) Über Modifikationen in Umfangsrichtung (Erhebungen oder Vertiefungen) einzelner Teilabschnitte, kann eine Ausweitung des nutzbaren Lastwinkelbereiches erfolgen. Darüber lässt sich auch der Seitenfluss gezielt beeinflussen (s. Bild 6 und 7).
- c) Hydrodynamische 3D-Gleitlager lassen sich wegen ihrer Gestaltungsfreiheit individuell in eine Anwendung anpassen und/oder integrieren (s. Bild 10 – 12). Sie eröffnen damit die Möglichkeit, Bauteile kompakter zu gestalten oder einzusparen.

Zu den vorgestellten Lagervarianten können folgende spezifische Aussagen getroffen werden:

- d) Die Kontur der Variante nach Bild 1 (konvexes 3D-Gleitlager) hat, verglichen mit den anderen Varianten, den kleinsten mittleren Lagerdurchmessern  $D_q$ . Diese Eigenschaft kann für eine Reibungsoptimierung z.B. bei hohen Drehzahlen vorteilhaft genutzt werden. Der nutzbare Lastwinkelbereich der vorgestellten Kontur ist jedoch relativ schmal. Dieser lässt sich aber wie beim konkaven Lager durch eine Modifikation (z.B. Wellenstruktur im kegeligen Bereich) ausweiten.
- e) Die Variante nach Bild 2 (konkaves 3D-Gleitlager) besitzt den größten mittleren Durchmesser, was bei kleiner Drehzahl oder niedrigen Viskositäten sinnvoll angesetzt werden kann. Ein großer Lagerdurchmesser ist jedoch hinsichtlich einer Reibungsminimierung eher nachteilig. Die Modifikationen im kegeligen Teilabschnitt erzeugen einen großen nutzbaren Lastwinkelbereich. Das Lagerdesign nach Bild 2 bietet sich z.B. für Wellenenden an.
- f) Die Variante nach Bild 3 (3D-Gleitlager mit S-Kontur) eignet sich zur Optimierung der axialen Tragfähigkeit. Die Zonen zur Erzeugung axialer Kraftkomponenten liegen im Bereich der maximalen hydrodynamischen Drücke, im Zentrum der Kontur, wodurch eine bessere Ausnutzung des Druckes erfolgt. Das Lager mit S-Kontur besitzt eine Förderrichtung, vom kleineren zum größeren Durchmesser. Ein solches Design kann beispielsweise bei abgesetzten Wellen zweckmäßig sein.



## 7. Anwendungsbeispiele unter Nutzung der spezifischen Eigenschaften

Im folgenden werden beispielhaft einige Anwendungen aufgeführt, bei denen die Eigenschaften von 3D-Gleitlagern anwendungsspezifisch umgesetzt sind.

In Bild 10 ist die Schnittdarstellungen einer Zentripetalturbine, gelagert mit einem konvexen 3D-Gleitlager, dargestellt. Diese Turbinenart findet häufig Anwendung in Turbomaschinen. Dabei werden in der Regel sehr hohe Drehzahlen erreicht, weshalb angestrebt wird die Gleitgeschwindigkeiten möglichst klein zu halten. Der kleine mittlere Lagerdurchmesser eines konvexen 3D-Gleitlagers kann hier genutzt werden die Reibungsverluste gering zu halten.

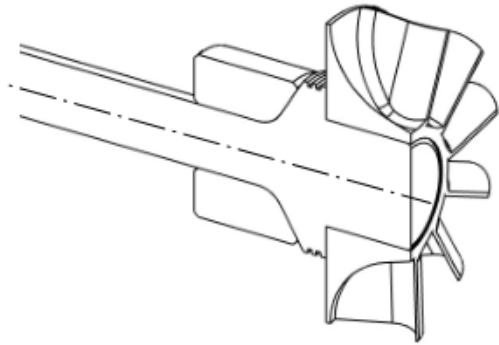


Abbildung 10: Zentripetalturbine (konvexes 3D-Gleitlager)

In Bild 11 ist eine Spannrolle für Flachriemen dargestellt. Die Lagerung besteht aus zwei gegenüber gerichteten konkaven 3D-Gleitlagern, welche mit Fett geschmiert werden. Die Gegenkontur ist fester Bestandteil der gusseisernen Rolle und sorgt für eine günstige Schmierstoffrückführung. In einem System mit niedriger Drehzahl (Flachriemen) werden möglichst große hydrodynamisch wirksame Gleitgeschwindigkeiten angestrebt. Dies wird hier durch den größeren mittleren Durchmesser der konkaven Lagergeometrie erreicht.

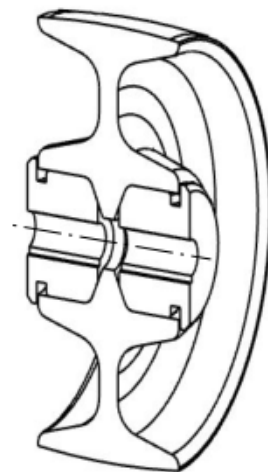


Abbildung 11: Spannrolle (konkaves 3D-Gleitlager)

In Bild 12 ist ein schrägverzahntes Zahnrad (Antriebsritzeln), kombiniert mit einem 3D-Gleitlager mit S-Kontur, dargestellt. Bei Zahnradern ist die Lastrichtung unabhängig von der übertragenden Leistung konstant. Das beinhaltet für die Kombination von Zahnrad und 3D-Gleitlager ein gutes Optimierungspotenzial der Betriebseigenschaften. Vorteilhaft bei der gewählten S-Kontur ist zudem der Schmierstofftransport hin zur Verzahnung.

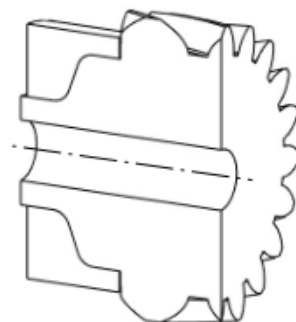


Abbildung 12: Schrägverzahntes Zahnrad (3D-Gleitlager S-Kontur)

## 8. Anhang

Tabelle 1: Bezeichner

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit
Lastverlagerungswinkel axial	$\alpha = \text{Alpha}$	Grad
Lagerbreite	$B$	m
Lastverlagerungswinkel radial	$\beta$	Grad
relative Lagerbreite	$B^*$	-
Lagerdurchmesser	$D$	m
mittlerer Lagerdurchmesser	$D_q$	m
relative Verlagerungen axial	$e^*_{ax} = e^*_{ax}$	-
Reibungskennzahl nach DIN 31652 ( $f^* = f / \psi$ )	$f^*$	-
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	$\eta$	Pa s
relative minimale Schmierpalthöhe	$h^*_{min}$	-
Dimensionslose Seitenflusszahl an der Koordinate 0	$Q^*0$	-
Dimensionslose Seitenflusszahl an der Koordinate 2	$Q^*2$	-
Länge der Lagerkontur	$S$	m
3-dimensionale Sommerfeldzahl	$So_{3D} = So_{.3D}$	-
axiale Sommerfeldzahl	$So_{ax}$	-
radiale Sommerfeldzahl	$So_{rad}$	-
Winkelgeschwindigkeit	$\omega$	1/s
relatives Lagerspiel nach DIN 31652	$\psi$	-

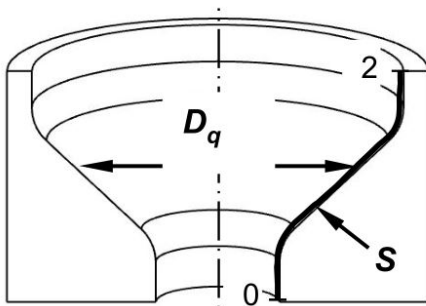


Abbildung 13: Definitionen der 3D-Kontur

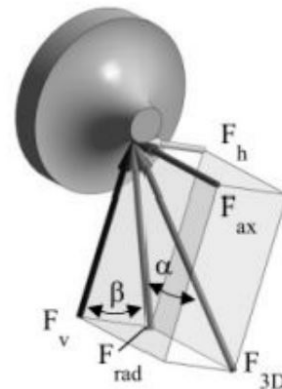


Abbildung 14: 3D-Lasten und Winkel

## 9. Literaturangaben

- [1] VDI-Richtlinien 2204.: Auslegung von Gleitlagerungen Blatt 1-2
- [2] DIN 31651-3.: Hydrodynamische Radial-Gleitlager im stationären Betrieb
- [3] DE 10 2013 110 409 A1
- [4] WO 2016/146190 A1