

# Optische Schlupfmessung an rotierenden Wälzlagern und deren Auswertung mit digitaler Bildverarbeitungstechnik

## Optical Slip Measurement of Roller Bearings and Analysis with Digital Image Processing

M.Sc. **Sahar Mirzaei**, Dr.-Ing. **Thomas Fahlbusch**,  
Prof. Dr.-Ing. **Eduard Reithmeier**, Prof. Dr.-Ing. **Gerhard Poll**,  
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

### Kurzfassung

Um den frühzeitigen Ausfall von Wälzlagern zu verhindern, muss die Kenntnis vorhanden sein, bei welchen Betriebsbedingungen die Wälzkörper eines Zylinderrollenlagers nicht nur rotieren sondern auch gleiten. Es existieren verschiedene Methoden zur Messung des Lagerschlupfes. Aber es ist festzustellen, dass die Methoden der Schlupfmessung an Wälzlagern einen hohen Aufwand bedeuten und nur für eine kleine Menge von Lagertypen geeignet sind. Die Mehrzahl der industriell eingesetzten Wälzlager kann mit derartigen Methoden nicht untersucht werden.

In diesem Beitrag wird eine neue Methode für die optische Messung des Wälzkörperschlupfes vorgestellt. Bei dieser Methode werden ein Bildderrotator und eine Hochgeschwindigkeitskamera verwendet, um die Bewegung der Zylinderrollenlager während des Betriebs zu erfassen. Weiterhin werden Methoden der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt, um die Wälzkörperdrehzahlen zu bestimmen und den Wälzkörperschlupf hieraus zu berechnen. Dieser Beitrag beinhaltet einen Überblick über den Aufbau und das Funktionsverhalten des Bildderrotators, über die Algorithmen zur Bildverarbeitung sowie die Darstellung der Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen. Hierbei wird unter anderem aufgezeigt, dass mit dieser neuartigen, innovativen Messmethode die Zusammenhänge zwischen den Betriebsbedingungen des Wälzlagers und dem Schlupf ermittelt werden können.

### 1. Einleitung

Unter idealen kinematischen Bedingungen funktioniert ein Zylinderrollenlager wie Planeten-Reibradgetriebe. Wenn die Radiallast im Zylinderrollenlager zu gering ist um einen ausreichenden Reibschluss der Wälzkörper mit dem Innen- und Außenring zu erzeugen,

rollen die Wälzkörper nicht mehr einwandfrei aufeinander ab. Es tritt Schlupf auf. Dieses bedeutet, dass die Rotationsbewegung der Wälzkörper mit einer Gleitbewegung überlagert ist. Der Schlupf  $S$  wird aus der Differenz zwischen der theoretischen und realen Wälzkörperdrehzahl berechnet.

$$S = \frac{n_{theor.} - n_{meas.}}{n_{theor.}} \quad (1)$$

Schlupf einzelner Wälzkörper oder des gesamten Wälzkörpersatzes kann in einem Wälzlager gravierende Schäden an der Lauffläche verursachen. Durch die Relativbewegung der Wälzkörper wird kein ausreichender Schmierfilm mehr erzeugt. Hierdurch werden die Bauteiloberflächen nicht mehr ausreichend voneinander getrennt. Durch den Festkörperkontakt kann es zu so genannten „Anschmierungen“ kommen die im weiteren Verlauf eine Ermüdung der Laufflächen zur Folge haben. Diese Schäden beeinflussen die Genauigkeit sowie das Lauf- und Geräuschverhalten so stark, dass das Lager nach weiterer kurzer Betriebszeit nicht mehr einsatzfähig ist [11]. Es ist nicht zwangsläufig, dass ein mit Schlupf laufendes Zylinderrollenlager in kürzester Zeit verschleißt. Jedoch ist es wichtig, die Betriebsbedingungen, unter denen Wälzkörperschlupf auftritt, zu kennen und den Schlupf zu bestimmen. Es existieren verschiedene Methoden zur Messung des Schlupfes [1-6]. Aber insbesondere der Schlupf einzelner Wälzkörper und dessen schnelle Änderung beim Eintritt in die belastete Lagerzone können noch nicht ausreichend genau erfasst werden. In diesem Beitrag wird eine neue Methode für die optische Messung des Wälzkörperschlupfes vorgestellt. Bei dieser Methode werden ein Bildderrotator und eine Hochgeschwindigkeitskamera verwendet, um die Zylinderrollenlager während des Betriebs zu beobachten. Weiterhin werden Methoden der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt, um die Wälzkörperdrehzahlen zu bestimmen und den Wälzkörperschlupf zu berechnen. In diesem Artikel wird ein Überblick über den Versuchsaufbau und die Algorithmen zur digitalen Bildverarbeitung gegeben, das Funktionsverhalten des Bildderrotators erläutert sowie Ergebnisse experimentellen Untersuchungen dargestellt.

## 2. Bildderrotator

Der Hauptbestandteil des Derotators ist ein Bilddrehprisma. Durch die Anordnung von beobachtetem Objekt, Prisma und der Bildebene wird ein stehendes Bild des rotierenden Objekts erzeugt. Die Bewegungen des Objekts und des Prismas müssen hierzu aufeinander abgestimmt werden. Wird das rotierende Objekt durch das Bilddrehprisma (hier Dove-

Prisma) hindurch beobachtet, das mit der halben Winkelgeschwindigkeit in gleicher Drehrichtung rotiert, so erscheint das Objekt ruhend. Bild 1 zeigt den optischen Strahlengang bei zwei verschiedenen Drehwinkelstellungen des Prismas.

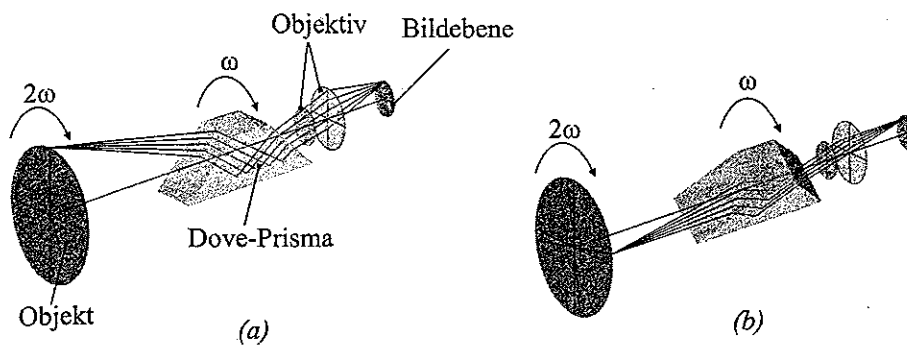


Bild 1: Strahlengang durch das Dove-Prisma bei zwei verschiedenen Drehwinkelstellungen (a) Objektdrehwinkel  $2\omega = 0^\circ$  (b) Objektdrehwinkel  $2\omega = 80^\circ$  [7]

Voraussetzung für ein stehendes Bild des rotierenden Objekts ist, dass die optische Achse des Prismas, die Drehachse seines Antriebs sowie die Objektdrehachse identisch sind. Um die Drehachse des Derotators auf die Drehachse eines Objektes einzurichten, verfügt der Bildderotator über eine kardanische Verstelleinheit. Die Drehzahlsynchronisierung des Derotatorantriebs zum Objekt im Verhältnis 1:2 erfolgt mit einer elektronischen Regelung. Die maximale Drehzahl des Objekts mit diesem Aufbau beträgt  $n_{\max} = 10.000$  U/min.

### 3. Experimentelle Untersuchungen

Zur Ermittlung des Wälzkörperschlupfs wird die Geschwindigkeit des Wälzkörpers im Betrieb ermittelt. Hierfür werden mit dem Derotator experimentelle Untersuchungen an einem Zylinderrollenlager durchgeführt.

#### 3.1 Versuchsaufbau

Bild 2 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau dieser Untersuchungen. Er besteht aus dem Einzellagerversuchstand, dem Bildderotator und einer Hochgeschwindigkeitskamera. Die Hochgeschwindigkeitskamera ist eine CMOS-Camera mit der zeitlichen Auflösung von  $f = 500$  Bilder/s mit einer maximalen Bildauflösung von  $1280 \times 1240$  Pixel. Der full camera Link Frame Grabber ermöglicht einen Bilddaten-Transfer mit einer Geschwindigkeit bis  $528$  MB/s zum Host.

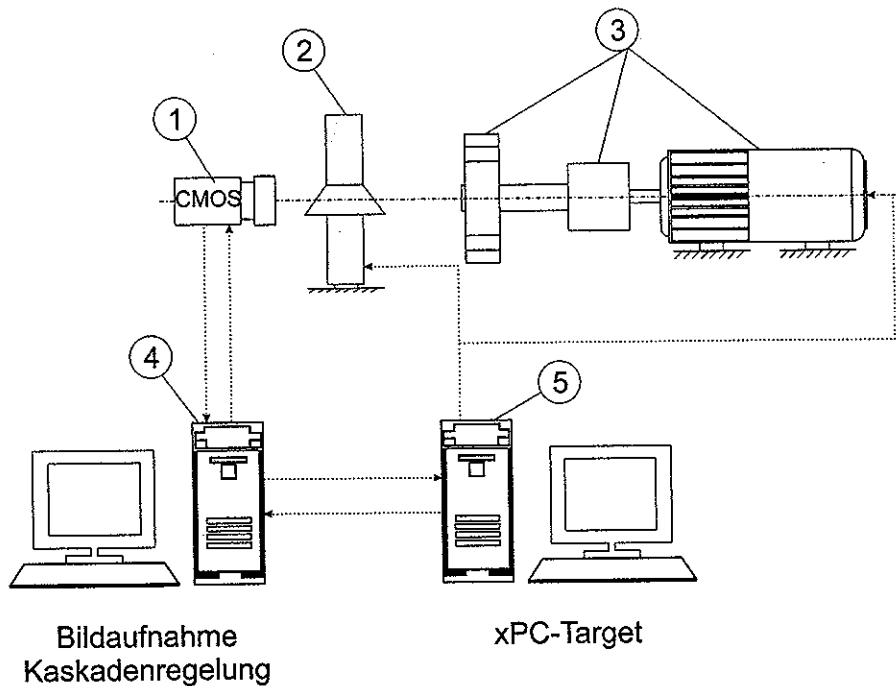


Bild 2: Schematische Darstellung des Versuchsstands. 1) Hochgeschwindigkeitskamera, 2) Bildrotator, 3) Wälzlagerprüfstand 4) Host PC 5) Target PC

Bild 3 zeigt eine Schnittansicht des Einzellagerversuchsstands am IMKT. Der Antrieb erfolgt über einen Gleichstrom-Nebenschlussmotor, dessen Drehzahl stufenlos geregelt werden kann. Über eine Kupplung erfolgt der Antrieb der Welle. Die Welle ist mittels axial vorgespannter Schrägkugellager in O-Anordnung (ein Lagerpaar im Tandem und ein einzelnes Lager) gelagert, um eine möglichst hohe Steifigkeit zu erreichen. Die Drucklinien der Tandemlageranordnung treffen sich im Bereich des Versuchslagermittelpunkts. Dadurch wird der Einfluss der Wellendurchbiegung minimiert. Während der Innenring des Versuchslagers auf der Welle sitzt, stützt sich der Außenring in einer Lageraufnahme ab. Diese ist auf einem Dynamometer zur Kraftmessung montiert.

Das verwendete Prüflager ist ein Zylinderrollenlager der Baureihe NU 216 ECP. Es besitzt einen Bohrungs- und Außenringdurchmesser von 80 mm x 140 mm sowie eine Breite von  $b = 26$  mm. Das Lager hat 18 Zylinder und seine dynamische Tragzahl beträgt  $C = 160$  kN. Die Regelung der Derotatorwinkelgeschwindigkeit wird mit xPC Target durchgeführt. xPC-Target ist eine Matlab-Erweiterung um ein Echtzeitsystem auf einer Standard PC-Hardwareumgebung laufen zu lassen.

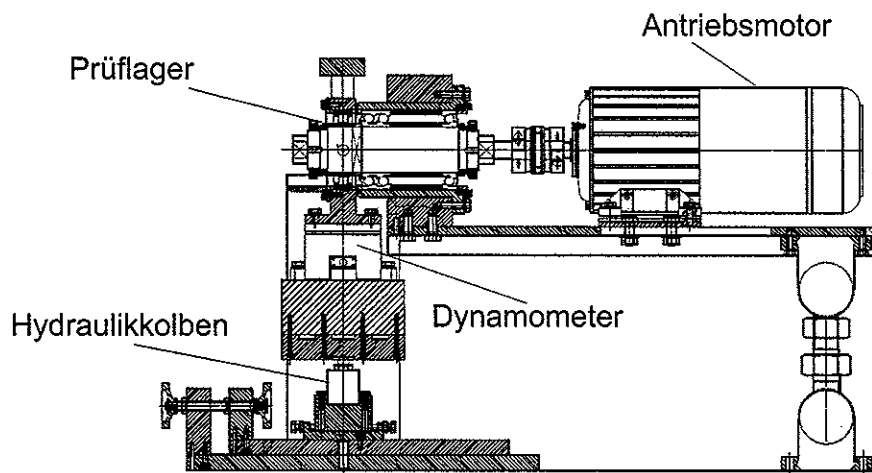


Bild 3: Einzellagerversuchstand

### 3.2. Versuchsdurchführung

In diesen Versuchen dreht sich der Derotator mit der halben Geschwindigkeit von dem Käfig des Wälzlagers. Dadurch wird die Drehung des Wälzkörpers um den Innenring eliminiert und nur die Eigenrotation der Wälzkörper beobachtet. Für die Messung der Käfigdrehzahl wird ein hell-dunkel Strich Code auf dem Käfig des Wälzlagers angebracht und dessen Drehzahl und Drehrichtung mit 2 Lichtschranken erfasst (Bild 4).

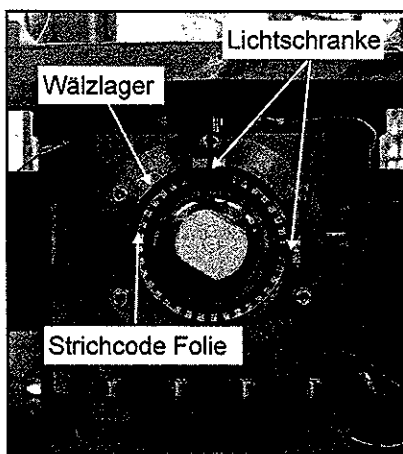


Bild 4. Ermittlung der Käfigdrehzahl

An der Welle ist ein Drehgeber installiert, um die Drehzahl des Innenrings zu messen und hierdurch die theoretische Drehzahl des Wälzkörpers zu berechnen. Die Welle wird mit einer Drehzahl  $n = 200-2000 \pm 10$  rpm angetrieben. Der Radiallast  $F_r$  wird für die experimentellen Untersuchungen in vier Stufen eingestellt:  $F_r = 0$  N,  $F_r = F_{rm}$  (Gleichung 2) sowie  $F_r$  entsprechend  $C/F = 13$  und  $C/F = 10$ . Wegen der Abhängigkeit von der Drehzahl sind bei

den untersuchten Lagerdrehzahlen unterschiedliche Werte der Mindest-Radialbelastung vorhanden. Als Schmiermittel wird Mineralöl verwendet.

$$F_{rm} = k_r \left( 6 + \frac{4n}{n_r} \right) \left( \frac{d_m}{100} \right)^2 \quad (2)$$

mit:

$F_{rm}$  = Mindest-Radialbelastung [kN]

$k_r = 0,15$  (Radialfaktor)

$n$  = Betriebsdrehzahl, rpm

$n_r$  = Referenzdrehzahl, (5300 rpm)

$d_m$  = mittlerer Lagerdurchmesser

$d_m = 0.5(d + D) = 110$  mm

Für die Drehzahlerkennung ist ein Wälzkörper mit 3 Markierungen auf der Oberfläche versehen. Durch Beobachtung der Markierungen auf der Wälzkörperoberfläche und der Berechnung der zurückgelegten Strecke, wird die Wälzkörperdrehzahl bestimmt. Für das Verfolgen der Marker werden Algorithmen der Bildverarbeitung eingesetzt.

### 3.3 Algorithmen zur optischen Bildverarbeitung

Zum Erfassen der Markierungen des Wälzkörpers in der Bilderreihe wird der gewünschte Wälzkörper in den Bildern ausgewählt. Danach wird ein Kreis auf den Wälzkörper angepasst. Für die Anpassung des Kreises wird die Hough-Transformation Methode verwendet. In der Hough-Transformation Methode zum Finden des Kreises wird der Intensitätsgradient des Graustufenbildes berechnet [8]. Danach wird eine Schwellwertfunktion angewendet, um die signifikanten Kanten zu detektieren. Anschließend kann für jeden Kreis, der zu detektieren ist, ein separater Kreisfilter benutzt werden:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2 \quad (3)$$

Für jedes Kantenpixel  $(x,y)$  wird die Position aller möglichen Kreismittelpunkte  $(x_c, y_c)$  mit dem Radius  $R$  in einem Parameterraum akkumuliert. Dies bildet einen 3-dimensionalen Parameterraum, wobei die Koordinaten den Kreismittelpunkt und den Radius des Kreises darstellen. Schließlich wird in den Parameterraum nach dem Maximum Peak gesucht. Der entspricht dem Kreismittelpunkt mit dem gesuchten Radius. Diese Methode ist sehr robust gegenüber Bildstörungen und teilweisen Verdeckungen der Objekte (Bild 5). Abhängig von dem Bild und den Einstellungen der Parameter kann der Parameterraum (Akkumulatormatrix) verschiedene Rauschpegel und Frequenz besitzen. Zum Unterdrücken

der dominanten Rauschfrequenz wird ein Filter zur Glättung der Akkumulatorsmatrix eingesetzt.

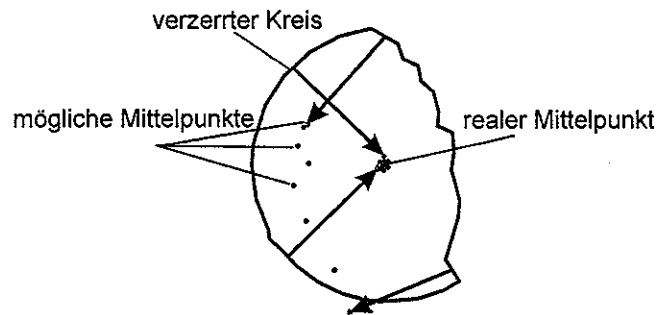


Bild 5: Robustheit der Hough-Transformation

Nach der Anpassung des Kreises auf den Wälzkörper wird darauf eine Polartransformation durchgeführt. Anschließend wird der Marker durch die Korrelationsmethode verfolgt. Bild 6 zeigt den Ablauf des gesamten Algorithmus für ein einzelnes Bild. Zur Messung der Wälzkörperdrehzahl muss dieser Algorithmus bei allen aufgenommenen Bildern der Hochgeschwindigkeitskamera angewendet werden.

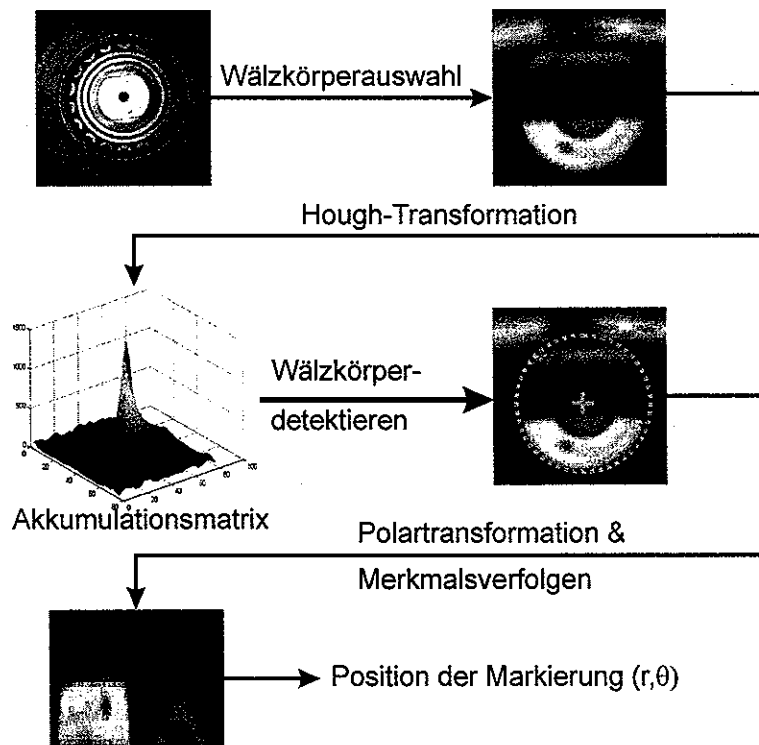


Bild 6: Algorithmus zur Positionserkennung des Markers auf dem Wälzkörper [9]

#### 4. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Mit dem oben beschriebenen Algorithmus wird der Winkel  $\theta$  des Markers in jedem Bild bestimmt. Der Zeitabstand zwischen zwei sequenziellen Bildern ist auch bekannt. Die Wälzkörperdrehzahl wird berechnet durch:

$$n = \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

Mit den Geometriedaten des Wälzlagers und der Innenringdrehzahl kann die kinematische Wälzkörperdrehzahl berechnet werden [10]:

$$n_R = \frac{n_s}{2} \left( \frac{D_p}{D_R} - \frac{\cos^2 \alpha}{D_p/D_R} \right) \quad (5)$$

mit:

$n_R$  : Wälzkörperdrehzahl, rpm

$n_s$  : Drehzahl der Welle, rpm

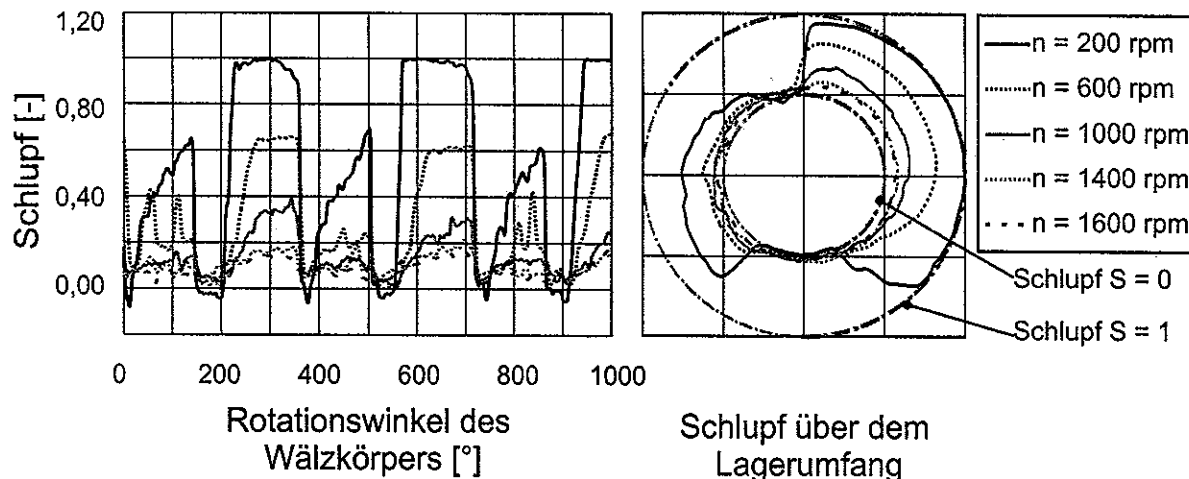
$D_p$  : Teilkreisdurchmesser = 111.3 mm

$D_R$  : Wälzkörperdurchmesser = 16 mm

$\alpha$  : Betriebsdruckwinkel = 0°

Bild 7 zeigt den Wälzkörperschlupf während des Betriebs bei der Lagerkraft  $F = 1,3$  kN. Der Wert  $S = 0$  bedeutet, dass es keine Schlupf gibt und der Wälzkörper sich mit der korrekten kinematischen Drehzahl bewegt. Der Wert  $S = 1$  bedeutet eine reine Gleitbewegung des Rollkörpers. In diesem Fall besitzt der Wälzkörper keine Drehbewegung um seine eigene Achse.



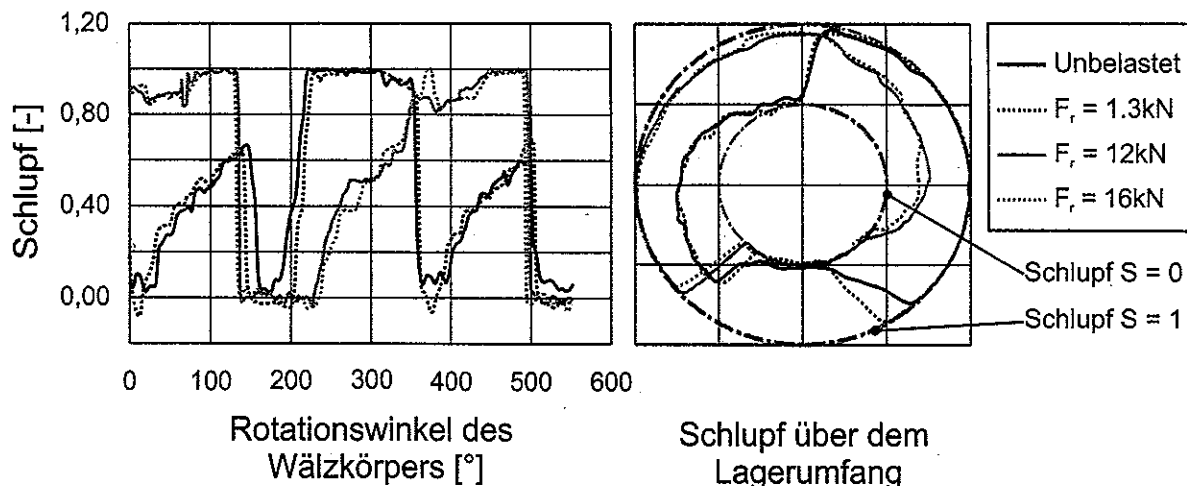


|                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| Wälzlager: Nu216 ECP | $F_r = 1,3 \text{ KN}$ |
| Schmiermittel: T9    |                        |

Bild 7: Einfluss der Lagerdrehzahl auf den Schlupf

Links in Bild 7 wird der Wälzkörperschlupf über dem Drehwinkel des Lagers auf einer linearen Achse aufgetragen. In der rechten Bildhälfte wird der Schlupf während einer Lagerumdrehung dargestellt. Mit zunehmender Lagerdrehzahl nimmt der Wälzkörperschlupf prinzipiell ab. Ein Grund hierfür ist die Trägheit der Wälzkörper. Bei niedrigen Drehzahlen ist für den Wälzkörper ausreichend Zeit vorhanden, die Beschleunigungen beim Ein- und Austritt der Lastzonen auszuführen. Bei hohen Drehzahlen führen die Wälzkörper wesentlich geringere Beschleunigungen im Bereich der Lastzone aus. Dieses ist in Bild 7 links zu erkennen. Der Wälzkörper ist bei niedriger Drehzahl in sehr kurzer Zeit vollständig abgebremst und besitzt den Schlupf  $S = 1$ . Anschließend erfolgt die Beschleunigung auf  $S = 0$ . Diese Brems- und Beschleunigungsphasen sind eine Ursache für Anschmierungen des Wälzkörpers.

Im Bild 7 ist rechts zu erkennen, dass zwei Winkelbereiche am Lager vorhanden sind, wo der Schlupf bei allen Geschwindigkeiten und bei der Lagerkraft  $F = 1,3 \text{ kN}$   $S = 0$  ist. Dieses ist im oberen Teil des Lagers (lastfreie Zone) sowie im unteren Teil des Lagers (belastete Zone). Die Größe der Lagerkraft beeinflusst die Größe und Lage dieser Bereiche signifikant. Dieses wird in Bild 8 bei der konstanten Drehzahl  $n = 200 \text{ rpm}$  dargestellt.



Wälzlager: Nu216 ECP    Drehzahl:  $n = 200$  rpm  
 Schmiermittel: T9

Bild 8: Einfluss der Lagerkraft auf den Schlupf

Bei keiner bzw. niedriger Lagerkraft  $F = 0/1,3$  kN existieren zwei Bereiche ohne Schlupf. Bei diesen geringen Lastverhältnissen sind kaum Verformungen der Lagerkomponenten vorhanden. Das Gewicht des Käfigs und der Rollen wird von den oberen Wälzkörpern getragen, was die Wälzkörper auf die innere Lauffläche drückt. Die Wälzkörper im unteren Lagerbereich drücken mit ihrem Eigengewicht auf die äußere Lauffläche. Dieses ist die Ursache für den geringen Schlupf. Bei Erhöhung der Lagerlast mit  $F = 12/16$  kN verändern sich die Schlupfverhältnisse. Die unteren Wälzkörper werden an den Innenring gedrückt. Zusätzlich ist unter der Last eine kleine Verformung des Lagers vorhanden. Hierdurch werden die oberen Wälzkörper nicht mehr auf den Innenring gedrückt, so dass ungenügend hohe Reibung vorhanden ist, um die Rotationsbewegung zu erzeugen.

## 5. Zusammenfassung

Mit der neuartigen optischen Messung mit dem Bildrotator des Instituts für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover werden Schwingungseffekte an technischen Komponenten ermittelt, die mit konventionellen Methoden bisher nicht messbar sind. Der Derotator nutzt die optischen Eigenschaften eines Prismas sowie einen speziellen Versuchsaufbau, um rotierende Objekte in einem ruhenden Zustand zu erfassen. Mittels digitaler Bildverarbeitungstechnik und -algorithmen werden kinematische Informationen über das zu betrachtende Objekt gewonnen. Am Beispiel eines Wälzlagers wird gezeigt, dass mit dieser Technik das Schlupfverhalten der Wälzkörper gemessen werden kann. Dieses ist unter dem Aspekt des Lagerverschleißes und der Betriebsfestigkeit des Lagers von Bedeutung.

Durch die Messung des Schlupfverhaltens mit dem Bildderotator werden Erkenntnisse über das Betriebsverhalten des Lagers gewonnen. Dieses kann für die präventive Ermittlung des Ausfallrisikos des Lagers genutzt werden, bevor ein ungeplanter, kostenintensiver Ausfall des Lagers und des gesamten technischen Systems auftritt. Die Messergebnisse zeigen, dass die Lagerkraft und die Lagerdrehzahl bedeutsame Einflussgrößen auf den Lagerschlupf sind. In Abhängigkeit dieser Parameter verschieben sich die Lastverhältnisse innerhalb des Lagers. Dieses führt zu einer Verlagerung und Ausdehnung der maximalen und minimalen Schlupfwerte. Hierdurch werden das Belastungsprofil der Lagerringe und die tribologische Verschleißwirkung des Lagers beeinflusst.

### Danksagung

Diese Arbeiten werden von der Europäischen Union im Rahmen des Marie Curie Action, Framework Program 6, unterstützt.

Die Autoren bedanken sich außerdem bei SKF ERC, Niederlande, für die Koordination des Projektes.

### Literatur

- [1] Wadewitz, M., 1993, Ansmierungserscheinungen; Ursachen der Ansmierung im Wälz-/Gleitkontakt, Forschungsvereinigung Antriebstechnik E.V., Heft 384
- [2] Wiemer, M., 1990, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Betriebsverhalten vollrolliger Zylinderrollenlager, Hannover
- [3] Giese, P., Scherb, B., 1992, Wälzkörpersatzschlupf bei Zylinderrollenlager, Antriebstechnik31, 54-60
- [4] Boness, R. J., 1969, Cage and Roller Slip in High-speed Roller Bearings, Journal Mechanical Engineering Science, Vol. 11, Nr.2, 181-188
- [5] Östensen, J. O., 1995, Lubrication of Elastohydrodynamic Contacts Mainly Concerning Low Temperature, Högskolans Tryckeri, Lulea
- [6] Tessenow, F., 1973, Theoretische und experimentelle Untersuchungen schnelllaufender Zylinderrollenlager, TU Braunschweig
- [7] Mirzaei, S., Kasyanenko, N., Beichert, G., Reithmeier, E., 2007, Entwicklung eines neuartigen optomechanischen Bildderotators, DGaO-Proceedings 2007 – <http://www.dgao-proceedings.de> – ISSN: 1614-8436

- [8] Duda, R. O, Hart, P. E., 1972, Use of the Hough Transform to Detect Lines and Curves in Pictures, Communication of the ACM 15, 11-15
- [9] Mirzaei, S., Fahlbusch, T., Reithmeier, E., Poll, G., 2008, Experimental Slip Measurement of Roller Bearings, 2nd PhD Conference AI4IA, Hannover
- [10] Brändlein, J., 1995, Die Wälzlagerpraxis, Vereinigte Fachverlage
- [11] Hambrecht, R, 1999, Anschmiererscheinungen in Wälzlagern bei Fettschmierung, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg