

# Eignung von Gleitlagern als Fanglager für schwere magnetgelagerte Rotoren bei erhöhten Temperaturen

**Christian VANEK, Frank WORLITZ**

*Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM)*

*Hochschule Zittau/Görlitz*

*Email: C.Vanek@hszg.de, F.Worlitz@hszg.de*

## Kurzfassung

Der zunehmende Einsatz von Magnetlagern im industriellen Umfeld stellt immer höhere Anforderungen an die eingesetzten Komponenten bezüglich der Robustheit gegenüber extremen Umgebungsbedingungen. Extreme Umgebungsbedingungen sind hohe Temperaturen ( $> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und/oder die Anwesenheit von aggressiven Medien. Neben der Ertüchtigung der Magnetlager muss auch die Fanglagerung unter diesen Umgebungsbedingungen zuverlässig funktionieren. Der Beitrag soll zeigen, welche Herausforderungen bestehen, eine solche Fanglagerung auszulegen. Weiterhin soll das geplante Gleitfanglagermodell und die Validierungsstrategie für dieses Modell vorgestellt werden.

## 1 Einleitung

### 1.1 Anforderungen an das Gleitfanglager

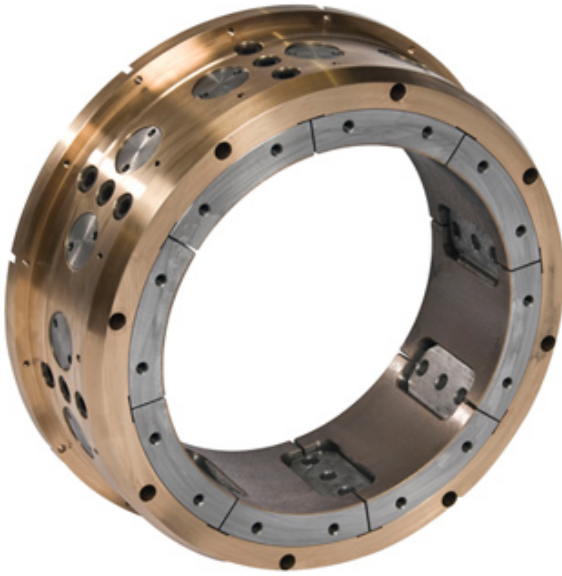
Der Einsatz von Magnetlagern unter extremen Umgebungsbedingungen stellt besondere Anforderungen an die einzusetzenden Magnetlager. Extreme Umgebungsbedingungen sind hohe Temperaturen ( $> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und/oder die Anwesenheit von aggressiven Medien. Neben der Ertüchtigung der Magnetlager muss auch die Fanglagerung unter diesen Umgebungsbedingungen zuverlässig funktionieren. Je einfacher die Fanglagerung aufgebaut ist, desto eher kann dieses Ziel erreicht werden. Gleitlager sind gegenüber Wälzlagern unempfindlicher gegen Schmutz und können mit einer Trockenschmierung versehen werden. Darüber hinaus können Gleitlager teilbar gestaltet werden, um die Montage zu vereinfachen. Bei Gleitlagern wird zur Schmierung Öl eingesetzt. Bei Fanglagern soll eine solche

Schmierung vermieden werden, da diese die Systemkomplexität erhöht und ein Sicherheitsrisiko auf Grund der Brandmasse darstellt. Es soll daher eine wartungsfreie Trockenschmierung zum Einsatz kommen. Für eine Fanglagerung für den Einsatz bei erhöhten Temperaturen werden folgende Anforderungen gestellt:

1. einfacher Aufbau
2. kostengünstig in Fertigung und Montage
3. möglichst wartungsfrei
4. geringe Alterung
5. verwendbar für mehr als einen Rotorabsturz

### 1.2 Stand von Wissenschaft und Technik

Für kleine und leichte Rotoren sind Gleitfanglager aus der Literatur bekannt, welche auch in kommerziell vertriebenen Maschinen eingesetzt werden. In [1] wird ein Schwungmassespeicher vorgestellt, der mit Kohlenstoffgleitlagern ausgestattet ist. Fumagalli beschreibt in [2] einen Versuchsstand, an welchem verschiedene Gleitfanglager aus Kohlenstoff, Berylliumbronze, Bronze und Nylon getestet wurden. In [3] werden weitere Versuche mit Gleitfanglagern aus Sinterbronze, PTFE und Polyamid vorgestellt. Für schwere Rotoren (Masse  $> 1\text{ t}$ ) werden fast ausnahmslos Wälzlager verwendet [4]. Gleitfanglager werden bisher nur von der Waukesha Bearings Corporation realisiert (Abb. 1). Das hier dargestellte Fanglager wird für Rotoren mit einer Masse von ca. 1,5 t bei Drehzahlen oberhalb der biegekritischen Drehzahl verwendet [5]. Die Umgebungstemperaturen bei dieser Anwendungen sind  $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In [7] wird ein Gleitfanglager als Fanglager für ein magnetgelagertes Flugzeugtriebwerk vorgestellt. Das Lager



**Abb. 1:** Radialgleitfanglager der Waukesha Bearings Corporation [6]

kann bei einer Temperatur bis ca. 540 °C einsetzt werden. Das Fanglager besteht aus einer Graphitlegierung mit guten Schmiereigenschaften. Um einen aerostatische Effekt in diesem Fanglager zu erzeugen, wird das Lager mit Druckluft beaufschlagt.

### 1.3 Einfluss der Temperatur auf das Fanglager

#### Steifigkeit

Fast alle mechanischen Eigenschaften der Fanglagerwerkstoffe sind temperaturabhängig. Bei Stahl nehmen Elastizitätsmodul, Schubmodul und Streckgrenze mit steigender Temperatur ab. Die Querkontraktionszahl bleibt bis ca. 600 °C konstant und der Wärmeausdehnungskoeffizient nimmt zu [8]. Diese mechanischen Eigenschaften haben Einfluss auf die Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften des Fanglagers. Die Reaktionskraft des Fanglagers auf den Rotor berechnet sich nach Gl. 1 [9]. Grundlage für die Berechnung ist die Kontakttheorie nach Hertz.

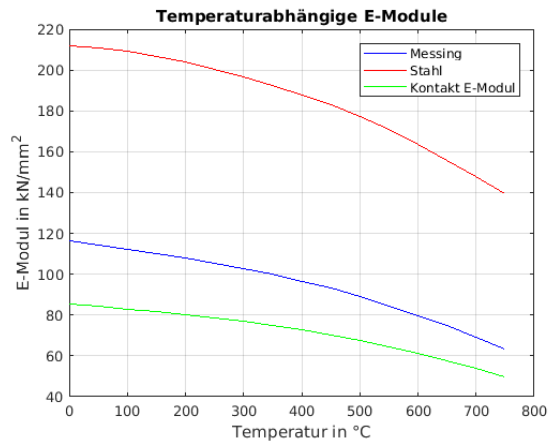
$$F = \frac{\pi}{4} \cdot E^* \cdot L \cdot d \quad (1)$$

Dabei beschreibt  $L$  die Kontaktlänge und  $d$  die Eindringtiefe. Der Kontaktelastizitätsmodul  $E^*$

berechnet sich nach Gl. 2.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2)$$

mit der Poissonzahl  $\nu$ . Der Kontaktelelastizitätsmodul ist ebenso temperaturabhängig (Abb. 2). Bei höheren Temperaturen kommt es daher zu



**Abb. 2:** Temperaturabhängige E-Module für Messing (blau), Stahl (rot) und der nach Gl. 2 berechnete Kontakt E-Modul [9][8]

einem Absinken der Steifigkeit.

#### Dämpfung

Neben der Steifigkeit ist die Dämpfung des Lagers entscheidend für das Verhalten des Rotors im Absturzfall. Als Dämpfung wird der Energieverlust zwischen Be- und Entlastung des Lagers bezeichnet und allgemein als Dämpfungsarbeit angegeben. Die Dämpfung hängt von den eingesetzten Werkstoffen sowie der Art und der Höhe der Belastung ab. Je nach Art der Belastung muss ein Dämpfungsmodell gewählt werden, das mit verschiedenen Hilfsgrößen parametrisiert wird. Die Ermittlung der Hilfsgrößen gestaltet sich besonders bei komplexen Bauteilen, wie einem Fanglager, schwierig, da diese von der Verarbeitung der einzelnen Werkstoffe abhängig sind. Darüber hinaus ist auf Grund der Temperaturabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften auch die Dämpfung temperaturabhängig.

#### Reibwert

Der Reibwert zwischen Fanglager und Rotor hat entscheidenden Einfluss auf das Verhalten des Rotors im Absturzfall. Bei höheren Reibwerten

ist es eher möglich, dass der Rotor in den zerstörerischen Backward whirl gezwungen wird. Im Fall eines Backward whirl können Kräfte mit dem 300-fachen der Rotorgewichtskraft auftreten [10]. Eine Auslegung des Fanglagers und des Maschinengehäuses für derartige Belastungen ist sehr kostenintensiv.

Bei Temperaturerhöhung ist ebenso eine Erhöhung des Reibwertes zu erwarten [9], wie in Abb. 3 dargestellt. Für den Gleitreibungskoeffizienten ist ein ähnlicher Verlauf zu erwarten.

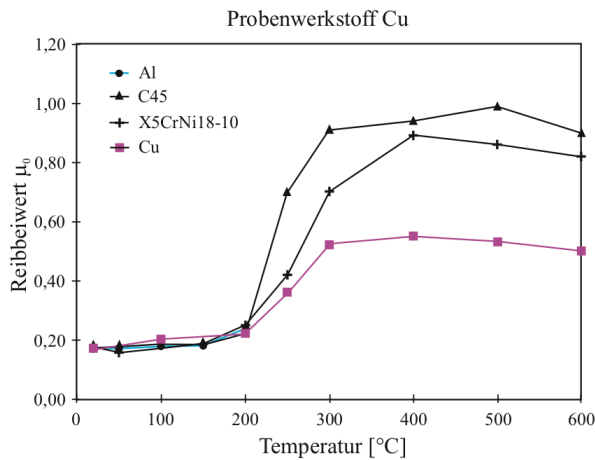


Abb. 3: Temperaturabhängigkeit des Reibwertes [9]

Darüber hinaus sind die Reibkoeffizienten von der Relativgeschwindigkeit, der Kontaktzeit und Verunreinigungen auf der Oberfläche abhängig. Um die dabei auftretenden Einzeleffekte und Wechselwirkungen zu untersuchen sowie Parameter für Simulationsrechnungen zu ermitteln, sind Experimente notwendig.

### Verschleiß

Der Verschleiß bei trocken geschmierten Gleitlagern ist von der Belastung, der Temperatur, der Geschwindigkeit und den Reibpartnern abhängig. In der Regel wird der Wert für den Verschleiß in Abtrag je Laufweg angegeben. Für das Fanglager muss der Verschleiß so begrenzt werden, dass es bei einem kompletten Auslauf des Rotors in den Fanglagern zu keiner Beschädigung der Maschine kommt.

## 2 Fanglagermodell

### 2.1 Aufbau

Für Wälzfanglager sind aus der Literatur Modelle zur Simulation des Rotor-Fanglagerkontaktes bekannt. Eine Übersicht dazu ist in [11] veröffentlicht.

Für Gleitfanglager sind diese Modelle nur bedingt einsetzbar. Abb. 4 zeigt einen Ansatz für eine Modellstruktur mit modularem Aufbau. Die einzelnen Module können ersetzt werden, um beispielsweise andere Reibmodelle zu verwenden. Bei allen Modulen muss die Änderung der

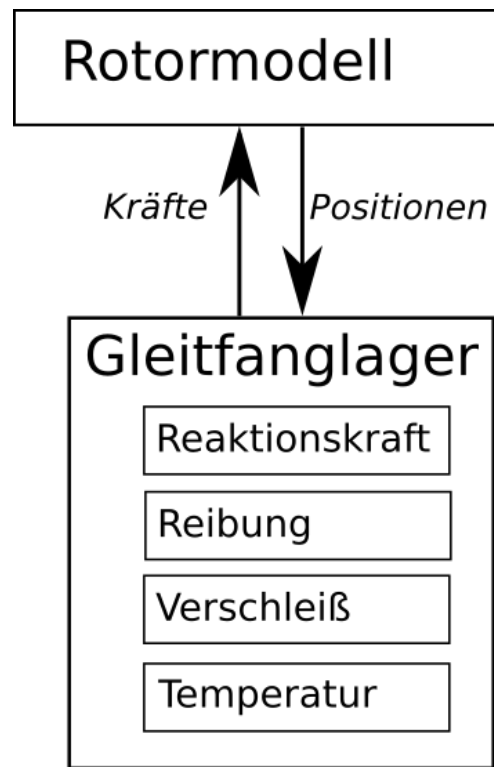


Abb. 4: Schema des geplanten Modells

Eigenschaften auf Grund der Temperatur berücksichtigt werden. Neben den im Abschnitt 1.3 genannten Eigenschaften müssen auch Änderung der Geometrie, wie Luftspalte oder Längen, berücksichtigt werden. Für den Rotor soll daher ein numerisches Modell verwendet werden, was sich derzeit in der Entwicklung befindet. Mit Hilfe des Modells soll es möglich sein, die Auslegung von Gleitfanglagern für magnetgelagerte Maschinen zu unterstützen. Die Modellvalidierung erfolgt am Magnet- und Fanglagerversuchsstand (MFLP).

## 2.2 Parametrierung

Die Parametrierung der einzelnen Bestandteile des Fanglagermodells sollte nach Möglichkeit durch Berechnung der Parameter aus den Eigenschaften der Bauteile erfolgen. Sofern diese Parameter und Werte in der Literatur verfügbar sind, können diese direkt übernommen werden. Für die Temperaturabhängigkeit von Dämpfung, Verschleiß und Reibwert müssen eigene Experimente durchgeführt werden. Reibwert und Verschleiß können an einem Reibversuchsstand ermittelt werden. Dazu werden zwei Proben (Wellenmaterial und Fanglagermaterial) mit der zu erwartenden Flächenpressung aneinander gedrückt und gegeneinander bewegt. Ziel ist es, die Reib- und Verschleißwerte für einen Versuch, der in den wesentlichen Parametern dem Rotorabsturz entspricht, zu ermitteln. Für Untersuchungen der Temperaturabhängigkeit der Dämpfung ist ein Kugelversuchsstand geplant. Dieser Versuchsstand besteht aus einer beheizbaren Prallplatte, auf welche aus einer definierten Höhe eine Kugel fallen gelassen wird. Über eine Highspeedkamera wird der Rückprallweg der Kugel ermittelt. Somit kann die Steifigkeit und die Dämpfung berechnet werden. Durch Experimente bei verschiedenen Temperaturen werden so prinzipielle Erkenntnisse zur Temperaturabhängigkeit von Steifigkeit und Dämpfung gewonnen.

## 3 Modellvalidierung

### 3.1 Versuchsstand MFLP

Der MFLP wurde in einem zurückliegenden EFRE-Projekt im Zittauer Kraftwerkslabor aufgebaut (Abb. 5) [12]. Der Versuchsstand ermöglicht die Validierung des Gleitfanglagermodells bei verschiedenen Temperaturen sowie der Anwesenheit verschiedener Medien, wie zum Beispiel Dampf.

### 3.2 Radialgleitfanglager

#### Aufbau

Um das Fanglagermodell zu validieren, wird ein neues, modular aufgebautes Radialgleitfanglager gefertigt (Abb. 6). Die Hauptkomponenten sind das Gehäuse und die Gleitfanglagerhülse. Das



Abb. 5: Versuchsstand MFLP

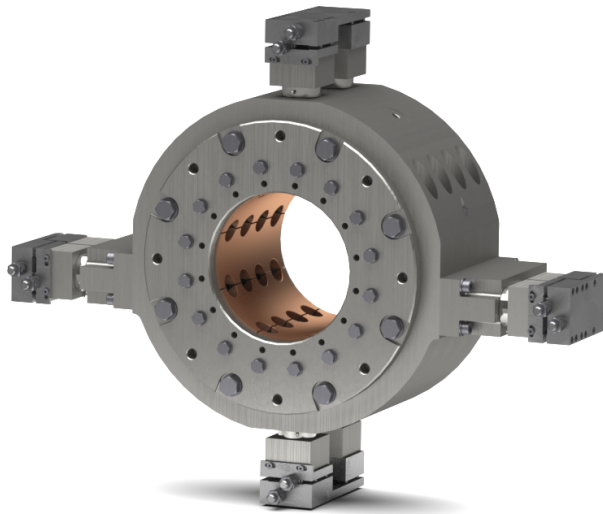


Abb. 6: geplantes Radialgleitfanglager

Gehäuse des Lagers ist fest mit dem Druckbehälter des Versuchsstandes verbunden. Die Ausrichtung erfolgt über einstellbare Keilschieber. Zwischen den Keilschiebern und dem Gehäuse werden Kraftsensoren installiert, um die Belastungen während des Abwurfs messen zu können. Je Achse sind vier Sensoren der Firma Kistler vom Typ 9061A vorgesehen. In das Gehäuse wird die Gleitfanglagerhülse eingeschoben, in welche Gleitpads montiert werden. Zum Test verschiedener Konfigurationen von Reibpartnern können die Gleitpads aus unterschiedlichen Materialien bestehen. Für die Inbetriebnahme sind Gleitpads aus Lagerbronze vorgesehen, welche mit einem Gleitlack überzogen sind. Der Gleitlack dient als Trockenschmierstoff. Für den Einsatz bei höheren Temperaturen eignet sich diese beschichtete Bronze nicht, da der vorgesehene Gleitlack nur bis ca. 140 °C stabil ist. Die Verwendung von anderen Gleitlackwerkstoffen



muss daher geprüft werden. Neben Bronze kommen Kohlenstoff oder Keramikgleitpads infrage. Beide Werkstoffe sind bis über 500 °C einsetzbar. Kohlenstoff und Keramik sind spröde Werkstoffe. Es besteht daher beim Einschlag des Rotors ins Fanglager die Gefahr der Beschädigung der Gleitpads. Besonders Gleitlager aus Keramik neigen beim Trockenlauf dazu, die Welle zu beschädigen. Dieses geschieht durch die Aufrauung der Keramikoberfläche, welche dann wie ein Schleifmittel wirkt. Sinnvoll könnte auch eine Kombination von unterschiedlichen Gleitpadmaterialien sein. Sinterbronze vereint die Eigenschaften von Bronze und Kohlenstoff in einem Werkstoff. Fanglager aus diesem Material haben schon in Versuchen mit einem Kleinversuchsstand gute Ergebnisse erzielt [3].

### **Instrumentierung**

Für die Experimente werden folgende Messwerte aufgezeichnet:

1. Temperatur
2. Position
3. Drehzahl
4. Kraft
5. Beschleunigung

Die Temperatur wird nahe der Oberfläche der Gleitpads mit Hilfe von Thermoelementen bestimmt. Die Gleitpads im unteren Teil des Lagers werden mit mehr Temperaturmessstellen ausgestattet, da hier die größten Belastungen und damit der größten Wärmeeinträge zu erwarten sind. Für die Messung der Rotorposition werden die dem Magnetlager inhärenten Abstandssensoren verwendet. Damit können die Positionsdaten zur Modellvalidierung und zur Zustandsdiagnose der Lager [11] genutzt werden.

Um zusätzliche Informationen zur Modellvalidierung zu gewinnen, ist eine Positionsmessung direkt am Fanglager geplant. Die Drehzahl des Rotors wird über eine Zahnscheibe gemessen und auch für die Drehzahlregelung des Motors verwendet. Im Abschnitt Aufbau wurden bereits die geplanten Sensoren vom Typ Kistler 9061A erwähnt. Abb. 6 zeigt die Einbauposition der Sensoren zwischen Gehäuse und Keilschieber. Es handelt sich um piezoelektrische Kraftaufnehmer mit einer maximalen Belastung von 200 kN.

Um Zug- und Druckkräfte messen zu können sind die Sensoren vorgespannt. Die Rotorbeschleunigung kann über zweimalige Differenzierung der Positionssignale berechnet werden. Die Auswertung der stark verrauschten Signale ist dabei eine besondere Herausforderung. Die Beschleunigung des Fanglagergehäuses wird über Beschleunigungssensoren in den drei Hauptachsen gemessen.

### **Validierungsstrategie**

Auf Grund der Komplexität des Fanglagermodells ist eine mehrstufige Validierung sinnvoll [13]. Die einzelnen Bestandteile des Modells sollten nach Möglichkeit separat getestet werden. Für das Rotormodell kann dies durch Vergleichsrechnungen mit anderen Rotordynamik- oder FEM-Programmen erfolgen. Die Reaktionskraft kann experimentell durch Abschalten der Magnetlager aus der Mittellage erfolgen. Das Rotorverhalten ist dann nur von der Steifigkeit und Dämpfung des Lagers abhängig. Das Reibmodell kann durch ein Abrollen des Rotors im Fanglager getestet werden. Dazu wird der Rotor an die linke oder rechte Randlage in den Magnetlagern positioniert und die Magnetlager abgeschaltet. Die Gesamtwirkungsweise des Modells kann nur durch Experimente mit komplexen Rotorabstürzen validiert werden.

## **4 Zusammenfassung**

Um die Vorteile von Gleitlagern als Fanglager nutzen zu können, muss deren Zuverlässigkeit für schwere Rotoren und beim Einsatz bei hohen Temperaturen nachgewiesen werden. Dies erfolgt durch theoretische und experimentelle Untersuchungen. Für die theoretischen Untersuchungen wird dazu ein modular aufgebautes Modell erstellt. Die experimentellen Untersuchungen erfolgen zur Ermittlung von Einzeleffekten an Kleinversuchsständen und für die Validierung des Modells am MFLP.

### **Quellenverzeichnis**

- [1] P.-K., Budig: Betrachtungen zur Theorie und Anwendung magnetischer Lager. In:

8. *Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz*. 5. Sep. 2011

- [2] Fumagalli, M.: *Modelling and Measurement Analysis of the Contact Interaction between a High Speed Rotor and its Stator*. Diss. SWISS INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH, 1997
- [3] Vanek, C. ; Hecht, N. ; Worlitz, F. ; Janse van Rensburg, J. ; van Schoor, G.: Validierung eines Gleitfinglagermodells durch Abwurfversuche. In: *9. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz*. 2013
- [4] Schaeffler Technologies GmbH & Co KG: *FAG Active Magnetic Bearing*. 20. Dez. 2016. URL: [http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/brochure/downloads\\_1/pmb\\_de\\_de.pdf](http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/brochure/downloads_1/pmb_de_de.pdf)
- [5] Collins, T. ; Masala, A. ; Schultz, R. ; Guo, Z.: Numerical and Experimental Results of Auxiliary Bearings Testing on a High Speed Test Rig. In: *Proceedings of 14th International Symposium on magnetic bearing*. 2014
- [6] Waukesha Bearings Corporation: *Auxiliary Bearings*. Hrsg. von Corporation, Waukesha Bearings. 27. Juli 2017. URL: <http://www.waukbearing.com/images/gallery/thumbs/en-after49-1.jpg?ts=1355199125>
- [7] Jansen, M. ; Montague, G. ; Provenza, A. ; Palazzolo, A.: *High Speed, High Temperature, Fault Tolerant Operation of a Combination Magnetic-Hydrostatic Bearing Rotor Support System for Turbomachinery*. Techn. Ber. ARL-TR-3156. NASA, März 2004
- [8] Biermann, Markus ; Blanke, Walter ; Dammermann, Wilhelm ; German, Sigmar ; Gorski, Walter: *Thermophysikalische Stoffgrößen*. Springer, 29. Nov. 1988. 400 S. ISBN: 3540184953. URL: [http://www.ebook.de/de/product/17970737/markus\\_biermann\\_walter\\_blanke\\_wilhelm\\_dammermann\\_sigmar\\_german\\_walter\\_gorski\\_thermophysikalische\\_stoffgroessen.html](http://www.ebook.de/de/product/17970737/markus_biermann_walter_blanke_wilhelm_dammermann_sigmar_german_walter_gorski_thermophysikalische_stoffgroessen.html)
- [9] Popov, V.: *Kontaktmechanik und Reibung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-88836-9. DOI: 10.1007/978-3-540-88837-6
- [10] Helfert, M.: *Rotorabstürze in Wälzlager*. Fachbereich Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt, 2009
- [11] Janse van Rensburg, J. J.: *Delevitation modelling of an active magnetic bearing supported rotor*. Diss. Potchefstroom campus of the North-West University, 4. Dez. 2013
- [12] Duesterhaupt, S. ; Neumann, H. ; Panescu, C. ; Rottenbach, T ; Worlitz, F.: Test Field for Magnetic Bearing Applications under Extreme Conditions. In: *14th International Symposium on Magnetic Bearings*. 2014
- [13] Renwanz, W. ; Liebich, R. ; Fehres, F.: Validierung und Parameteranpassung von Fanglager-Simulationsmodellen. In: *Proceedings of SIRM 2013*. 25. Feb. 2013