

# 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten  
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,  
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,  
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,  
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005  
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Helge Drumm  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau  
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

**St. Risse**

## **Sphärische Luftlager – Präzision für den optischen Gerätebau**

### **ABSTRACT**

Typisch für den optischen Gerätebau sind Lösungen bei denen Mechanik und Optik vereint ein neues leistungsfähiges System bilden. Das Prinzip des sphärischen Luftlagers erhält dabei durch die guten statischen und dynamischen Lagereigenschaften eine wachsende Aufmerksamkeit.

### **SPHÄRISCHES LUFTLAGER**

Im optischen Gerätebau sind genaue Bewegungsachsen eine permanente Forderung. Ob als präzise Spindel in Sondermaschinen, als Rundtisch mit exakter Teilung in Messanordnungen oder als Strahlableiter in Projektionssystemen oder Belichtern - Luftlager sind häufig die einzige Alternative für das Erreichen höchster Qualität der Bewegung.

Mit dem sphärischen Lagerprinzip (Abbildung 1) steht ein sehr geeignetes, technisch realisierbares Lagersystem zur Verfügung. Hohe Präzision ist für die Herstellung der Kugelflächen und die Abstimmung des Lagerpaltes notwendig. Vorteilhaft für den Lagerbetrieb ist der Effekt der Selbstzentrierung. Durch die Abstimmung der radialen und axialen Wirkfläche kann das Lager sehr gut den vorliegenden Belastungsverhältnissen angepasst werden. Der doppelsphärische Aufbau hat besondere Vorteile bezüglich Kippmomenten.

Die Berechnung aerostatischer, sphärischer Luftlager ist in den Arbeiten von UNTERBERGER [1] und BRUNGS [2] umfassend beschrieben. Dabei erfolgt die Zerlegung der komplexen Luftlager in Elementarlager.

Dynamische Luftlager nutzen die Relativbewegung der Lagerflächen zueinander. Der Druckaufbau und damit der selbstschmierende Effekt wird durch die lokal wirkende Einschnürung der Luft erreicht (Keileffekt). Umfangreiche Arbeiten zur Berechnung wurden hierzu von MUIJDERMAN [3] präsentiert. Das Prinzip des aerodynamischen Spiralrillenlagers ist für sphärische Luftlager von BOOTSMA [4] und RISSE [5] aufbereitet.

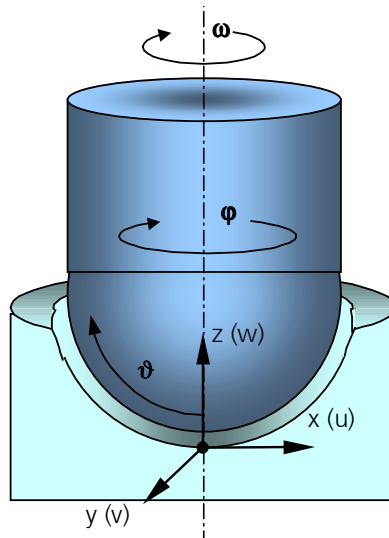


Abbildung 1 Prinzipdarstellung eines hemisphärischen Lagers [5]

### DOPPELSPHÄRISCHES LUFTLAGER

Ein doppelsphärisches Lager wird aus zwei sich gegenüberstehenden Kalotten gebildet. Der Rotor befindet sich zwischen den Lagerelementen und wird im Umgriff aufgenommen. Durch den Druckgradienten im Lager wird eine Vorspannung aufgebaut. Die sphärisch ausgeführten Stirnflächen des Rotors bilden die Rotorlagerflächen. Dabei kann der Rotor bikonkav oder bikonvex ausgeführt sein (Abbildung 2). Die Verbindungslinie der Kugelmittelpunkte des Rotors bestimmt die Rotationsachse des Lagers. Je größer der Abstand zwischen den Kugelmittelpunkten der Lagerflächen ist, um so größer ist die Kippsteifigkeit und damit die Stabilität des Lagers.

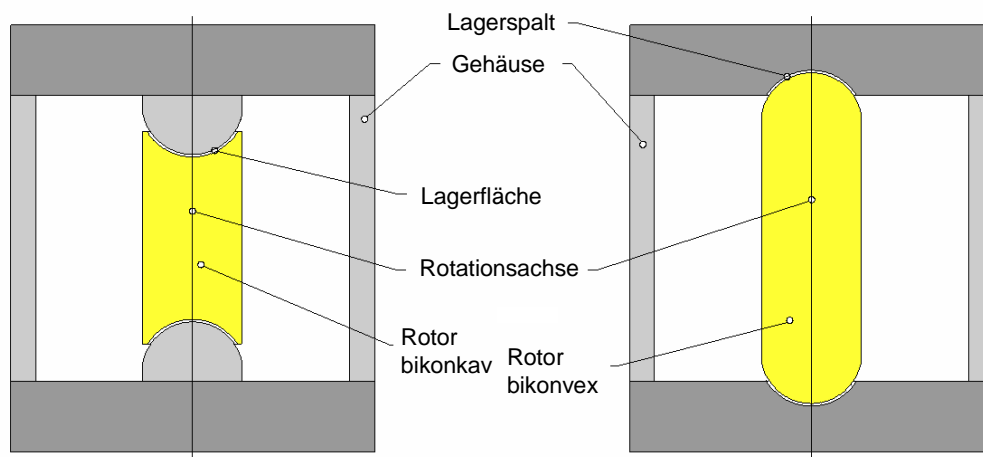


Abbildung 2 Varianten des doppelsphärischen Lagers [5]

### LAGERWERKSTOFF

Das Einhalten der Spaltbreite eines Luftlagers ist funktional wichtig. Verringert sich während des Betriebs der Lagerspalt oder berühren sich die Lagerflächen, kommt es zu irreversiblen

Beschädigungen und zum Ausfall des Lagers. Jede Einflussgröße, die zu einer Verringerung der Spaltgröße führt, muss daher bereits in der Entwurfsphase beachtet werden. Einige Faktoren sind die thermische Ausdehnung, das zentrifugale Wachsen und das axiale Schrumpfen, die Formstabilität, das Kriechverhalten, die Korrosion und die Partikelkontamination.

Häufig arbeiten Luftlager in langen Betriebszyklen. Dies gilt insbesondere für aerodynamische Lager. Die Notwendigkeit zahlreicher Start/Stop-Zyklen stellt besondere Anforderungen an das tribologische Verhalten der Lagerwerkstoffe.

Durch eine geeignete Werkstoffwahl wird die Betriebssicherheit von Lagern positiv beeinflusst. Nicht zuletzt sind fertigungstechnische und wirtschaftliche Aspekte bei der Werkstoffwahl zu beachten.

Nachfolgend sind Anforderungen an einen Lagerwerkstoff zusammengestellt [5]:

- **Mechanische Anforderungen:**

*Zentrifugales Ausdehnen und axiales Schrumpfen*

In Folge hoher Fliehkräfte kommt es zum zentrifugalen Wachsen des Rotordurchmessers und gleichzeitig zum axialen Schrumpfen. Eine Aussage zum Werkstoffverhalten gibt die spezifische Steifigkeit als Quotient des Elastizitätsmoduls zur Dichte.

*Kriechfestigkeit / Langzeitstabilität*

Die Formbeständigkeit von Lagern bzw. ihr Verformungsverhalten unter Last ist gekennzeichnet durch das plastische und elastische Verhalten der eingesetzten Werkstoffe. Als Parameter ist die Härte und die Sprödeheit bzw. Duktilität entscheidend.

- **Thermische Anforderungen:**

*Thermische Ausdehnung*

Während des Betriebes einer Lagerung kommt es häufig zu Temperaturänderungen der Baugruppe oder einzelner Komponenten. Eine Hauptquelle für die Erwärmung der Lager ist die Verlustleistung des Antriebs, im allgemeinen sind dies Wirbelstromverluste. Weiterhin sind Temperaturerhöhungen auf Reibungswärme an den Lagerflächen zurückzuführen. Die Wärmeausdehnung kann zum Verlust des Lagerspiels führen. Als wichtiger Werkstoffparameter ist hier der Längentemperaturkoeffizient zu beachten.

*Wärmeleitfähigkeit*

Da der Wärmeabfuhr eine große Bedeutung zukommt, sind Werkstoffe mit guter Wärmeleitfähigkeit zu wählen. Lager und Gehäuse sind so zu konstruieren, dass die anfallende Wärme an die Umgebung abgeführt werden kann.

- **Thermodynamische Anforderungen:**

*Korrosion*

Korrosion führt zur Ausbildung einer Oxidschicht und zur Veränderung der Lagerflächen. Die Mikrotopographie geometrischen Größen werden beeinflusst.

- **Tribologische Anforderungen:**

*Reibung*

Aerostatische Lager arbeiten nahezu reibungsfrei. Dennoch kann Gasreibung auftreten, wenn sehr große Lagerflächen und sehr kleine Lagerspalte gewählt werden.

Das Starten und Stoppen eines aerodynamischen Lagers ist immer reibungsbehaftet. Die Werkstoffpaarung der Lagerflächen ist geeignet zu wählen.

*Verschleiß*

Verschleiß führt zur Beschädigung der Lagerfläche, zu Partikelgenerierung, zur Veränderung der Lagergeometrie oder zumindest zu veränderten Reibwerten. Folglich sind Werkstoffe mit gutem Notlaufverhalten zu wählen.

- **Fertigungstechnische Anforderungen:**

*Bearbeitung*

Der Bearbeitungsaufwand und die damit verbundenen Kosten müssen im Verhältnis zur erforderlichen Qualität gesehen werden. Die zulässigen Formfehler müssen wesentlich kleiner als der zulässige Lagerspalt sein.

## GLASLAGER

Überall, wo es auf einen ruhigen, extrem reibungsarmen Lauf ankommt, wo Fluidschmierstoffe stören, wo Magnetfreiheit gefragt ist und wo an die Dämpfung keine besonderen Ansprüche gestellt werden, ist das Luftlager aus Glas prädestiniert. Die Bezeichnung „Glaslager“ deutet auf das im wesentlichen eingesetzte Material hin. Es handelt sich dabei um hochwertiges Glas oder ausgewählte Glaskeramik mit optischen Eigenschaften und großer spezifischer Steifigkeit. Als Lagerwerkstoff sind besonders Gläser und Glaskeramiken mit minimaler thermischer Längendehnung bzw. mit angepasstem Ausdehnungsverhalten, guter Bearbeitbarkeit und hoher Formstabilität geeignet. Ausgewählte Beispiele sind Kieselglas oder ZERODUR.

Diese Werkstoffe zeichnen sich durch folgende Eigenschaften für Lageranwendungen aus:

- keine duktile Verformung
- keine Bildung von Grat,
- keine Korrosion,
- temperaturunabhängige Laufeigenschaften,

- extrem niedrige Rauheitswerte und
- hohe Formgenauigkeit.

Nachteilig sind die nicht optimalen Trocken- bzw. Notlaufeigenschaften, die schlechte Wärmeleitung und die mögliche Mikrorissbildung.

## APPLIKATIONEN

Eine heute wieder interessante Variante der Langzeitarchivierung ist die Analogspeicherung großer Datenmengen auf Mikrofilmen. Die gleichmäßige Belichtung des Filmmaterials mit hoher örtlicher Auflösung (Schreibstrahlverfahren) erfordert präzise mechanische Bewegungsachsen. Der Bildaufbau erfolgt dabei synchronisiert über eine luftgelagerte Führung (y-Achse) und einen luftgelagerten Rotationsscanner ( $\phi$ -Achse) im Direktschreibmodus. Um die Belichtung zu realisieren wurde ein neuartiger Rotationsscanner auf Basis eines plansphärischen Luftlagers entwickelt (Abbildung 3). Die Bildinformation wird durch eine Faser in den Scanner eingekoppelt. Über optische Baugruppen innerhalb des Rotationsscanners erfolgt die Fokussierung auf den Film. In Testbelichtungen wurde die Auflösung von  $3,3 \mu\text{m}$  Pixelgröße erreicht und an einem ausbelichteten Gitter nachgewiesen. Der Belichter arbeitet mit über 7000 dpi.

Aufbauend auf dem am Fraunhofer-Institut Jena entwickeltem Grundkonzept der Anwendung anorganisch-nichtmetallischer Werkstoffe für die Herstellung von Präzisionsluftlagern wurde ein plansphärisches Luftlager entworfen, berechnet und aufgebaut. Das Präzisionslager arbeitet in einlassgedrosselter Bauweise nach dem aerostatischen Prinzip.

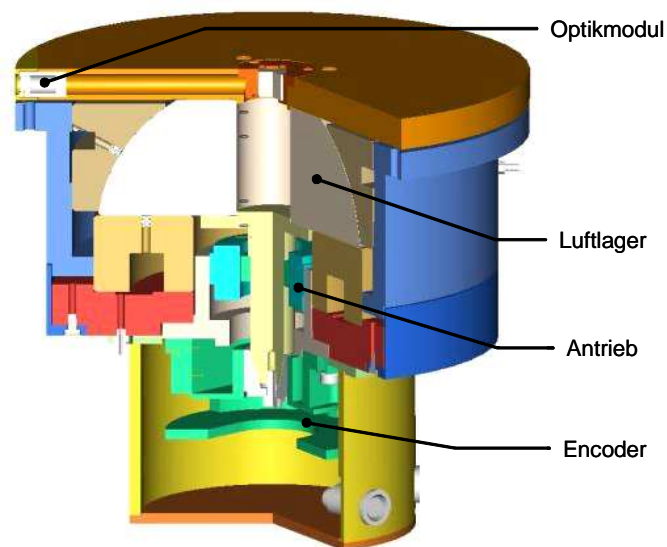


Abbildung 3 Modell des Rotationsscanners [6]

In Abbildung 4 ist das CAD-Modell des Luftlagers mit plankonvex ausgeführtem Rotor abgebildet. In jeder Lagerfläche wurden Mikrodüsen mit einem mittleren Durchmesser von  $100 \mu\text{m}$

angeordnet. Durch Abstimmung der Lagerradien werden die Lagerspalte auf 8 bis 10  $\mu\text{m}$  eingestellt. Die Parallelität des Lagerspaltes ist für die Eigenschaften des Luftlagers von Vorteil.

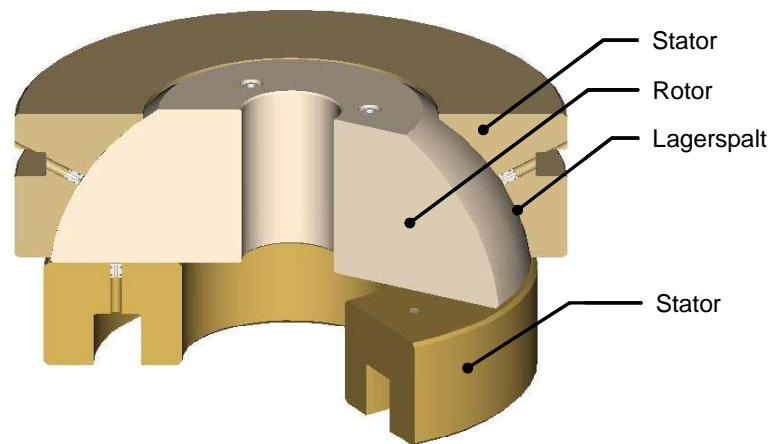


Abbildung 4 CAD-Modell des plansphärischen Luftlagers

Die Rund- und Planlauffehler aerostatischer, sphärischer Luftlager aus Glas oder Glaskeramik sind kleiner als 50 nm. Das montierte Luftlager ist in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5 Plansphärisches Luftlager [6]

## **POLYGONSCANNER FÜR HOCHTOURIGE ANWENDUNGEN**

Der Anwendung von Spiralrillenlagern kommt wegen der hohen Stabilität und der geringen Reibung eine große Bedeutung zu. Für die Strahlablenkung bei hohen Drehzahlen werden diese aerodynamischen Lager kombiniert mit einem Polygonspiegel eingesetzt.

Eine interessante Applikation ist eine Scannerbaugruppe für Projektions-Anwendungen. Dabei wird Laserlicht der Farben Rot, Grün und Blau über akustooptische Modulatoren, Ablenkeinheiten und Spezialoptiken auf eine Projektionsfläche geleitet. Abbildung 6 zeigt den doppelsphärischen Rotor eines selbstschmierenden Luftlagers. Der Polygonspiegel wird mit hoher Qualität durch Ultrapräzisionstechniken an den Rotor angearbeitet.



Die Baugruppe arbeitet bei  $60000 \text{ min}^{-1}$  und lenkt das Licht durch 40 Facetten präzise mit einem Rundlauffehler von kleiner 30 nm und einem Ablenkfehler von kleiner 5 Winkelsekunden ab.



Abbildung 6 Rotorbaugruppe eines Polygonscanners

### ZUSAMMENFASSUNG

Das Prinzip des doppelsphärischen Lagers ist geeignet, um axiale und radiale Belastungen aufzunehmen. Dabei wird die höchste Steifigkeit mit hemisphärischen Lagerflächen erzielt. Gleichzeitig steigt der Fertigungsaufwand mit zunehmender Krümmung der Lagerflächen.

Ausgewählte Gläser und Glaskeramik sind als Lagerwerkstoff für aerostatische und aerodynamische Luftlager geeignet.

Für den optischen Gerätebau steht damit ein interessantes Luftlager mit hoher Genauigkeit zur Verfügung.

#### Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Unterberger, R.: Vereinfachte Berechnung der Tragfähigkeit von aerostatischen Luftlagern und Führungen. F&M 87 (1979), S. 372-380
- [2] Brungs, S.: Experimentelle Untersuchungen und näherungsweise Berechnung von doppelsphärischen druckluftgespeisten Luftlagern unter verschiedenen Beanspruchungen. Diss., TU München (1979)
- [3] Muijdderman, E.A.: Spiral Groove Bearings. Thesis PhD; TU Delft (1966)
- [4] Bootsma, J.: Spherical and Conical Spiral Groove Bearings – Part I: Theory. Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, Series F, 97, 2, April 1975, p.236-242
- [5] Risse, S.: Ein Beitrag zur Entwicklung eines doppelsphärischen Luftlagers aus Glaskeramik. Diss., TU Ilmenau (2001)
- [6] Risse, S. *et al.*: Mechanik und Optik vereint – Langzeitarchivierung von farbigen Bildern auf Mikrofilm. IOF Jahresbericht 2003, S. 88-93

#### Autorenangabe:

Dr. Stefan Risse  
Fraunhofer Institut für angewandte Optik und Feinmechanik  
Albert-Einstein-Str. 7, 07745, Jena  
Tel: 0049 (0) 3641 807313  
Fax: 0049 (0) 3641 807604  
E-mail: stefan.risse@iof.fraunhofer.de