

# Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Rotorabsturz in Wälzlager

**C. Vanek, F. Worlitz**

*Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik  
Hochschule Zittau/Görlitz  
Theodor-Körner-Allee 16  
02763 Zittau*

*Tel.: 03583612239, Fax: 03583611288*

*Email: cvanek@HS-ZiGr.de, f.worlitz@HS-ZiGr.de*

**J.J. Janse van Rensburg**

*School of Mechanical Engineering*

**G. van Schoor**

*School of Electrical, Electronic and Computer Engineering*

*North-West University*

*Potchefstroom Campus*

*11 Hoffman Street*

*Potchefstroom 2531 (South Africa)*

*Tel.: +27823352295*

*Email: jan.jansevanrensburg@nwu.ac.za, George.vanSchoor@nwu.ac.za*

## Abstract

Um eine Auslegung von Fanglagern durchzuführen ist es notwendig, die Belastungen dieser in den zu erwartenden Abwurfszenarien zu kennen. Da so ein chaotischer Vorgang schwer analytisch berechnet werden kann, ist es erforderlich, ein dynamische Simulationendurchzuführen. Der Beitrag soll einen Einblick in die experimentellen Arbeiten geben, welche zur Validierung eines solchen Berechnungsmodells nötig sind. Dabei soll vor allem auf einen Qualitätsfaktor eingegangen werden, welcher es ermöglicht verschiedene Fanglagerabwürfe mit Hilfe eines normierten Faktors zu vergleichen. Weiterhin wird auf den Einfluss des Auftreffwinkels des Rotors im Fanglager eingegangen, sowie einige Beispiele für die Anwendung des Qualitätsfaktors gegeben.

## 1 Einleitung

Der Einsatz von Magnetlagern bietet gegenüber der konventionellen Lagertechnik besonders beim Einsatz in Turbomaschinen der Kraftwerkstechnik viele Vorteile. Durch den Wegfall des Ölsystems und dem fehlenden mechanischen Kontakt im Lager besteht ein großes Potential an Energieeinsparungen. Weiterhin ergeben sich Vorteile bei der Konstruktion der Maschinen sowie die Möglichkeit der

aktiven Beeinflussung der Rotordynamik. Durch die für den Betrieb die Lager notwendige Sensorik lassen sich prozess- und maschinenrelevante Daten direkt aus den Lagersignalen ableiten und eine zusätzliche Instrumentierung kann entfallen [1]. Diesen Vorteilen stehen aber auch Nachteile gegenüber. Turbomaschinen im Kraftwerkseinsatz sind typischerweise Maschinen mit Rotoren, welche von wenigen hundert Kilogramm bis hin zu mehreren Tonnen wiegen. Kommt es im Fehlerfall zu einem Versagen der Magnetlager, müssen die Fanglager den Rotor meist bei voller Drehzahl sicher aufnehmen können und ein geordnetes Abfahren der Maschine ermöglichen. Um ein sicheres Abfahren zu gewährleisten, müssen die Fanglager für die maximal auftretenden Belastungen ausgelegt werden. Derzeitig werden als Fanglager dieser Größenordnung vorwiegend Wälzlager eingesetzt, welche speziell für den jeweiligen Einsatzzweck ausgelegt werden müssen. Diese Auslegung erfordert Rechenmodelle, welche die Belastung auf die Fanglager in allen möglichen Situationen die in der Maschine auftreten mit ausreichender Sicherheit berechnen können. Eine wichtige Eingangsgröße der Auslegung sind dabei Kräfte die durch Resonanzen hervorgerufen werden. Erste Arbeiten zur Erstel-

lung eines Berechnungsmodells wurden an der North-West-University in Potchefstroom (RSA) durchgeführt. Die Validierung und Verifikation des Modells ist bisher für kleine Rotoren (Masse ca. 5kg) durchgeführt worden. Im Beitrag werden Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt. Eine Anwendung für massereiche Rotoren erfordert einen Umbau bzw. eine Erweiterung des Modells sowie eine Validierung und Verifikation an entsprechenden Versuchsanlagen.

## 2 Einflussfaktoren auf den Fanglagerabwurf

Beim Abschalten einer magnetgelagerten Maschine wird der stillstehende Rotor meist sanft in die Fanglager abgelegt, was einen Normalfall für die Fanglager darstellt. Der für die Fanglager maßgebliche Auslegungsfall ist das Versagen der Magnetlager bei voller Drehzahl. Dabei treten in den meisten Fällen zusätzliche Kräfte auf, welche aus dem Prozess oder veränderter Geometrie verhältnisse der Maschine resultieren und die Fanglager zusätzlich belasten. Die Dynamik des Rotor-Fanglagerkontaktes hängt dabei von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab, welche sich meist gegenseitig beeinflussen. Folgende Einflussfaktoren sind maßgeblich das Abwurfverhalten:

- Dynamik der Fanglager (Steifigkeit und Dämpfung)
- Reibverhältnisse im Fanglager (Schäden, Alterung, Öl)
- Auftreffpunkt des Rotors im Fanglager
- Rotordrehzahl
- Rotordynamik
- Rotorunwucht

Trotz dieser Vielzahl von Einflussfaktoren lassen sich 4 Arten der Rotorbewegung im Fanglager identifizieren, welche in Abb. 1 dargestellt sind. Dabei sind die Belastungen für die Fanglager sind je nach Bewegungsform unterschiedlich. Ein vorwärts wirbelnder oder oszillierender Rotor prägt geringere Kräfte in die Fanglager ein als ein springender.

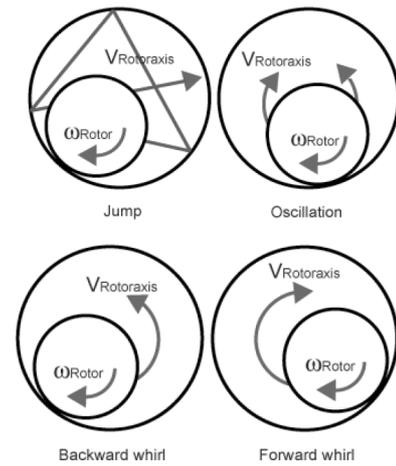


Abb. 1: Mögliche Rotorbewegung im Fanglager [2]

Die für die Maschine und Fanglager ungünstigste Bewegungsform ist der Rückwärtswhirl oder Backward whirl. Dabei können erhebliche Kräfte auf Rotor und Maschine wirken, welche meist mit Beschädigungen der Maschine einhergehen.

## 3 Versuchsstand

Die vorgestellten Versuchsergebnisse sind an einem Versuchsstand an der North-West-University in Potchefstroom (Südafrika) ermittelt. Der Versuchsstand besteht aus zwei baugleichen Magnet-Fanglagereinheiten und ist in Abb. 2 dargestellt.

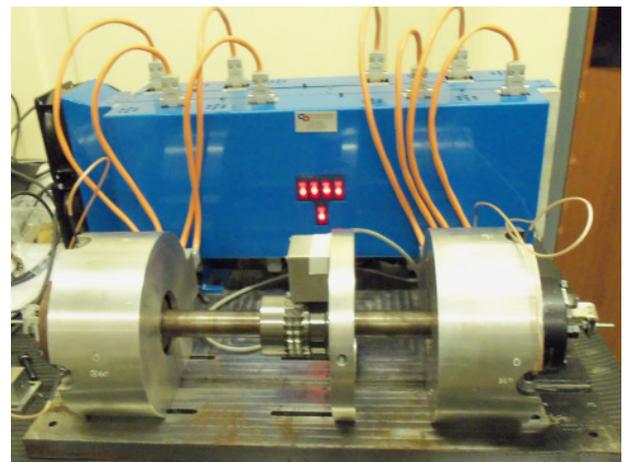


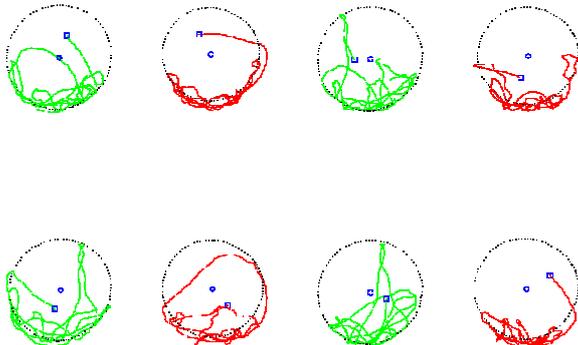
Abb. 2: Versuchsstand in Potchefstroom (links Fanglager1, rechts Fanglager2)

Dabei sind die Fanglagergehäuse direkt an den Magnetlager befestigt, was eine freie Positionierung des Luftspaltes ermöglicht. Die Luftspaltmessung erfolgt über Wirbelstromsensoren. Angetrieben wird der Versuchsstand über eine druckluftbetriebene Turbine in der Mitte

des Rotors wo sich auch die optische Drehzahlmessung befindet. Die Versuchsstandelektronik ermöglicht das drehzahl- und winkelgesteuerte Abwerfen des Rotors, was durch die gleichzeitige Abschaltung der Reglersignale für die Leistungssteller der Magnetlager geschieht.

#### 4 Einfluss des Abwurfwinkels

Je nach Reglereinstellung der Magnetlager und der vorhandenen Rotorunwucht entsteht bei Normalbetrieb ein Orbit in den Magnetlagern. Auf Grund dieses Orbits kommt es zu unterschiedlichen Flugbahnen des Rotors in den Fanglagern, hervorgerufen durch die Rotorunwucht. Bei den experimentellen Untersuchungen konnte beobachtet werden, dass bei gleichen Abwurfbedingungen nur durch Änderung des Abwurfwinkels sich unterschiedliche Rotorbewegungen im Fanglager ausbilden. Als Beispiel ist dies für einen Abwurf bei 5700 U/min Abb. 3 dargestellt.



**Abb. 3:** Abwurfbilder bei 5700 U/min jeweils bei 4 verschiedenen Winkeln (grün Fanglager1, rot Fanglager2)

Daraus ergibt sich die Forderung, die Auslegung und Untersuchung von Fanglagern bei einem für die Fanglagerbelastung ungünstigsten Winkel durchzuführen. Eine Beeinflussung des Winkels ist daher auch bei weiteren Fanglagerexperimenten notwendig um alle Effekte erfassen zu können.

#### 5 Bewertung des Fanglagerabwurfes

Um die Rotorabstürze aus den Experimenten und die simulierten Daten besser vergleichen zu können ist es notwendig, einen nominierten Faktor einzuführen, welcher es erlaubt, die Abwürfe zu bewerten. Diese Bewertung wurde

bisher mit Expertenwissen vorgenommen und war dadurch schwer vergleichbar. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten ist es notwendig, die einzelnen Abwürfe zu bewerten. Dieses kann mit Hilfe des Abwurf Qualitätsfaktors (Rotor drop quality factor (RDQ)) durchgeführt werden.

#### 5.1 Rotor drop quality factor

Um diesen Faktor zu bilden, ist es notwendig, die wichtigsten Einflussgrößen für den Fanglagerabwurf zu berücksichtigen. Demzufolge setzt sich der Rotor-drop quality-factor aus

- Fanglagerdeformation,
- Zentripetalkraft,
- Rotorbewegung und
- Nenndrehzahl des Lagers

zusammen.

#### 5.2 Fanglagerdeformation

Die Deformation des Fanglagers ist ein Kennwert, welcher es erlaubt, Rückschlüsse auf die vom Rotor auf das Fanglager aufgeprägte Kraft zu ziehen. Die Deformationskraft wird nach (1) berechnet.

$$F_{Deformation} = \begin{cases} K_{BB} \cdot (r - r_{airgap}) + C_{BB} \cdot \dot{r} & \text{if } r \geq r_{airgap} \\ 0 & \text{if } r < r_{airgap} \end{cases} \quad (1)$$

#### 5.3 Zentripetalkraft

Eine weitere Kraft, welche zu einer Lagerbelastung führt, ist die Zentripetalkraft. Diese wird über (2) berechnet.

$$F_{Deformation} = m_{rotor} \cdot r \cdot \omega_{COM}^2 \quad (2)$$

#### 5.4 Rotorbewegung

Wie in Absatz 2 beschrieben, haben unterschiedliche Bewegungsformen unterschiedliche Belastungen der Fanglager zur Folge. Daher kann über die Rotorbewegung im Fanglager auf dessen Belastung geschlossen werden. Für die Berechnung des Faktors wird der mögliche Orbit in verschiedene Bereiche eingeteilt und diesen Bewertungsziffern zugewiesen. Um den Bewertungsfaktor zu erhalten, werden die Datenpunkte, welche sich in den einzelnen Bereichen befinden, addiert. Die Datenpunkte,

vom Beginn des Absturzes geben einen Überblick über das potentielle Verhalten des Abwurfs. Von Interesse dabei ist die sich abzeichnende Whirlneigung. Diese sagt aus, ob sich ein Backward whirl entwickelt und bei anderen Drehzahlen auch zu erwarten ist. Abb. 4 zeigt die Einteilung der Bereiche und in (3) ist die Berechnung des Faktors dargestellt.

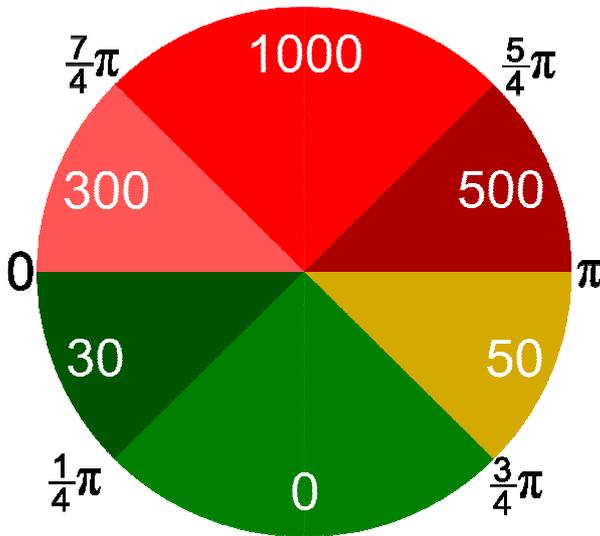


Abb. 4: Einteilung des möglichen Orbits in Bewertungszonen

$$BF(i) = \begin{cases} 1000 & \text{if } \frac{5}{4}\pi < \phi(i) < \frac{7}{4}\pi \\ 500 & \text{if } \pi \leq \phi(i) \leq \frac{5}{4}\pi \\ 300 & \text{if } \frac{7}{4}\pi \leq \phi(i) \leq 2\pi \\ 50 & \text{if } \frac{3}{4}\pi \leq \phi(i) < \pi \\ 30 & \text{if } 0 \leq \phi(i) \leq \frac{1}{4}\pi \\ 0 & \text{if } \frac{1}{4}\pi < \phi(i) < \frac{3}{4}\pi \end{cases} \quad (3)$$

$$BF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n BF(i)$$

### 5.5 Drehzahlfaktor

Wälzlager besitzen eine Nenndrehzahl, bei welcher das Lager betrieben werden kann, ohne das mechanische Schäden oder eine unzulässige Erwärmung auftreten. Diese Drehzahl ist eine charakteristische Kennzahl bei der Auslegung von Wälzlagern. Eine Unterschreitung dieser Drehzahl stellt dabei eine Reserve in der Auslegung dar. (4) zeigt die Berechnung des Drehzahlfaktors.

$$\omega_{factor} = \frac{\omega_{rotor}}{\omega_{BBrated}} \quad (4)$$

### 5.6 Berechnung des Rotor-drop-quality factors

Die Absturzqualität setzt sich aus den einzelnen Faktoren, wie in (5) gezeigt, zusammen.

$$RDQ(i) = BF \cdot \omega_{factor}(i) \cdot \frac{(F_{Deformation}(i) + F_{Centripetal}(i))}{F_{max,bb}} \quad (5)$$

$$RDQ = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n RDQ(i) + RDQ_{max}$$

Damit steht eine dimensionslose Kennzahl zur Verfügung, mit welcher es möglich ist, unterschiedliche Abwurfereignisse miteinander zu vergleichen.

### 5.7 Beispiele für die Anwendung des RDQ

Im folgenden Kapitel werden ausgewählte Abwurfdaten mit dem RDQ bewertet. Die dabei entstehenden Kennzahlen geben einen Eindruck, wie die unterschiedlichen Abwürfe bewertet werden. Abb. 5 zeigt einen Abwurf bei 2200 U/min.

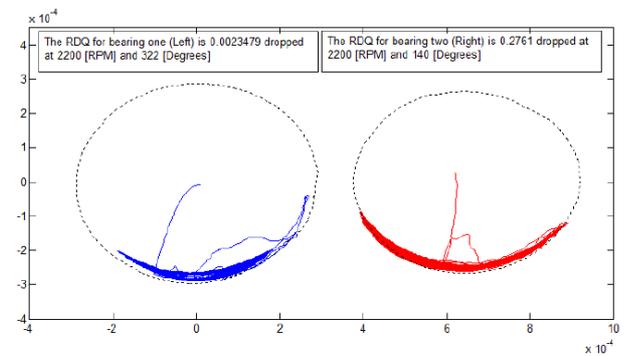


Abb. 5: Abwurfes bei 2200U/min mit RDQ

Die Bewertung mit Erfahrungswerten zeigt, dass aus einem solchen Abwurf geringe Belastungen für die Maschine resultieren, was auch durch den RDQ ausgedrückt wird.

Abb. 6 zeigt einen weiteren Abwurf bei 4100 U/min. Dabei ist ein deutliches Springen des Rotors zu erkennen, welches zu größeren Belastungen und auch zu einem größeren RDQ führt.

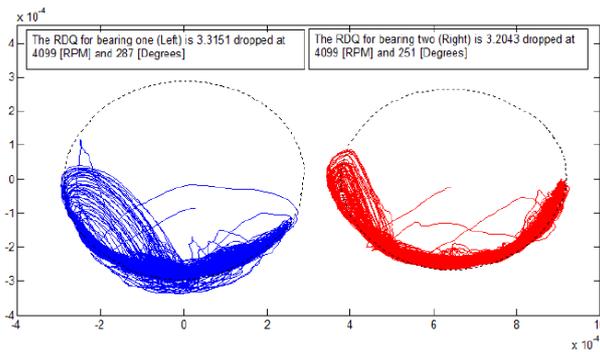


Abb. 6: Abwurf bei 4100 U/min mit DRQ-bewertung

Abb. 7 zeigt den ungünstigsten Fall für die Maschine den Backward whirl. Der RDQ erreicht dabei einen sehr hohen Wert.

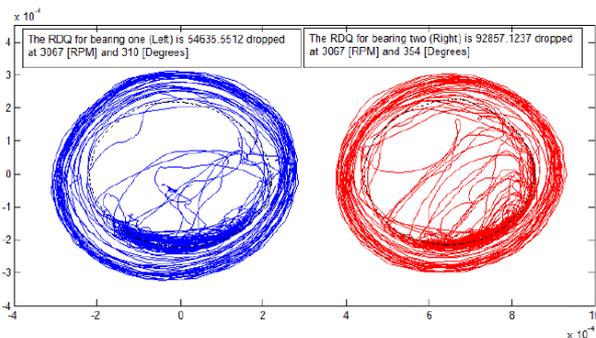


Abb. 7: Backward whirl

## 5.8 Zuordnung des RDQ

Um die Werte, welche durch die Berechnung des RDQ entstehen, besser interpretieren zu können, ist es notwendig, den Zahlen verbale Beurteilungen zuzuweisen. Diese sind in Tab. 1 dargestellt.

RDQ-Wert	Rotorbewegung	Lagerbelastung
0-5	Oszillieren	Keine
5-100	Oszillieren mit leichtem springen	Sehr gering
100-1000	Forward whirl mit geringer Geschwindigkeit	Gering
1000-10000	Forward whirl mit hoher Geschwindigkeit	Hoch
10000-∞	Backward whirl	Zerstörend

Tab. 1: Bewertung des RDQ

Mit Hilfe dieser Bewertungskennzahlen von Fanglagerabwürfen ist es möglich, verschiedene Experimente untereinander oder auch Si-

mulationsdaten direkt zu vergleichen. Dadurch ist es besser möglich, die Einflussfaktoren auf den Fanglagerabwurf im Vergleich zu anderen Daten zu bewerten. Aus der Zuordnung ergibt sich auch die Handlungsanweisung für die Wartung der Maschine. Ein als Zerstörend bewerteter Abwurf legt einen Austausch der Fanglager nahe während Abwürfe mit geringen Belastungen mehrfach erfolgen können.

## 6 Zusammenfassung und zukünftige Arbeiten

Mit dem RDQ steht ein Werkzeug, welches es ermöglicht, verschiedene Abwürfe zu bewerten und zu vergleichen. Dadurch ist es möglich, Veränderungen der Fanglager oder der Maschine aus den Daten des Abwurfes einfach zu erkennen und notwendige Handlungen ableiten. Weiterhin können simulierte Daten ausgewertet werden, die eine Aussage über die Eignung geplanter Konzepte erlauben. Dadurch kann schon in der Auslegungsphase eine Entscheidung zugunsten der besten technischen Lösung gefällt werden.

Mit der Variation des Abwurfwinkels konnte gezeigt werden, dass dieser in bestimmten Fällen entscheidenden Einfluss auf das Rotorabwurf haben kann. Daher sollte dieser Winkel bei der Versuchsplanung weiterer Experimente berücksichtigt werden.

In weiteren Arbeiten muss die Gültigkeit des RDQ in der hier vorgestellten Form für weitere Fanglagerkonfigurationen nachgewiesen werden. Besonders beim Einsatz von Gleitlagern ist die vorgestellte Berechnungsmethode noch zu überprüfen.

## Quellen

- [1] Rottenbach, T.; Gronek, M.; Lißner, D.; Worlitz, F.: Studie zur Umrüstung einer konventionell gelagerten Kesselspeisepumpe auf aktive Magnetlagerung unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Aspekte, Abschlussbericht Projektnr. E49-4500973767, 30.09.2008
- [2] Schweitzer, Maslen: Magnetic Bearings – Theory, Design, and Application to Rotating Machines; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009, ISBN 978-3-642-00496-4