

VALIDIERUNG EINES GLEITFANGLAGERMODELLS DURCH ABWURFVERSUCHE

C. Vanek, F. Worlitz, N. Hecht

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

Tel.: 0358361383, Fax: 03583611288

Email: c.vanek@hszg.de, f.worlitz@hszg.de

J. Janse van Rensburg, G. van Schoor

*School of Electrical, Electronic and Computer Engineering
North-West University
Potchefstroom
2520, South-Africa*

Tel.: +27 18299 1962, Fax: +27 18299 1977

George.vanSchoor@nwu.ac.za, Jan.JanseVanRensburg@nwu.ac.za

1 Abstract

Der Betrieb magnetgelagerter Maschinen erfordert grundsätzlich den Einsatz von Fanglagern. Diese nehmen den Rotor bei Maschinenstillstand, bei abgeschalteter Magnetlagerung oder bei Magnetlagerversagen auf. Es wird zwischen Wälz- und Gleitfanglagerungen unterschieden.

Der Rotor-Fanglagerkontakt bei hohen Drehzahlen und großen mechanischen Belastungen ist durch enorme Kontaktkräfte und Relativgeschwindigkeiten zwischen Rotor und Stator gekennzeichnet. Das Fanglager muss den Rotor bis zum Stillstand sicher aufnehmen.

Gegenwärtig werden bei schweren Rotoren, wie sie z. B. in Verdichtern, Pumpen und Turbinen zu finden sind, vorwiegend Wälzfanglager eingesetzt. Der komplexe Aufbau von Wälzlagern (Innenring, Außenring sowie Wälzelemente) gegenüber Gleitlagern (rotor- und statorseitige Laufbuchsen) führt, vor dem Hintergrund hoher mechanischer und thermischer Belastungen während des Eingriffes, zu erhöhten Aufwendungen bei der Konstruktion und Fertigung und damit zu hohen Kosten.

Gleitfanglagerungen können eine sichere und kostengünstigere Alternative darstellen.

Eine wichtige Voraussetzung dafür ist es, Gleitfanglager für solche extremen mechanischen und thermischen Belastungen an Turbomaschinen konstruktiv und werkstofftechnisch zu ertüchtigen.

Für den erfolgreichen Einsatz von Gleitfanglagerlösungen ist die Beherrschung aller Abwurfszenarien durch das Fanglager nachzuweisen. Besonderes Augenmerk gilt hierbei den Steifigkeits- und Dämpfungswerten der Lagerung. Diese sind so zu wählen, dass der Rotor beim Durchfahren kritischer Drehzahlen im Fanglager keine unzulässig hohen Schwingungen auf die Maschine überträgt.

Zur Sicherstellung dieser Eigenschaften sind im Vorfeld der Konstruktion für alle relevanten Fälle Simulationsrechnungen durchzuführen. Dazu wurde das Gleitlager modelliert und Simulationsrechnungen unter Berücksichtigung der Rotordynamik durchgeführt.

Die Validierung der Modelle erfolgte auf der Grundlage von Experimenten an einem Kleinversuchsstand mit verschiedenen Gleitfanglagern. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden zudem den Ergebnissen von Versuchen mit Wälzfanglagern am selben Versuchsstand gegenübergestellt und mit diesen verglichen.

Im Beitrag werden das Gleitlagermodell und erste Simulationsergebnisse sowie die Ergebnisse der Experimente am Kleinversuchsstand vorgestellt.

2 Einleitung

Eine einfache, wartungsarme und kostengünstige Fanglagerung ist eine Voraussetzung zur weiteren Verbreitung von Magnetlagern in der Technik, Gleitlager bieten dazu die Möglich-

keit. Zum Nachweis der Eignung von Gleitlagern als Fanglager für magnetgelagerte Maschinen ist es notwendig, das Rotorverhalten während des Abwurfs zu kennen. Aus diesen Daten lassen sich die Belastungen der mechanischen Struktur während des Rotorabwurfes ableiten. Es ist daher notwendig, schon im Auslegungsprozess der Maschine über diese Daten zu verfügen. Aus diesem Grund bietet sich die dynamische Simulation des Gesamtsystems an. Um belastbare Ergebnisse zu erhalten muss eine Vielzahl von Parametern wie Steifigkeit und Dämpfung der Lager, die Eigenfrequenzen des Rotors, das Reibverhalten im Lager sowie die Veränderung dieser Werte während des Abwurfvorgangs in der Simulation berücksichtigt werden. Um die Simulationsergebnisse für eine Auslegung verwenden zu können müssen diese validiert und das Simulationsmodell verifiziert werden.

3 Einsatz von Gleitlagern als Fanglager für magnetgelagerte Maschinen

Gleitlager sind als Maschinenelemente weit verbreitet. Diese sind durch unterschiedliche Materialkombinationen für unterschiedliche Anwendungsfälle geeignet. Auf Grund dieser unterschiedlichen Ausführungen kommt es zu verschiedenen Reibverhältnissen, Steifigkeiten und Dämpfungen in den Lagern. Unterschieden wird dabei die Flüssigkeits-, Grenz-, Misch- und Festkörperreibung [1]. Flüssigkeitsreibung herrscht bei ölgeschmierten Lagern vor und erfordert eine kontinuierliche Ölversorgung dieser Lager. Diese Art der Gleitlager wird bei Turbomaschinen im Kraftwerksbereich eingesetzt. Um eine einwandfreie Funktion dieser Lager zu gewährleisten, ist eine umfangreiche Ölversorgung notwendig. Diese Art der Gleitlager eignet sich unter dem Gesichtspunkt einer möglichst wartungsfreien und einfach aufgebauten Fanglagerung nicht für den Einsatz in magnetgelagerten Maschinen. Geeigneter sind Gleitlager, bei denen Grenzreibung vorherrschen. Diese Lager werden als wartungsfrei bzw. selbstschmierend bezeichnet. Lager mit Grenzreibung bestehen meist aus einem porösen Trägerstoff (z. B. Sinterbronze, Kunststoffe), bei

welchem sich in den Poren Schmierstoff befindet, der durch Mikroverschleiß oder Erwärmung freigesetzt wird und einen Schmierfilm bildet.

3.1 Validierungsversuche an einem Kleinversuchsstand

Die Versuche an der North-West-University wurden an einem Kleinversuchsstand durchgeführt, welcher mit verschiedenen Fanglagerkombinationen ausgestattet werden kann. Der Versuchsstand besteht aus einem symmetrisch aufgebauten Rotor mit einem Peltonrad in der Mitte. Rechts und links befinden sich die radialen Magnetlager und an den Außenseiten jeweils die Laufflächen für die Fanglager. Axiallager sind nicht vorhanden. Die radialen Magnetlagerstatoren befinden sich in Gehäusen, an welchen die Fanglagergehäuse ohne zusätzliche Abstützung auf der Grundplatte angeschraubt sind. Der Versuchsstand ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Regelung der Lager sowie die Aufzeichnung der Messwerte und die Versuchssteuerung wird durch ein HiL-System realisiert. Dieses System kann auf Grund der Rechnerleistungsfähigkeit max. 7 s Messwerte mit einer Frequenz von 10 kHz aufzeichnen.

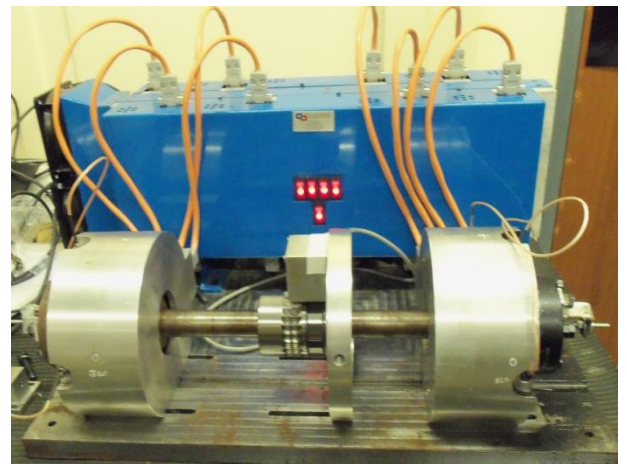


Abbildung 1: Versuchsstand an der North-West-University in Potchefstroom (links Fanglager1, rechts Fanglager2)

Zum Einsatz kamen Gleitfanglager aus Sinterbronze, Polyamid (PA) sowie PTFE beschichtete Stahllaufbüchsen. Diese Gleitlager wurden ausgewählt, da diese leicht und preiswert zu beschaffen waren und ohne größere Schwie-

rigkeiten in den Versuchsstand integriert werden konnten. Das Versuchsprogramm sah zuerst die Ermittlung der Reibungsparameter in den Lagern vor. Dazu wurde der Rotor beschleunigt und bei einer Drehzahl von ca. 1200 min^{-1} abgeworfen. Aus der Bremskurve wurden für die verschiedenen Lagertypen folgende Reibwerte ermittelt:

Bronzelager:	0,1347
Polyamidlager:	0,2173
PTFELager:	0,2327

Die Fanglagerversuche wurden durchgeführt, indem der Rotor in den Magnetlagern beschleunigt wurde und dann bei vorher definierten Bedingungen die Magnetlager abgeschaltet wurden. Die Software bietet die Möglichkeit, die Abwurfdrehzahl und den Abwurfwinkel voreinzustellen. Auf Grund der Spezifik des Versuchsstandes wird dieser beschleunigt und bremst dann auf Grund der Luftreibung automatisch ab. Daher wird eine um ca. 5% größere Drehzahl als die Abwurfdrehzahl angefahren. Das Abbremsen wird durch die Versuchsstandsteuerung erkannt und der Abwurf des Rotors wird beim Erreichen der voreingestellten Parameter automatisch ausgelöst. Der Rotor fällt in die Fanglager und die Messwertaufzeichnung wird automatisch gestartet. Der Auslauf des Rotors wurde nur von der Reibung im Lager und der Luftreibung bestimmt. Die Abwürfe wurden bei verschiedenen Drehzahlen durchgeführt. Dabei wurde mit niedrigen Drehzahlen begonnen, die dann immer höher gewählt wurden. Als maximale Abwurfdrehzahl wurden 5000 min^{-1} erreicht. Diese war durch die Magnetlager bedingt da diese eine höhere Drehzahl nicht zulassen. Das Herantasten an die höheren Drehzahlen war notwendig, da es sich bei den Gleitlagern ausschließlich um trockengeschmierte Lager handelte und dadurch zu vermuten war, dass der Rotor zum Whirlen neigt. Dieser Effekt ist nicht ausreichend geschmierten hydrodynamischen Gleitlagern zu beobachten [2]. Die eingesetzte Fanglagerkonfiguration ist mit diesem Fall zu vergleichen.

3.2 Vergleichbarkeit der Experimente

Ergebnis der Versuche sind die Positionen des Rotors in den Fanglagern. Für die qualitative Auswertung eignen sich die Orbitplots. Ein Vergleich ist daher nur nach objektiven Gesichtspunkten möglich. Für den quantitativen Vergleich der Experimente sowie der Simulationsergebnisse ist es notwendig, einen quantitativen Bewertungsmaßstab zu nutzen. Dazu eignet sich die Berechnung des Weges des Rotors bezogen auf den Luftspalt [3]. Die ist ein Maß für die Energie des Rotors, welche in eine translatorische Bewegung umgesetzt wird. Dazu wird der Weg bezogen auf den Luftspalt berechnet (1).

$$Dval_k = \frac{\sum_{i=((k \cdot n) - n) + 1}^{k \cdot n} \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{r_{airgap}} \quad (1)$$

3.3 Versuchsergebnisse

Für die Auswertung der Versuche stehen nur die Positionssignale der Lager sowie das Drehzahlensignal zu Verfügung. Aus den Positionssignalen können die Orbitplots des Abwurfes erstellt werden, um einen ersten qualitativen Überblick über das Abwurfereignis zu erhalten. Beispielhaft ist in Abbildung 2 der Orbitplot für einen Abwurf des Rotor in trockene Polyamid-Fanglager bei einer Drehzahl von 4000 min^{-1} dargestellt. Links in der Abbildung ist das linke (blau) rechts (rot) das rechte Fanglager gezeigt. Die Orientierung der Fanglager ergibt sich aus der Draufsicht des Versuchsstandes wie in Abbildung 1 dargestellt.

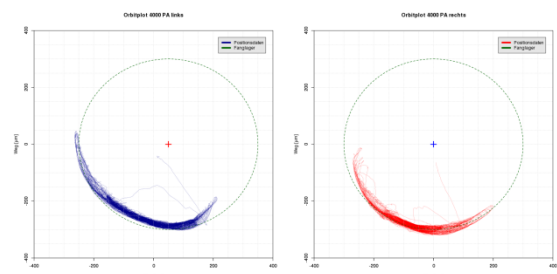


Abbildung 2: Orbitplots eines Abwurfes bei 4000 min^{-1} in PA Fanglager (linkes Lager blau, rechtes Lager rot)

Die Kreise in der Abbildung stellen die theoretische Fanglagerbegrenzung dar. Dass die Rotorpositionen außerhalb dieser Grenzen lie-

gen, ist in der ungenauen Maßhaltigkeit der Fanglagereinheiten sowie deren Verschleiß zurückzuführen.

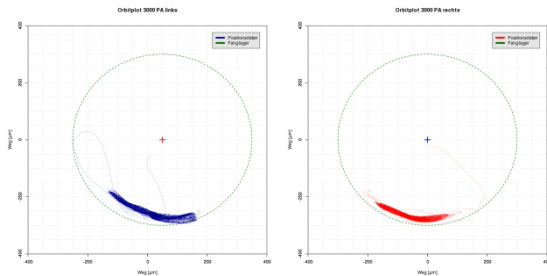


Abbildung 3: Orbitplots eines Abwurfes bei 3000min-1 in PA Fanglager (linkes Lager blau, rechtes Lager rot)

In Abbildung 3 ist zu erkennen, dass sich die Rotorbewegungen zwischen dem linken und dem rechten Fanglager unterscheiden. Die Bewegungen im linken Fanglager sind „heftiger“ und zeigen ein Klettern des Rotors an der Fanglagerinnenseite. Diese Unterschiede sind bei dem symmetrisch aufgebauten Rotor nur durch die unterschiedlichen Wuchtzustände zu erklären. Die Unwucht der linken Seite ist größer als die der rechten Seite. Dieses zeigt sich auch beim Verlauf des Dval-Wertes. In Abbildung 4 ist der Verlauf von Dval für das linke und das rechte Fanglager bei einem Abwurf in ein PA-Gleitfanglager über der Drehzahl dargestellt. Zu erkennen ist, dass der absolute Wert für das linke Fanglager wesentlich höher liegt als für das rechte Fanglager.

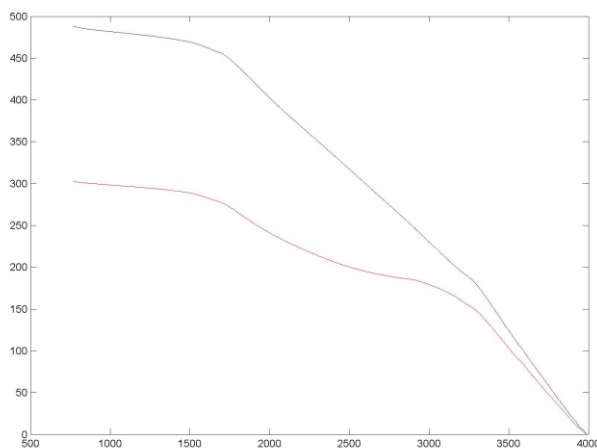


Abbildung 4: Verlauf von Dval für das linke (blau) und das rechte (rot) Fanglager bei einem Rotorabwurf bei 4000 min⁻¹ (Abszisse: Drehzahl in min⁻¹, Ordinate: Wert von Dval)

Der Wert Dval eignet sich auch, um Versuche unterschiedlicher Drehzahl mit gleichen Fanglagern zu vergleichen. In Abbildung 5 sind die maximalen Dval-Werte für die Versuche mit PA-Gleitlagern dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Drehzahl auch die Werte für Dval steigen. Dadurch lässt sich feststellen, dass mit steigenden Abwurf Drehzahlen auch die Energie, welche der Rotor in Bewegung im Fanglagerspalt an das Lager abgibt, steigt.

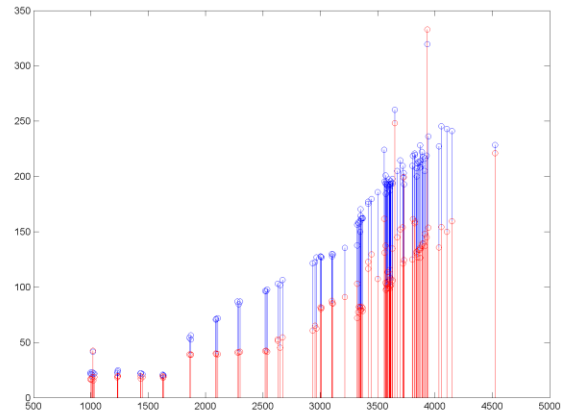


Abbildung 5: Maximale Dval-Werte für die Untersuchungen mit PA-Gleitlagern, dargestellt für das linke (blau) und das rechte (rot) Fanglager (Abszisse: Versuchsrehzahlen in min⁻¹, Ordinate: Wert von Dval)

Bei den Versuchsreihen wurde festgestellt, dass sich je nach Lagertyp das Rotorverhalten verändert. So sind mit Bronzegleitlagern Abwürfe mit Drehzahlen bis zu 5000 min⁻¹ beherrschbar und der Rotor zeigt ein Springen im Fanglagerluftspalt, geht aber nicht in eine Whirlbewegung über. Dagegen zeigte der Rotor in PA-Gleitfanglager schon bei Abwurf Drehzahlen von 3500 min⁻¹ die Neigung, in den Backwardwhirl überzugehen. In Abbildung 6 sind diese Zustände exemplarisch jeweils für ein Lager dargestellt.

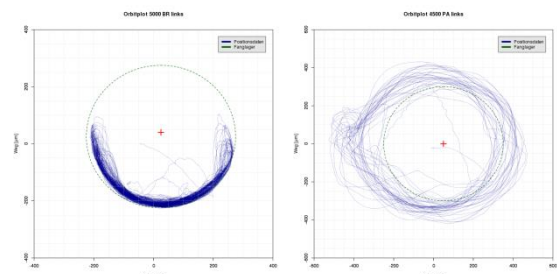


Abbildung 6: Abwurf in ein Bronzegleitlager mit 5000 min⁻¹ (links) und in ein PA-Gleitlager mit 4500 min⁻¹ (rechts)

Eine Möglichkeit, die Whirlbewegung zu unterbrechen, ist eine Längskerbe, wie in Abbildung 7 gezeigt, in das Fanglager einzubringen. In den Versuchen konnte durch diese Kerbe eine Whirlbewegung des Rotors verhindert werden und es waren Rotorabwürfe mit Rotordrehzahlen mit bis zu 5000 min^{-1} in PA-Gleitlagern möglich.

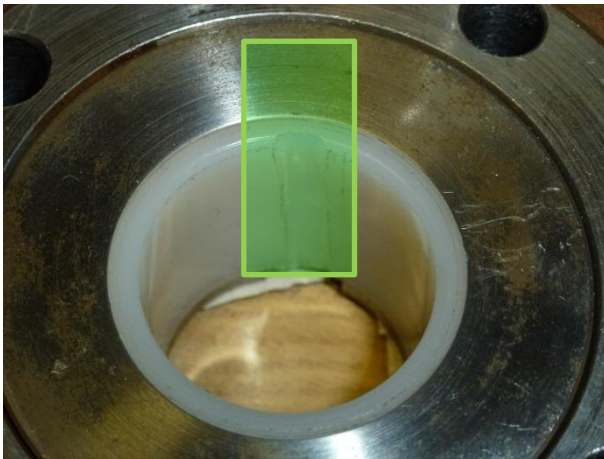


Abbildung 7: Polyamidgleitlager mit Reduzierhülse und Kerbe

Durch den Vergleich der Drehzahlverläufe in Abbildung 9 von einem Versuch ohne Backward-whirl (Drehzahlverlauf bei 5000 min^{-1} bei Bronzegleitlagern) und einem Versuch mit Auftreten dieses Effektes in Abbildung 8 (Backward-Whirl in PA-Gleitlagern bei 5000 min^{-1}) sieht man, dass durch diese destruktive Rotorbewegung im Fanglager ein großer Teil der Rotationsenergie durch das Fanglager aufgenommen werden muss.

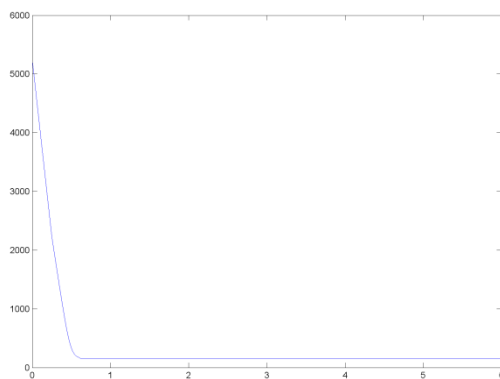


Abbildung 8: Drehzahlverlauf bei einem Absturz in PA Gleitlager mit Backwardwhirl (Abszisse: Zeit in s, Ordinate: Drehzahl in min^{-1})

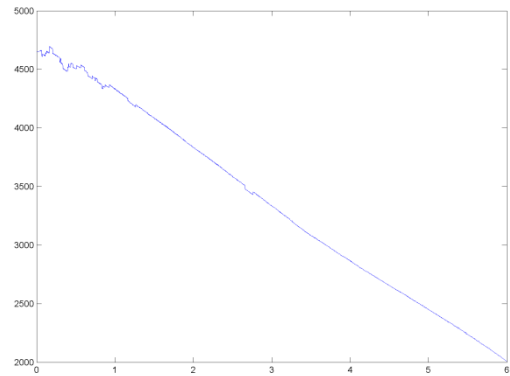


Abbildung 9: Drehzahlverlauf in einem Bronzegleitlager (Abszisse: Zeit in s, Ordinate: Drehzahl in min^{-1})

4 Simulationsmodell und Ergebnisse

4.1 Vorstellung des Modells

Das Simulationsmodell besteht aus Teilmodellen für Magnetlager und Fanglager die über einen flexiblen Rotor gekoppelt sind. Die Grundstruktur des Modells ist in Abbildung 10 dargestellt. Das Modell wurde für die Untersuchung von Wälzlagern erstellt [4] und für die Simulation von Gleitlagern erweitert.

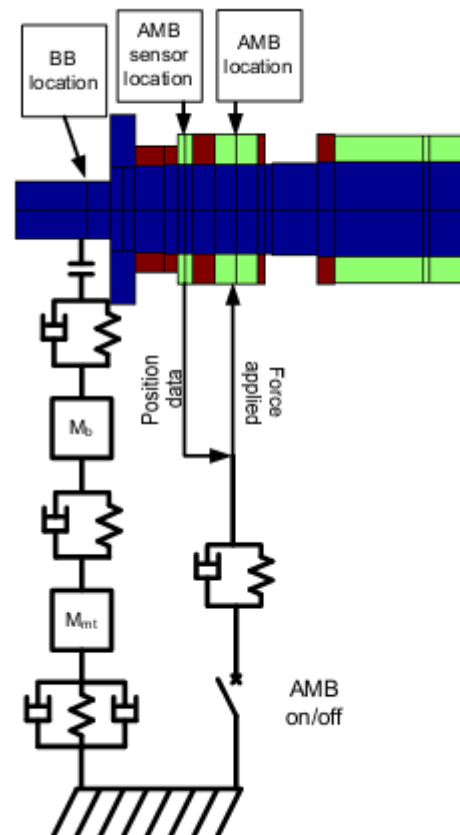


Abbildung 10: Rotormodell mit Magnetlager- und Fanglagerteilmodell

Das Modell wurde in dem Programm MatLab Simulink umgesetzt. Um die Änderungen am Modell in einem vertretbaren Maß zu halten, wurden die Simulationsblöcke der Wälzlager so geändert, dass eine Bewegung des Lagerinnenrings verhindert wird und nur noch die Reibverhältnisse von Innenring und Rotor von Bedeutung sind. Die Algorithmen zur Berechnung der Drehzahländerung wurden an die Gegebenheiten der Gleitfanglagerung angepasst. Dieses war notwendig da die Drehzahländerung des Rotors durch die Reibung und den Energieverlust im Fanglager bestimmt ist.

4.2 Simulationsergebnisse

In Abbildung 11 sind erste Ergebnisse der Simulation eines Rotorabsturzes bei einer Drehzahl von 3000 min^{-1} in Polyamidgleitlagern dargestellt. Erste objektive Vergleiche zeigen, dass der Orbitplot ähnlich denen der Experimente ist. Eine genaue Überprüfung der Simulation steht noch aus.

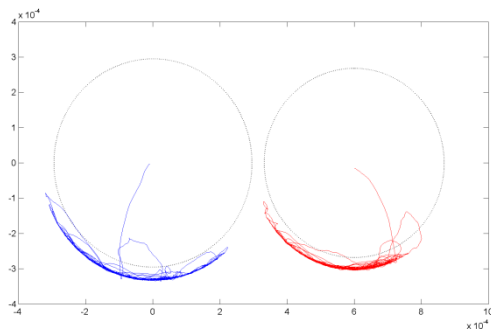


Abbildung 11: Orbitplot der Simulationsdaten des linken und rechten Fanglagers (PA) bei einem Abwurf bei 3000 min^{-1} (Abszisse: Weg in m, Ordinate: Weg)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass Rotorabwürfe auch mit Gleitlagern sicher beherrscht werden können. Dabei wurden verschiedene Werkstoffe auf deren Eignung untersucht. Mit Hilfe der Einbringung einer Kerbe in Polyamidgleitlager konnte eine Möglichkeit gezeigt werden für die Maschine ungünstige Bewegungen des Rotors zu unterbrechen. Durch diese einfache Modifizierung konnten die Belastungen der Maschine entscheidend gesenkt werden. Durch die Untersuchung von verschiedenen Lagertypen liegt eine Datenbasis vor, um die Einflüsse der Reibfaktoren, der Steifigkeit sowie der Dämpfung der Fanglager genauer untersuchen zu können. Mit den ersten Simulationsergebnissen liegen Werte vor um das Verhalten des Rotors in Gleitfanglagern und damit die Belastungen der Lager und der Maschine vorhersagen zu können.

Zukünftig muss das Simulationsmodell für die genaue Beschreibung aller Vorgänge ertüchtigt werden, um eine bessere Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den experimentell ermittelten Daten zu erreichen. Weiterhin muss eine Allgemeingültigkeit des Modells untersucht und diese mit Experimenten an anderen Versuchsständen verifiziert werden.

Quellen

- [1] H. Wittel et al.: Roloff/Matek Maschinenelemente; Vieweg+Teubner Verlag Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011
- [2] R. Gasch, R. Nordmann, H. Pfützner: Rotordynamik, 2., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002
- [3] Jan J. Janse van Rensburg, George van Schoor, Pieter A. van Vuuren; The characterization of the severity of rotor delevitation events: A parametric study, ISMB 13 Washington 2012
- [4] Jan J. Janse van Rensburg, George van Schoor, Pieter A. van Vuuren; Delevitation Modelling of an Active Magnetic Bearing Supported Rotor, ISMB 12 Wuhan 2010