

Theoretische und experimentelle Untersuchungen an selbst-schmierenden Luftlagern

Stefan Risse



Stefan Risse

Einführung

Während der letzten zehn Jahre stieg der Bedarf an schnell rotierenden Präzisionslagern für opto-mechanische Anwendungen stetig. Rotierende Spiegel, Prismen und sogar komplexe optische Systeme zur Lichtführung in Belichtern, Scannern und Druckern werden mit immer höheren Drehzahlen betrieben. Gleichzeitig wachsen die Erwartungen an die Genauigkeit und Lebensdauer. Für solche feinwerktechnischen Anwendungen werden kompakte, wartungsfreie Lagersysteme mit axialer und radialer Stabilität benötigt. Häufig sind nicht Lager mit maximaler Tragfähigkeit und Steifigkeit, sondern optimierte Lager mit angepassten Lagereigenschaften das Entwicklungsziel. Am Fraunhofer-Institut entwickeln wir Luftlager nach dem doppelsphärischen Lagerprinzip. Die Merkmale – konstruktiv nicht überbestimmtes Prinzip, Präzision, geringer Montageaufwand und moderate Kosten – sind geeignet, Anwendungen in der Industrie zu erschließen. Im Folgenden werden wir neueste theoretische und praktische Resultate von selbst-schmierenden Luftlagern vorstellen.

Das doppelsphärische Lagerprinzip

Bei einem doppelsphärischen Lager stehen sich zwei Kalottenpaare gegenüber. Jedes Paar besteht aus einer rotierenden und einer stehenden Lagerfläche. Der Rotor wird im Umgriff aufgenommen. Hierzu sind seine Stirnflächen als Lagerschale ausgebildet. Die beiden anderen Lagerschalen sind starr am Gehäuse befestigt. Der Rotor kann bikonkav oder bikonvex aufgebaut sein (Abb. 1). Der Abstand der Kugelmittelpunkte der Lagerschalen bestimmt die Kippsteifigkeit des Lagers. Vorteilhaft für den Betrieb ist die Selbstzentrierung des Rotors. Die Rotationsachse wird über die Kugelmittelpunkte vorgegeben. Im Lagerspalt, zwischen den sphärischen Lagerschalen, muss sich zur Reduzierung der Reibung ein tragfähiges Gaspolster aufbauen.

Der Druckaufbau erfolgt während der Rotation von selbst. Hierzu wird je eine der Lageroberflächen mit mehreren spiralförmigen Strukturen ausgeführt (Abb. 2). Hiervon ist der Name „Spiralrillenlager“ /1/ abgeleitet.

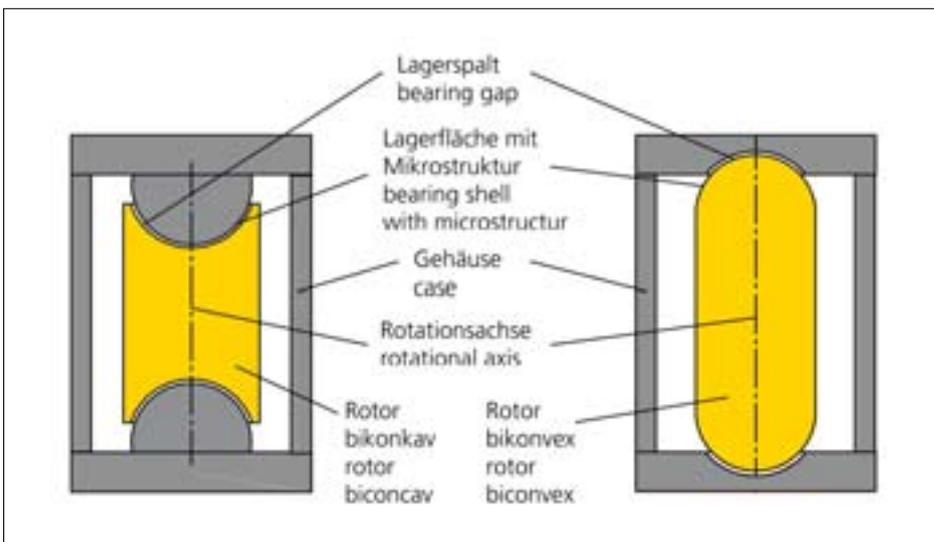


Abb. 1: Design-Prinzip des doppelsphärischen Lagers.

Fig. 1: Principle design of double spherical bearing.

Theoretical and experimental investigations into self-acting air bearings

Stefan Risse

Introduction

Over the last decade, air bearings have become more and more important for high speed opto-mechanical applications. Rotating mirrors, prisms and even complex optical systems for the guiding of light inside illuminating, scanning or printing devices are operated at increasingly higher rotational speeds. At the same time, demands on accuracy and durability have greatly increased. For optical applications in precision engineering, maintenance-free bearing systems with high axial and radial stability with a compact design are required. The objective is often not to develop bearings with maximum load-carrying capacity and stiffness, but to develop optimized bearings with specifically adapted properties. At the Fraunhofer Institute (IOF), air bearings based on the principle of double hemispherical design are being developed. The main features are modeled according to the remarkably simple principles, high accuracy, minor assembly effort and low cost, and should serve to open up new industrial applications. The following is a presentation of the latest theoretical and practical results from investigations into self-acting air bearings.

The double spherical bearing principle

A double spherical bearing consists of two pairs of adjacent spherical surfaces. The surfaces of each pair form a rotating and a stationary bearing shell, respectively. The stationary bearing shells are opposite each other, attached to a rigid case. The rotor moves on a thin film of compressed air in between the two pairs of stationary bearing shells. The rotor exhibits either bi-concavity or bi-convexity (fig. 1). The distance between the two center points of the spheres determines the toppling stiffness of the bearing. The axis connecting the center points forms the rotational axis. An additional advantage of hemispherical bearings is the effect of self-centering during rotation. In the bearing gap between the bearing shells, an air cushion is produced which reduces friction. Rotation automatically brings about self-lubrication. In order to produce this effect, the bearing surfaces are manufactured with spiral grooves (fig. 2) and are thus called spiral groove bearings [1].

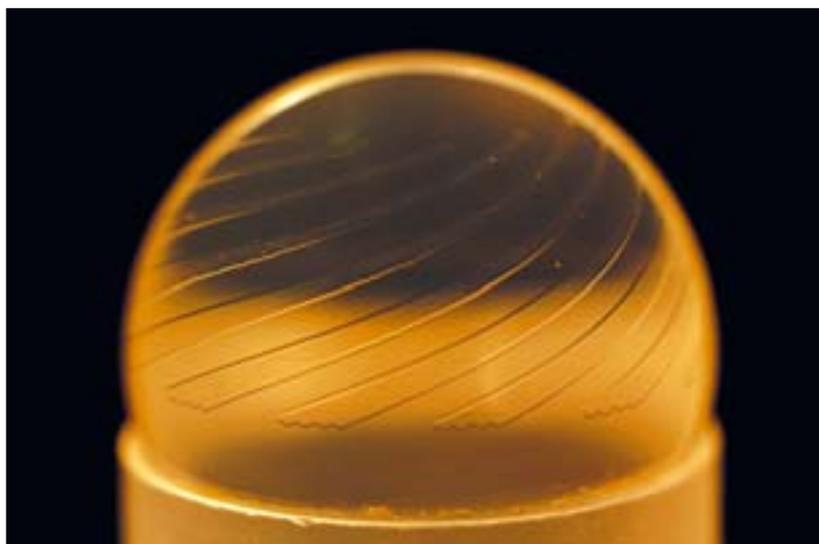


Abb. 2: Hemisphärische Lagerfläche mit Mikrostruktur.

Fig. 2: Hemispherical bearing surface with microstructure.

Jede dieser Mikrostrukturen erzeugt durch die Relativbewegung der Lagerflächen an den Strukturkanten einen Stau der Luft und damit einen Überdruck im Lager (Keileffekt).

Gleichzeitig wird der Schmierstoff entlang der Rillen gepumpt. In Richtung der Rillen liegt ein konstanter Druckgradient vor. Funktional verhindert der Überdruck den Kontakt der Lagerflächen. Der eigentliche Druck im Lagerspalt wird durch geometrische Parameter beeinflusst.

Finite-Elemente Berechnungsansatz

Ein im IOF aufgestellter Berechnungsansatz zur Bestimmung der Druckverteilung und der Steifigkeits- und Dämpfungsmatrix von sphärischen Spirallagern basiert auf einer numerischen Finite-Elemente-Methode /2/. Dabei erfolgt die Vernetzung mit linearen Dreieckselementen auf der Lagerfläche. An den Ecken ergeben sich Knotenpunkte. Die Anordnung der Elemente stimmt mit dem Verlauf der Struktur überein. Das hat den Vorteil, dass kein Element zugleich Teil der Struktur respektive der Lagerfläche ist. Sprungstellen entfallen somit. Jedes Finite-Element erhält eine definierte Zuweisung des vorliegenden Spaltwertes. Durch das Aufstellen von Annahmen kann das näherungsweise Lösen der REYNOLDS'schen Differentialgleichung für jedes Finite-Element im definierten Bereich erfolgen /2/, /3/. Die Berechnung geht von einem offenen Rand aus, d. h. eine Zirkulation des Schmierstoffs am Rand wird beachtet.

Im Ergebnis liegt die Druckverteilung über den Knotenpunkten vor. Der Vorteil dieser Lösung ist eine strenge Anwendung der aerodynamischen Zusammenhänge im physikalischen Sinn für jedes einzelne Finite-Element. Mit steigender Elementzahl erhöht sich die Genauigkeit des Berechnungsverfahrens. Die Steifigkeit des Lagers verhält sich proportional zur Geschwindigkeit des Rotors. Die Dämpfung ist unabhängig von der Geschwindigkeit. Der Lagerspalt beeinflusst die Steifigkeit und die Dämpfung des Lagers. Die Abhängigkeit ist nicht linear. Der Abstand der Lagerflächen, bestehend aus Spaltgröße, Strukturtiefe und Dezentrierung, geht mit der dritten Potenz in die Berechnung der Steifigkeit und der Dämpfung ein. Für ein Testlager mit einem Radius von 6,925 mm, einer Strukturzahl von 12 und einer Drehfrequenz von 400 Hz ergibt sich im konzentrischen Fall eine „napfkuchenförmige“ Druckverteilung (Abb. 3). Der Druck steigt mit der Strukturlänge. Im zentralen unstrukturierten Bereich ist der Druck konstant. Für den dezentrierten Fall ist die Druckverteilung unsymmetrisch (Abb. 4).

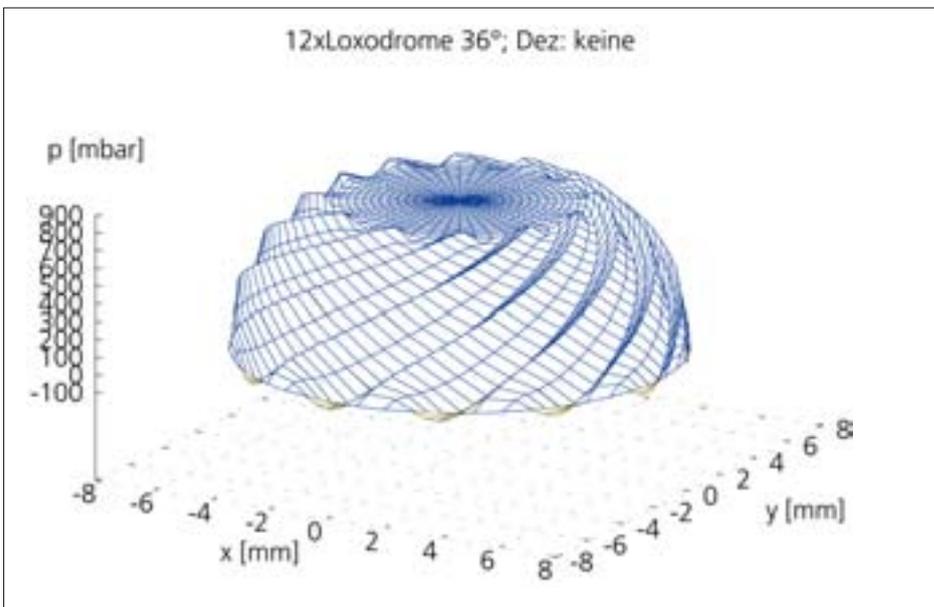


Abb. 3:
Druckverteilung im konzentrischen Fall.

Fig. 3:
Pressure distribution in concentric case.

Each of these micropatterns generates an impact pressure and contributes to overpressure in the bearing gap (wedge effect) when the bearing surfaces move in relation to each other. At the same time air is pumped along the grooves into the center of the bearing.

A constant gradient of pressure builds up in the direction of the grooves. The overpressure prevents the bearing surfaces from coming into contact. The pressure obtained in the bearing gap depends on a number of geometrical parameters relating to the bearing.

Finite-Element Calculation

A calculation method was developed at the IOF to determine the pressure distribution and stiffness as well as the damping matrices of spherical spiral groove bearings. The calculation is based on a numerical model using the Finite Element Method [2]. Meshing is obtained with linear triangular elements on the bearing surface. Nodal points are located at the corners. The arrangement of the triangular elements is consistent with the position of the structures. This has the advantage that no element is simultaneously part of the structure and of the bearing surface. Consequently, points of discontinuity are circumvented. Every finite element receives a defined value which corresponds to the current gap. Having made certain assumptions [2], [3], an approximate solution to the REYNOLDS's differential equation can be obtained for every finite element in the defined field.

The calculation assumes an open edge, i. e. the circulation of the lubricant at the edge is taken into consideration. As a result, the pressure distribution over the nodal points is obtained. The advantage of this solution is that aerodynamic principles are strictly applied in a physical sense for every finite element. The accuracy of the procedure increases with the number of elements involved. The stiffness of the bearing scales linearly with the velocity of the rotor. The damping of the rotor is independent of the velocity. The bearing gap influences the stiffness and the damping of the bearing. This dependency is nonlinear: the gap parameter cubed (distance of bearing shells, depth of microstructure, decentration) influences the stiffness and the damping. In concentric cases, a pressure distribution as displayed in fig. 3 is obtained for test bearings with a frequency of 400 Hz, a radius of 6.925 mm and 12 structures. The pressure increases with the structure length and is constant in the central non-structured field. In radial decentric cases, the pressure distribution is non-symmetrical (fig. 4).

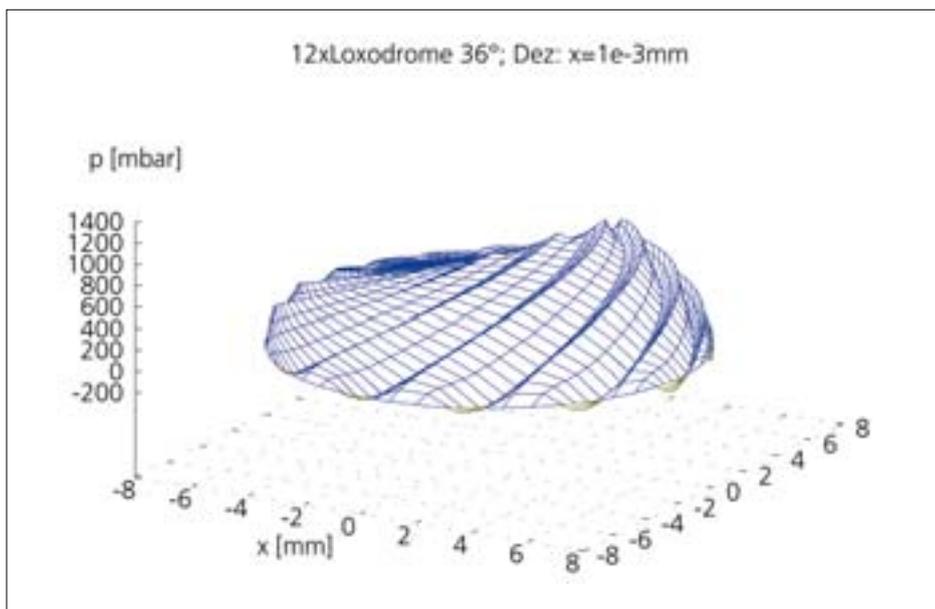


Abb. 4: Druckverteilung im radial dezentrierten Fall.

Fig. 4: Pressure distribution in radial decentric case.

Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen erfolgten an doppelsphärischen Lagern. Als Kriterium zur Bestimmung der Eigenschaften und zur Überprüfung der Korrelation zu den theoretischen Ergebnissen wurde der Druck im Zentrum jeder Lagerfläche ermittelt. Vor Beginn jeder Messung wurde der Wuchtzustand des Rotors überprüft. Eine Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten von bis zu $\pm 5\%$ trat auf (Abb. 5). Weiterhin konnten die Ergebnisse mit der Literatur /4/, /5/ verglichen werden (Abb. 5). Qualitativ werden die Ergebnisse sehr gut bestätigt. Absolut sind die Resultate bis zu 20 % kleiner als in der Literatur, mit gemitteltem Druck und unendlicher Strukturzahl. Die Abweichungen sind im Ansatz beider Berechnungsverfahren (Näherungslösung bzw. Finite-Elemente-Methode) und im Einfluss des Randbereiches begründet.

Zusammenfassung

Unter Beachtung der wachsenden Anforderungen der Feinwerktechnik und der Mikrosystemtechnik sind optimierte Lager bezüglich der Eigenschaften und der Materialien für hoch spezialisierte Anwendungen notwendig. Die durchgeführten theoretischen und experimentellen Untersuchungen leisten hier einen Beitrag. Das Prinzip des doppelsphärischen Lagers ist geeignet, um axiale und radiale Belastungen aufzunehmen und garantiert Präzision bei hohen Drehzahlen. Dabei wird die höchste Steifigkeit mit hemisphärischen Lagerschalen erzielt. Gleichzeitig steigt der Fertigungsaufwand mit zunehmender Krümmung der Lagerfläche. Tragkraft und Steifigkeit eines aerodynamischen Lagers sind durch die Lagergeometrie begrenzt. Das gilt besonders für die radialen Eigenschaften.

Typische Werte eines doppelsphärischen aerodynamischen Lagers sind kleiner 20 N für die Tragfähigkeit und kleiner $10 \text{ N}/\mu\text{m}$ für die Steifigkeit. Am IOF werden neue Luftlager-Applikationen z. B. als Scanner entwickelt (Abb. 6).

Literatur:

- /1/ Muijderland, E. A.: „Spiral Groove Bearings“, Thesis PhD; TU Delft (1966).
- /2/ Risse, S.: „Ein Beitrag zur Entwicklung eines doppelsphärischen Luftlagers aus Glaskeramik“, Dissertation TU Ilmenau (2001).
- /3/ Lang, O. R., Steinhilper, W.: „Gleitlager“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1978); ISBN 3-540-08678-1.
- /4/ Bootsma, J.: „Spherical and Conical Spiral Groove Bearings – Part I and II“, Trans. ASME Journal of Lubrication Technology, Series F, 97,2 April 1975, p. 236–249.
- /5/ Muijderland, E. A.: „Luftgeschmierte Spirallager“, Kapitel 9 aus Bartz, W. J.; Luftlagerungen. 2. Auflage; Expert-Verlag; Esslingen; (1993); ISBN 3-8169-0992-2.

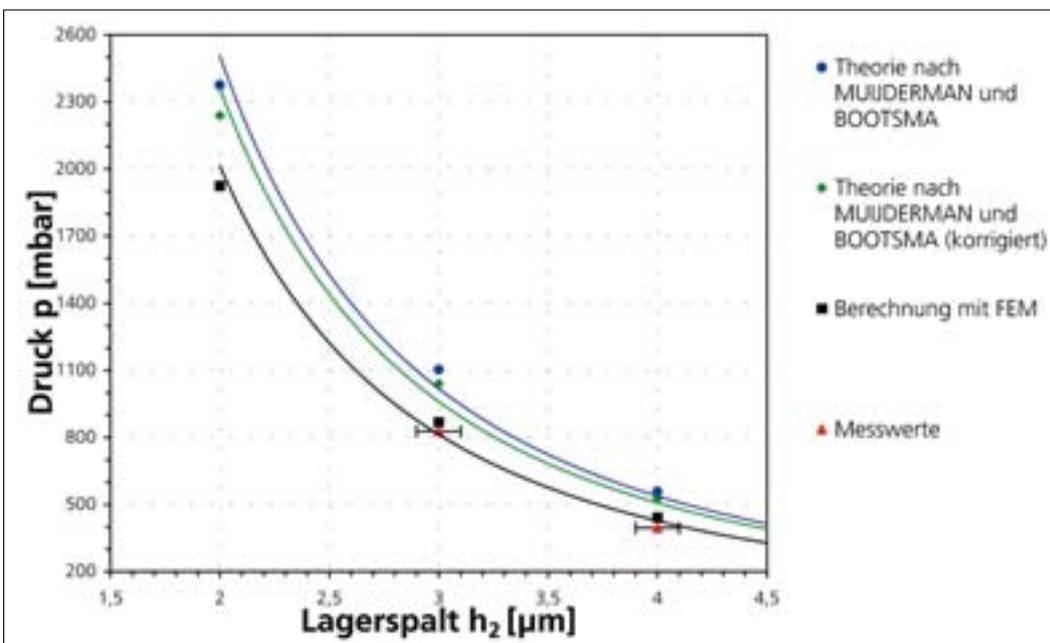


Abb. 5:
Vergleich der Ergebnisse:
Druck über dem Lagerspalt.

Fig. 5:
Comparison of results:
pressure via bearing gap.

Experimental investigations

Experimental investigations were carried out with a double spherical bearing. The pressure in the center of each bearing surface was determined as a criterion for the definition of the properties and for comparison with the theoretical results. The accurate balancing of the rotor was verified before starting these measurements. Approximately $\pm 5\%$ of deviation occurred between the computed and measured values (fig. 5). Furthermore, the results compare qualitatively well with previous scientific work /4/, /5/ (fig. 5). In absolute figures, the results concerning average pressure at infinite structure number are up to 20 % less than in previous articles. These deviations are due to the differences in mathematical approach for both calculation methods (analytical approximation versus FEM) and relate to specific edge effects.

Summary

In light of the increasing demands on precision engineering and microsystem technologies, bearings need to be optimized for highly specialized applications in relation to their characteristics and to the materials used. The theoretical and experimental results described above contribute to this objective. The principle of double spherical bearing is suitable for carrying axial and radial loads and provides guaranteed accuracy at a high speed. The large degree of stiffness is achieved by using hemispherical bearing surfaces. However, the more rounded the surface of the bearings, the greater the manufacturing effort involved. The load-carrying capacity and stiffness of self-acting bearings are limited. This applies especially to their radial properties. Figures of less than 20 N in relation to load-carrying capacity and less than 10 N/ μm for stiffness are typical for double spherical self-acting bearings. At the IOF, bearings are being developed for new applications such as scanner systems (fig. 6).

References:

- /1/ Muijderland, E. A.: „Spiral Groove Bearings“, Thesis PhD, TU Delft (1966).
- /2/ Risse, S.: „Ein Beitrag zur Entwicklung eines doppelsphärischen Luftlagers aus Glas-keramik“, Dissertation TU Ilmenau (2001).
- /3/ Lang, O. R., Steinhilper, W.: „Gleitlager“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1978), ISBN 3-540-08678-1.
- /4/ Bootsma, J.: „Spherical and Conical Spiral Groove Bearings“ – Part I and II. Trans, ASME Journal of Lubrication Technology, Series F, 97, 2 April 1975, p. 236–249.
- /5/ Muijderland, E. A.: „Luftgeschmierte Spirallinienlager“, Kapitel 9 aus Bartz, W. J., Luftlagerungen. 2. Auflage, Expert-Verlag, Esslingen, (1993), ISBN 3-8169-0992-2.



Abb. 6:
Rotor mit Polygonspiegel für
Scanner-Anwendungen.

Fig. 6:
Rotor with polygonal mirror for
scanning applications.