

## 7. Literatur

- [1] DIN ISO 10816: Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen. Berlin: Beuth
- [2] DIN ISO 1940-1: 2004: Anforderungen an die Auswuchtgüte von Rotoren in konstantem (starrer) Zustand - Festlegung und Nachprüfung der Unwucht toleranz. Berlin: Beuth
- [3] VDI 3839: Hinweise zur Messung und Interpretation der Schwingungen von Maschinen. Berlin: Beuth
- [4] Magnus, K.; Popp, K.; Sextro, W.: Schwingungen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008

## Schwingungsanalyse von rotierenden Objekten mit einem optomechanischen Bildderotator

Dipl.-Wirtsch.-Ing. **B. Rohloff**, Dipl.-Ing. **S. Schwarzendahl**,  
 Prof. Dr.-Ing. **J. Wallaschek**, Prof. Dr.-Ing. **E. Reithmeier**,  
 Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover

### Kurzfassung

Die genaue Ermittlung des schwingungstechnischen Systemverhaltens von rotierenden Objekten ist Gegenstand zahlreicher Forschungsvorhaben in verschiedensten Unterdisziplinen des Maschinenbaus. Die vorliegende Arbeit zeigt wie Simulationen und Messungen im Stillstand hervorragend durch Untersuchungen am rotierenden System ergänzt werden können. Hierfür werden ein optomechanischer Bildderotator und ein Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) verwendet. Die Gegenüberstellung der Messungen beider Systemzustände zeigt eindeutig das Potential dieser Kombination von Messsystemen.

### Abstract

The exact identification of the system behavior of rotating objects with respect to vibrations is the subject of many research projects in various sub-disciplines of mechanical engineering. This paper shows, that investigations of the rotating object can complement simulations and measurements at non-operating state. An optomechanical image derotator and a Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) is used. The comparison of measurements in both states indicates the potential of the combination of these measurement technologies.

### 1. Einleitung

Die Untersuchung des dynamischen Verhaltens rotierender Objekte mit optischen Messverfahren ist für ein umfassendes Verständnis des jeweiligen Systemverhaltens unerlässlich. Das Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR) der Leibniz Universität Hannover forscht seit nunmehr drei Jahrzehnten auf dem Gebiet der Derotatoren, die es ermöglichen durch eine Derotierung des drehenden Koordinatensystems optische Messverfahren aus dem stationären Laborkoordinatensystem heraus auf die Messobjekte anzuwenden. Die aktuelle Entwicklungsstufe des IMR-Derotators bietet Unterstützung für eine Vielzahl von Messaufgaben. So ermöglicht der Derotator beispielsweise schwingungstechnische Untersuchungen mit einem Laser-Doppler-Vibrometer an Turbinenschaufelkränzen durchzuführen oder mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitskameratechnik das Rotationsverhalten der

Wälzkörper in Lagern zu analysieren. Der neue IMR-Derotator bietet sogar die Möglichkeit thermografische Untersuchungen beispielsweise an Brems- oder Schleifscheiben durchzuführen. Auf diesen Entwicklungsschritt wird im folgenden Kapitel detailliert eingegangen. Damit Verbesserungspotentiale anwendungsnah identifiziert werden können, kooperiert das IMR mit dem Institut für Dynamik und Schwingungen (IDS). Gemeinsam wird im Rahmen dieser Veröffentlichung ein Turbinenradmodell, das am IDS eingehend analysiert wurde, während des Betriebs mit einem Laser-Doppler-Vibrometer untersucht.

## 2. Prinzip der Derotatorentechnologie

Die ersten Entwicklungsstufen des IMR-Derotators basierten auf einem Dove-Prisma. Eine Drehung des Dove-Prismas um einen definierten Winkel  $w$  um die Längsachse lässt ein durch das Prisma betrachtetes Objekt um  $2w$  rotieren (Bild 1).

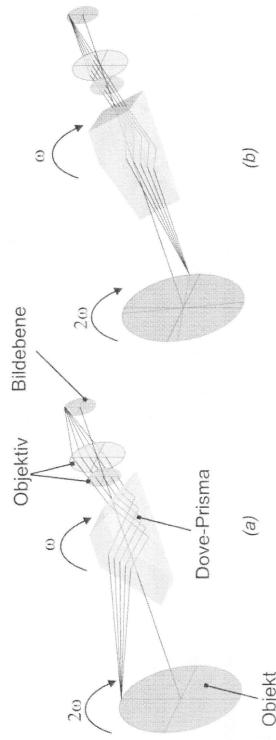


Bild 1: Strahlengang durch das Dove-Prisma bei zwei verschiedenen Drehwinkelstellungen  
(a) Objektdrehwinkel  $2w = 0^\circ$  (b) Objektdrehwinkel  $2w = 80^\circ$  [1]

Mit einem solchen Dove-Prisma untersucht Reithmeier et al. [1] mit einer Hochgeschwindigkeitskamera den Schlupf von Wälzkörpern und erzielt grundlegende Erkenntnisse für das Verständnis des dynamischen Verhaltens von Wälzlagern. Darüber hinaus werden auch schwingungstechnische Messungen mit einem LDV an einer Trennscheibe vorgenommen. Mirzaei et al. [2] und Rahives et al. [3] erweitern diese Messungen auf ein Sägeblatt, identifizieren Schwingungsmoden und stellen das Campbell-Diagramm auf. Gemeinsam kommen sie zu dem Ergebnis, dass die Derotatorentechnik hilfreich für das Verständnis des dynamischen Verhaltens rotierender Objekte ist. Allerdings bringt die Verwendung eines Dove-Prismas einige Nachteile mit sich, die nicht außer Acht gelassen werden dürfen. So beschreibt Mirzaei [4] in ihrer Dissertation ausführlich, dass es zu Aberrationen kommt, wie sie üblicherweise

bei der Verwendung von Linsen auftreten. Das Dove-Prisma kann darüber hinaus nicht für thermografische Untersuchungen genutzt werden, da es im Infrarotbereich undurchlässig ist. Von besonderer Bedeutung für die Laser-Doppler-Vibrometrie ist jedoch die Tatsache, dass polarisiertes Licht durch das Dove-Prisma in Abhängigkeit von der Drehwinkellage intensitätsmoduliert wird, wodurch je nach Polarisationszustand des einfallenden Lichts, in Abhängigkeit von dem Rotationszustand des Prismas ein Teil von dem Licht nicht von der Prismabasisfläche reflektiert wird und somit aus dem Glas austritt [4]. Der Referenzstrahl von Laser-Doppler-Vibrometern ist linear polarisiert. Die Messsignalintensität kann stark absinken, so dass es notwendig wird die Laserleistung oder Reflektivität der Oberfläche zu erhöhen, da es sonst nicht möglich ist ein fehlerfrei analysierbares Messergebnis zu erhalten. Damit diese Artefakte umgangen werden können, stellt Mirzaei [4] in ihrer Arbeit ein erweitertes Derotator-konzept vor, dass mit einer Spiegelkörper-Anordnung, genannt Spiegel-Dove (Bild 2) arbeitet. Sie verwendet den neuen Derotator für weitere Untersuchungen an Wälzlagern mittels Bildverarbeitung.

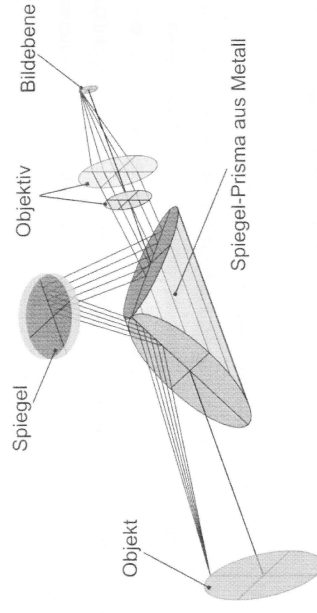


Bild 2: Prinzip der neuen Derotatorgeneration mit Spiegel-Dove

## 3. Versuchsaufbau

Als Messobjekt wird eine Blisk (Schaufelrad) des Instituts für Dynamik und Schwingungen verwendet, die bereits Gegenstand zahlreicher Untersuchungen war (Bild 3). Diese wird durch einen Magneten angeregt, dessen Magnetfeld mit Hilfe eines Frequenzgenerators harmonisch variiert werden kann. Der Magnet ist inertial mit dem Rahmen des Messaufbaus verbunden. Dadurch können gezielt die Eigenformen der Blisk angeregt werden, die dann eindeutig im Frequenzspektrum erkennbar sind. Einige Meter entfernt befindet sich der Derotator auf einem Hexapod. Diese 6-achsige Parallelkinematik erlaubt eine präzise Kalibrierung der optischen Achse des Derotators auf die Rotationsachse des Messobjekts.

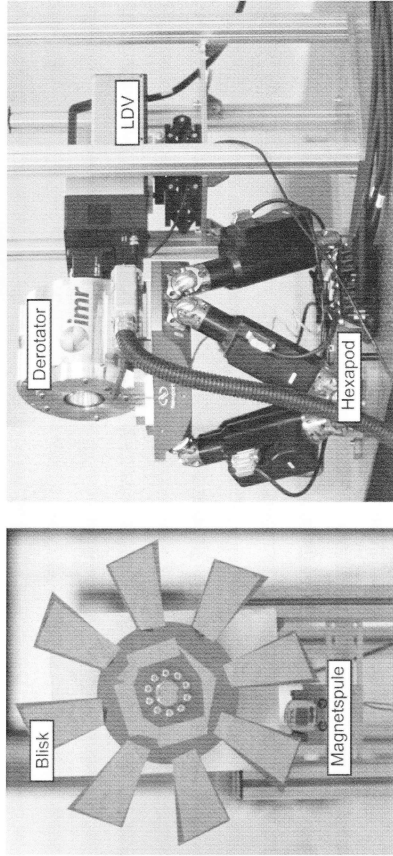


Bild 3: Komponenten des Versuchsaufbaus

Aktuelle Forschungsarbeiten des Instituts für Mess- und Regelungstechnik beschäftigen sich mit einer automatischen Kalibrierung anhand von Lageinformationen, die mittels Bildverarbeitung gewonnen werden. Nachdem die Kalibrierung abgeschlossen ist, wird das Laser-Doppler-Vibrometer direkt hinter dem Derotator positioniert und an die optische Achse des Gesamtaufbaus angepasst. Damit ein Referenzsignal zur Verfügung steht, wird ein Beschleunigungssensor an der Magnetspulenhalterung befestigt. Mit Hilfe des Referenzsignals ist es möglich den einzelnen Messpunkten eine Phaseninformation zuzuordnen. Alternativ kann auch ein zweites Laser-Doppler-Vibrometer verwendet werden.

#### 4. Interpretation der Messergebnisse

Bei den Messungen wurde gezielt versucht die Eigenfrequenzen der Blik mit der Magnetspule anzuregen. Diese sind aus zahlreichen Voruntersuchungen des IDS bekannt [5, 6]. Die verwendeten Netze können Bild 4 entnommen werden. Exemplarisch werden nachfolgend die Knotendurchmesser 3 und 4 näher betrachtet.

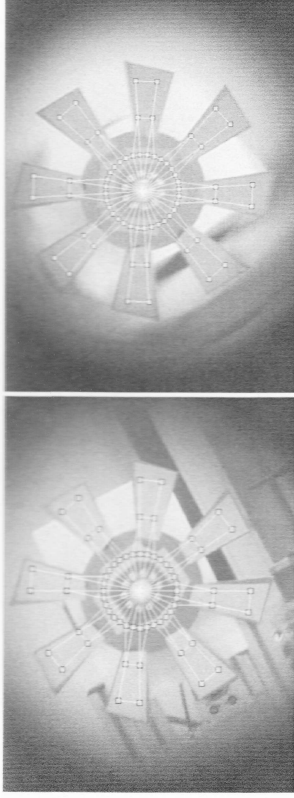


Bild 4: Messpunktnetz; links 0 U/min; rechts 90 U/min

#### Knotendurchmesser 3 (KD3):

Für jeden Messpunkt des Netzes werden mit dem Laser-Doppler-Vibrometer die Frequenzgänge im Stillstand (0 U/min) und bei einer Drehzahl von 90 U/min aufgenommen. Bild 5 zeigt die Frequenzgänge für einen exemplarischen Messpunkt auf einer der Schaufeln. Die Amplitude des Messsignals wird im Stillstand bei 173,4 Hz maximal.

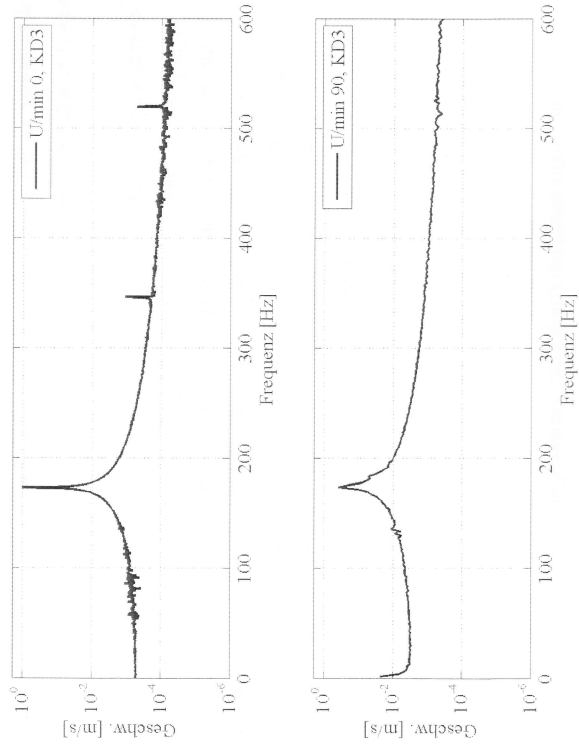


Bild 5: Frequenzgang des Schaufelrades für Knotendurchmesser 3 bei 0 U/min (oben) und 90 U/min (unten); Eigenfrequenz 174 Hz

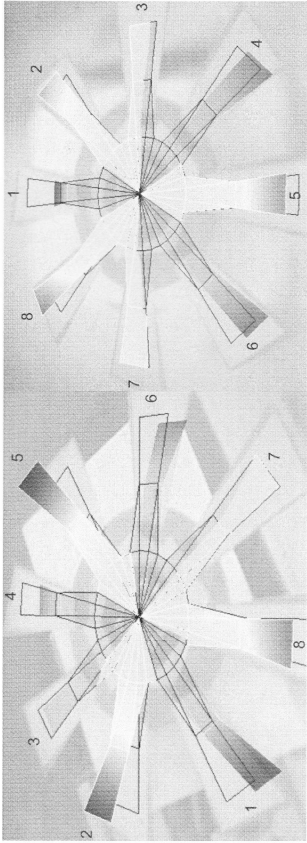


Bild 6: Eigenmoden des Schaufelrades für Knotendurchmesser 3 bei 0 U/min (links) und 90 U/min (rechts); Eigenfrequenz 174 Hz

Rotiert das Schaufelrad mit 90 U/min beträgt dieser Wert 174 Hz, wobei die Abweichung auf eine Erhöhung der Eigenfrequenz, durch die versteifende Wirkung der Fliehkraft mit zunehmender Drehzahl zurückzuführen ist. Die zugehörigen Eigenmoden können Bild 6 entnommen werden. Das charakteristische Verhalten für den Knotendurchmesser 3 mit drei Knotenlinien ist deutlich zu erkennen. Die Schaufeln (1,4,6) schwingen dabei gleichphasig, um  $180^\circ$  phasenverschoben zu den Schaufeln (2,5,8). Die Schaufeln (3,7) liegen auf einer Knotenlinie und weisen keine Schwingungsamplitude auf.

#### Knotendurchmesser 4 (KD 4):

Die Messergebnisse für den Knotendurchmesser 4 zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung des Schwingungsverhaltens zwischen Stillstand und Rotation (Bild 7). Die Eigenfrequenzen betragen 186,9 Hz im Stillstand und 188 Hz bei 90 U/min. Auch bei Betrachtung der Eigenmoden wird deutlich, dass die Messergebnisse während des Betriebs plausible Ergebnisse liefern (Bild 8). Für Knotendurchmesser 4 schwingen nun die Schaufeln (1,3,5,7) um  $180^\circ$  phasenverschoben gegenüber den Schaufeln (2,4,6,8).

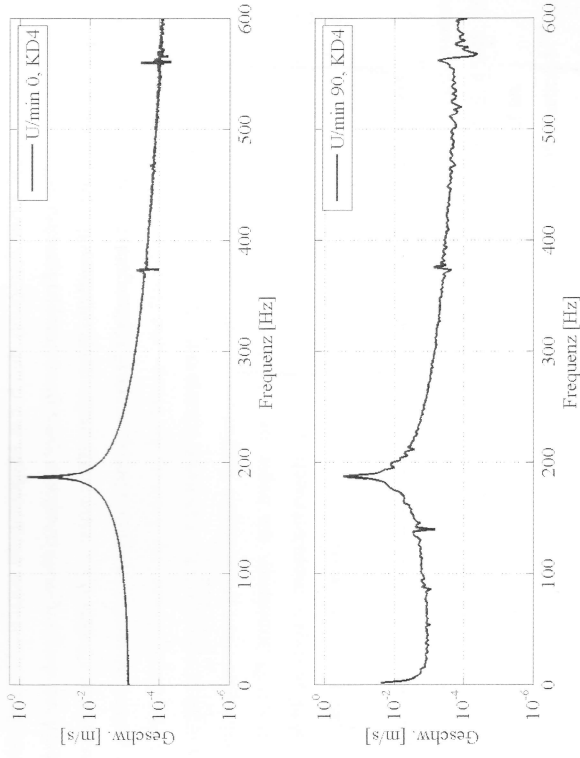


Bild 7: Frequenzgang des Schaufelrades für Knotendurchmesser 4 bei 0 U/min (oben) und 90 U/min (unten); Eigenfrequenz 188 Hz

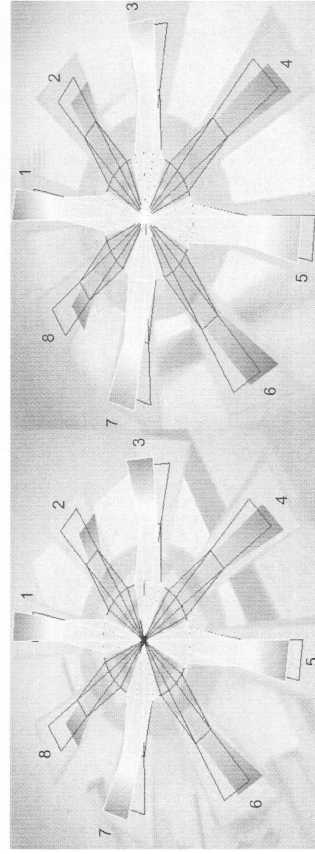


Bild 8: Eigenmoden des Schaufelrades für Knotendurchmesser 4 bei 0 U/min (links) und 90 U/min (rechts); Eigenfrequenz 188 Hz

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass durch die Messungen die Vermutung einer Verschiebung der Anregung aus dem stehenden System in das rotierende System bestätigt werden kann. Der obere Frequenzgang in Bild 9 zeigt das gemessene Spektrum des Be-

schleunigungssensors bei einer Anregung durch die Magnetspule mit 194 Hz und stillstehender Blisk (0 U/min). Der untere Frequenzgang zeigt die Beschleunigung an der Magnetspule bei gleicher Anregung während die Blisk rotiert (90 U/min = 1,5 Hz). Es sind deutlich drei Maxima bei 182 Hz, 194 Hz (Magnetfeld Frequenz) und 206 Hz zu erkennen.

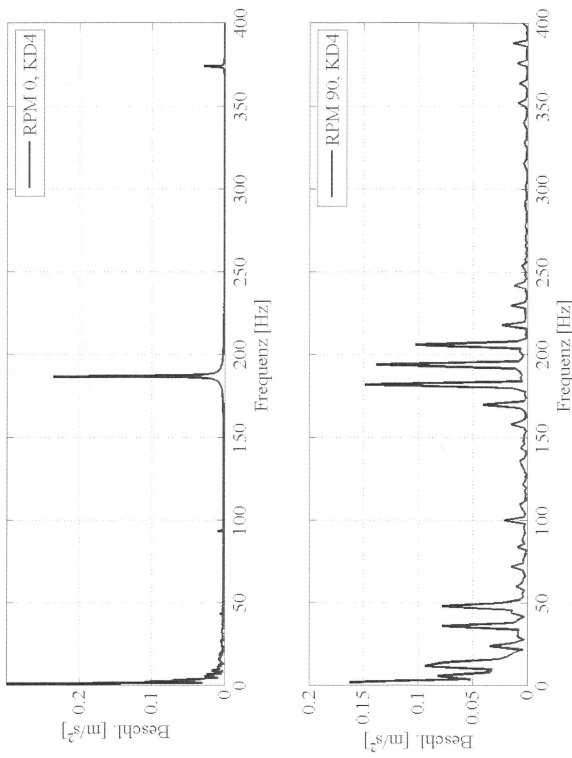


Bild 9: Anregung mit 194 Hz durch die Magnetspule (unten); gemessene Schwingung im rotierenden System bei 188 Hz

Die beiden Maxima bei 182 Hz und 206 Hz werden durch die Rotation der 8 Schaufeln mit 1,5 Hz hervorgerufen. Auf den ersten Blick wird nicht direkt ersichtlich warum im rotierenden System 188 Hz angeregt werden (unterer Frequenzgang Bild 7). Diese Anregung ergibt sich aus einer Frequenzverschiebung von 6 Hz beim Übergang aus dem stehenden System in das rotierende System. Sie entsteht durch die Rotation der Blisk (1,5 Hz) und der zur Anregung von Knotendurchmessers 4 benötigten vier Wellen auf dem Umfang der Blisk ( $4 \times 1,5 \text{ Hz} = 6 \text{ Hz}$ ). Im Beschleunigungssignal ist diese Anregungsfrequenz nicht zu finden, da es im Inertialsystem gemessen wurde.

## 5. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurden schwingungstechnische Untersuchungen mit einem Laser-Doppler-Vibrometer an einer Blisk des Instituts für Dynamik und Schwingungen durchgeführt. Um Messungen am rotierenden System durchzuführen wurde ein optomechanischer Blidderotator des Instituts für Mess- und Regelungstechnik verwendet. Dadurch konnten die Schwingungsformen einer rotierenden Blisk aufgezeichnet werden und mit den Schwingungsformen im Stillstand verglichen werden. Auf diese Weise ist es möglich den Einfluss von Phänomenen wie bspw. der Fliehkraftversteifung der Schaufeln, die im Stillstand nicht vorliegen, messtechnisch zu identifizieren und die Auswirkungen auf das Systemverhalten zu analysieren.

## Literatur

- [1] Reithmeier, E.; Mirzaei, S.; Kasyanenko, N.: Optical vibration and deviation measurement of rotating machine parts. Optoelectronics Letters, Vol. 4, No. 1, S. 45-48, 2008
- [2] Mirzaei, S.; Rahlves, M.; Fahibusch, T.; Reithmeier, E.: Application of an Optomechanical Image Derotator for Measuring Vibration and Deformation of Rotating Objects. Proceedings Optimes, 2009
- [3] Rahlves, M.; Mirzaei, S.; Fahibusch, T.; Reithmeier, E.: In-plane and out-of-plane deformation and vibration measurement using an optomechanical image derotator. Proc. SPIE 'Optical Inspection and Metrology for Non-Optics Industries' (Optics and Photonics) 7432, 2009
- [4] Mirzaei, S.: Entwicklung und Erprobung der Blidderotator-Messtechnik am Beispiel der Schlupfmessung von Wälzlagern. Leibniz Universität Hannover Dissertation 2011
- [5] Hohl, A.; Neubauer, M.; Schwarzendahl, S.; Panning, L.; Wallaschek, J.: Active semi-active vibration damping of turbine blades with piezoceramics. Proceedings of SPIE, 2009
- [6] Hohl, A.; Neubauer, M.; Panning, L.; Wallaschek, J.: Modelling of shunted piezoceramic actuators with substructure techniques and application to a bladed disk model. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, S. 1088-1093, 2009