

Konzipierung, Auslegung und Umsetzung eines Prüfstandes zur Detektion von Wälzlagerschäden

Andreas Mischi, Franz-Josef Falkner (supervisor)

Abstract—This work deals with the implementation of a test stand for the detection of rolling bearing damage. The aim is to be able to detect damage that is already pronounced as well as damage that is developing and to save their data records for further processing. Since the main application of the test bench is the detection of bearing damage in turbine guide shafts of small hydroelectric power plants, the components installed are designed according to the bearing types and dimensions that are primarily installed in these power plants. Early detection of damage to rolling bearings plays a major role in maintaining the functional efficiency of the plant. Regular inspections of the installed bearings ensure the safe guidance of the shaft in the long term and can prevent a prolonged failure of the associated generator. The bearings to be inspected are removed from the shaft and clamped onto the shaft of the test stand. By adapting an adapter sleeve, the clamping mechanism installed in the test stand is able to safely clamp a variety of different bearings. The detection of damage is based on the evaluation of the vibrations emitted by the bearing during rotation. These vibration signals are then post-processed and broken down into their frequency spectrum. The evaluation procedure is based on envelope curve analysis. By analysing the measurement data obtained, the location of the damage occurring on the bearing can be identified and subsequently individual components or the entire bearing can be replaced. The test stand is to be tested with rolling bearings that have already run in small power plants. The commissioning and thus also the checking of the functional capability is thus carried out on the basis of real rolling bearing damage.

Index Terms—rolling bearings, hydropower plants, vibration measurement, operational safety

A. Mischi studiert am Management Center Innsbruck, e-mail: ma3483@mci4me.at.

I. EINLEITUNG

Die reibungsarme Führung von Wellen wird in zahlreichen technischen Anwendungen durch den Einsatz von Wälzlagern realisiert. Die theoretische Lebensdauer dieser Lager wird durch Einflüsse wie Materialermüdung, Probleme mit der Lagerschmierung, dem Einbringen von Fremdkörpern, falscher Belastung und weiteren Einflüssen vermindert [1]. Diese Umstände führen dazu, dass Maschinen und Anlagen unerwartet ausfallen können oder durch das Versagen der Lager sogar Schäden an umliegenden Komponenten entstehen können. Aus diesem Grund neigen Unternehmen dazu, systemkritische Wälzlager lange vor dem Erreichen der maximalen Lebensdauer auszutauschen und nehmen die dadurch entstehenden Mehrkosten in Kauf.

Durch den Einsatz von Beschleunigungssensoren können Daten generiert werden, welche den schadhafte Zustand einzelner Lagerkomponenten sichtbar machen. Die dabei eingesetzte Analyse von Schwingungen gewinnt in der Zustandsüberwachung von Maschinenkomponenten zunehmend an Bedeutung. Sinkende Kosten für Sensoren und Messsysteme führen dazu, dass die Anzahl der Betriebe, welche Zustandsüberwachungen an deren Anlagen durchführen, steigt.

Die aktuelle Forschung befasst sich dabei mit dem entwickeln von Vorhersagemodellen zur Ausfallwahrscheinlichkeit von Lagern in Kombination mit dem Einsatz von echtzeiterfassenden Sensoren, welche direkt an den Maschinenkomponenten ange-

bracht werden können [2]. Dabei werden zahlreiche Datensätze von Wälzlagern benötigt, welche bereits Schäden aufweisen. Vor allem bei Lagern mit größerem Durchmesser sind diese Datensätze aber nur bedingt vorhanden. Um diesen Mangel an Daten zu beheben, soll ein Prüfstand für die Detektion von Wälzlerschäden entworfen und anschließend realisiert werden. Dieser soll ein zuvor definiertes Spektrum an Lagern auf Schäden untersuchen können und die gemessenen Daten für die Weiterverarbeitung aufzeichnen.

II. METHODEN

Die Umsetzung eines Prüfstandes zur Detektion von Wälzlerschäden ist in mehrere Arbeitspakete gegliedert, welche im folgenden aufgezählt und anschließend erläutert werden.

- Konzipierung
- Auslegung
- Realisierung
- Inbetriebnahme

Für die Konzipierung des Prüfstandes soll die Funktionsweise aktueller, am Markt befindlicher Prüfstände evaluiert werden. Die Auslegung des Prüfstandes erfolgt dabei nach den zuvor festgelegten Rahmenbedingungen. Diese sehen eine Einschränkung der zu verwendenden Wälzlager vor, da die zu untersuchenden, bereits beschädigten Lager vorwiegend aus Antriebswellen von Kleinwasserkraftwerken bezogen werden. Ebenfalls muss auf die notwendige Sensorik geachtet werden, um Schäden an Wälzlagern sicher detektieren zu können. Anschließend erfolgt die Realisierung des Prüfstandes. Die zuvor konstruktiv ausgelegten Komponenten müssen gefertigt und zugekauft werden und auf einen kompatiblen Materialmix geachtet werden.

Um die Funktion des Prüfstandes zu testen, wird nach der Realisierung ein beschädigtes, aus einem Kleinkraftwerk stammendes Wälzlager in den Prüfstand gespannt und auf Schäden untersucht. Dieser Schritt wird als Inbetriebnahme des Prüfstandes gewertet. Zusätzlich wird ein stationär verbautes unbeschädigtes Lager untersucht, um die Ergebnisse

mit dem beschädigten Lager vergleichen zu können. Die Aufzeichnung der Sensoren muss dabei über die Wahl geeigneter Schnittstellen in ein Matlab-Skript importiert werden können, in welchem auch zeitgleich eine Aufbereitung der Messdaten erfolgt. Die Schadfrequenzen der getesteten Wälzlager müssen dabei eindeutig zuzuordnen sein, um diese mit den vom Hersteller veröffentlichten Schadfrequenzen zu vergleichen und den Schaden verifizieren zu können.

A. Konzipierung

Das entwickelte Konzept ist in Abbildung 1 zu sehen und zeigt den schematischen Aufbau des Prüfstandes.

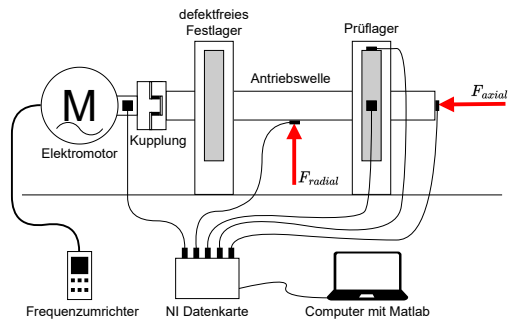


Abbildung 1: Schematik eines Prüfstandes zur Detektion von Wälzlerschäden

Das benötigte Drehmoment für das Antreiben des Prüfstandes wird über einen Elektromotor in Kombination mit einem Frequenzumrichter bereit gestellt. Wegen der zu übertragenden Kräfte wird dabei auf einen Drehstrommotor gesetzt. Über den dreiphasigen Frequenzumrichter wird der Prüfstand angesteuert und der Motor in Rotation versetzt. Die Motorwelle wird über eine Kupplung mit der Antriebswelle verbunden. Die Antriebswelle wird durch ein Festlager in Form eines Rillenkugellagers gelagert. Das Lager wird in einen Lagerbock eingefasst, welcher mit der Grundplatte verschraubt wird. Dieses Lager hat den Zweck, alle auf die Antriebswelle einwirkenden

Kräfte von der Motorwelle fernzuhalten und diese frühzeitig abzufangen. Nach dem Festlager erfolgt die Einleitung der Radialkraft, ehe das Prüflager folgt. Dieses wird über ein Spannsystem mit der Grundplatte verbunden. Zuletzt erfolgt die Einleitung der Axialkraft.

Die vorgesehenen Sensoren sind in der Schematik durch schwarze Vierecke dargestellt. Da die ausgegebene Drehzahl des Frequenzumrichters wegen dem auftretenden Schlupf nicht präzise ist, wird auf der Motorwelle ein Drehzahlsensor angebracht. Um die in die Antriebswelle eingeleiteten Radial- und Axialkräfte zu messen und etwaige Reibungseinflüsse nicht mitzumessen, werden die eingeleiteten Kräfte möglichst nahe an der Antriebswelle über Kraftmessdosen gemessen. Diese Sensoren sind in der Abbildung direkt bei den Kräften eingezeichnet. Um das Prüflager auf Schäden untersuchen zu können, werden uniaxiale Beschleunigungssensoren vorgesehen. Diese können entweder am Lagerbock, oder am stillstehenden Außenring angebracht werden. Die Datenleitungen der verbauten Sensoren werden gebündelt an eine National Instruments Datenerfassungskarte weitergeleitet. Die durch die Sensoren aufgenommenen Messdaten werden abschließend von der NI-Datenerfassungskarte über einen USB-Anschluss an einen Computer weitergeleitet. An diesem werden die Messdaten ausgewertet und über die Software Matlab aufbereitet.

B. Auslegung der Komponenten

Der Aufbau eines Prüfstandes zur Detektion von Wälzlerschäden besteht vereinfacht aus einem Elektromotor, einer davon angetriebenen und gelagerten Welle, einer Spannvorrichtung für das Prüflager und der Kraftaufbringung. Diese Komponenten müssen vor der Realisierung ausgelegt werden. Die dazu benötigten Formeln stammen aus der angehängten Quelle [3]. Es folgt die Auslegung der mechanischen und elektrischen Kernkomponenten.

1) *Antriebswelle:* Der benötigte Durchmesser der Antriebswelle wird über die folgende Formel

genähert, welche das auf die Welle wirkende Torsionsmoment T sowie das Biegemoment M_b berücksichtigt. Diese werden in einem ersten Schritt zu einem Vergleichsmoment M_v zusammengesetzt.

$$M_v = \sqrt{M_b^2 + 0,75 T^2} \quad (1)$$

Das Biegemoment ergibt sich durch die Ermittlung der Schnittkräfte unter Berücksichtigung der Lagerabstände und der dazwischen eingeleiteten Querkraft. Das Torsionsmoment wird über das Nennmoment und der Multiplikation eines Anwendungsfaktors ermittelt.

Der minimale Durchmesser der Antriebswelle ergibt sich durch berücksichtigen des Vergleichsmoments und der Biegezugfestigkeit σ_{bW} des verwendeten Werkstoffs. Die Wahl des Werkstoffs fällt auf einen nichtrostenden Stahl (1.4104+QT650), welcher durch eine Wärmebehandlung über eine erhöhte Festigkeit verfügt und eine Korrosionsbeständigkeit aufweist.

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 M_v}{\pi \sigma_{bW}}} \quad (2)$$

Da eine zukünftige Modifikation sowohl der Lager wie auch der Krafteinleitung möglich sind, wird der Durchmesser der Antriebswelle überdimensioniert und ein Wellendurchmesser von 80 mm gewählt.

2) *Motor:* Die Auswahl des Motors wird durch die zu übertragende Leistung bestimmt. Diese wird hauptsächlich von den zu überwindenden Trägheiten der Komponenten und der Lagerreibung bestimmt. Das benötigte Drehmoment ergibt sich dabei aus der Summe der Einzelträgheiten, welche mit der Winkelbeschleunigung multipliziert werden.

$$T = J_{ges} \alpha \quad (3)$$

Die Trägheiten der verschiedenen Geometrien werden wegen deren Komplexität aus dem Konstruktionsprogramm entnommen und an dieser Stelle nur die Trägheit der Antriebswelle J_{Welle} berechnet. Diese besteht aus einem nicht rostenden Stahl mit

einem Durchmesser d von 0.08 m und einer Masse m von 25.54 kg.

$$J_{Welle} = \frac{md^2}{8} = \frac{25,54 \cdot 0,08^2}{8} = 0,02 \text{ kgm}^2 \quad (4)$$

Nach dem Addieren aller Trägheiten und der vom Lagerhersteller vorgegebenen Reibmomente der verbauten Lager, welche ebenfalls überwindet werden müssen, ergibt sich die Leistung des Elektromotors zu 2.2 kW. Da sowohl die Lagerdimensionen so wie Teile der Klemmmechanismen für jedes Lager verschieden gewählt werden müssen, wird ein entsprechender Leistungsüberschuss auf Kosten des Wirkungsgrades in Kauf genommen. Dies soll ebenfalls eine zukünftige Modifizierung des Prüfstandes erleichtern.

Bei der Art des Elektromotors wird der Asynchronmotor Motovario TP100LA4 mit einer Polzahl von 4 gewählt. Die Halbierung der möglichen Drehzahl von 3000 s^{-1} auf 1500 s^{-1} wird zugunsten des höheren Nenndrehmoments akzeptiert, welches bei 14,6 Nm liegt [4].

3) *Frequenzumrichter*: Die Leistungsklasse des Frequenzumrichters muss der selben wie die des Elektromotors entsprechen. Dieser wird dreiphasig sowohl im Eingang wie auch im Ausgang gewählt und er muss ein hohes Drehmoment im niederen Frequenzbereich unterstützen. Ebenfalls ist eine externe Steuerung von zentraler Rolle, da der Frequenzumrichter in einem Gehäuse verbaut wird und über ein leicht zugängliches Bedienpanel gesteuert werden soll. Um genügend Leistungsreserve für den Hochfahrvorgang des Prüfstandes zu gewährleisten, an dem die Lagerreibungen überwunden werden müssen, wird der Frequenzumrichter Rievtech RI3000-4T0022G mit einer Leistung von 2.2 kW gewählt.

4) *Motorschutzschalter*: Der Motorschutzschalter richtet sich nach der Leistungsklasse des Frequenzumrichters und dient dazu, im Falle eines Überstromes Schäden am Frequenzumrichter sowie auch am Motor vorzubeugen. Zusätzlich soll der Motorschutz-

schalter bei Betätigen des Notausschalters schalten, um so eine zusätzliche Sicherheit für den Bediener zu gewährleisten. Für diese Komponente wird der Motorschutzschalter Siemens Sirius 3RT2 gewählt, welcher eine Leistung von 3 kW und einen Strom von 7 A unterstützt.

5) *Lager*: Da die Kräfte in axialer und radialer Richtung in eine rotierende Welle eingeleitet werden, müssen dementsprechende Lager vorgesehen werden, um diesen Prozess möglichst reibungsfrei zu gestalten. Dies wird über ein Radial- und ein Axiallager realisiert. Die Wahl des Radiallagers fällt auf das beidseitig geschlossenes Radialnadelager IKO NA4916-2RS, welches einen Innenring besitzt und zerlegbar ist. Für die Einleitung der Axialkraft wird das axiale Zylinderrollenlager NTN 81207-T2 verwendet. Abseits der Kraftaufbringung wird noch ein Lager für die Führung der Welle benötigt, wobei das beidseitig geschlossene Rillenkugellager CUBE 6316-2RS gewählt wird. Dieses Lager ist dazu in der Lage, die axial und radial aufgebracht Kräfte abzufangen und so die anschließende Motorwelle zu schützen.

6) *Sensorik*: Die Wahl der Sensoren für die Messung der axialen und radialen Kräfteinleitung fällt wegen der geringen Baugröße auf die Kraftmessdose ME-Messsysteme KM38 in der 5 kN und der 10 kN Variante (Nennlast). Diese Sensoren basieren auf Dehnmessstreifen (DMS) und sind dazu in der Lage, dauerhaft eine statische Last von 150 % der Nennlast übertragen zu können. Die Ermittlung der Drehzahl wird über den optoelektronischen Sensor Panasonic PM-T45 realisiert. Diese Gabellichtschranke detektiert Unterbrechungen zwischen Sender und Empfänger und wird wegen der geringen Baugröße direkt unter der Motorwelle verbaut. Für die Detektion der von den Wälzlagerschäden verursachten Schwingungen wird der uniaxiale Beschleunigungssensor DeltaTron 4517 gewählt.

7) *Schnittstellen*: Da sich die Datentypen der ausgelegten Sensoren unterscheiden, müssen verschiedene Schnittstellen verwendet werden, um diese für die Weiterverarbeitung aufzubereiten. Die Wahl fällt

dabei auf die Datenerfassungskarten National Instruments NI9234 und NI9237. Letztere dient als Schnittstelle der verbauten, brückenbasierten Kraftsensoren über analoge Eingänge. Die Datenerfassungskarte NI9234 hingegen dient als Schall- und Schwingungsmessmodul.

C. Realisierung

Nach dem Auslegen der einzelnen Komponenten des Prüfstandes folgt das Erstellen der Gesamtkonstruktion für die anschließende Realisierung. Die Fertigung der Einzelkomponenten erfolgt dabei nach den hinterlegten Abmaßen und es wird auf eine Kombination aus CNC-Fräsen, CNC-Drehen, CNC-Schleifen, Laserstrahlschneiden und 3D-Druck gesetzt. Ein Modell des Prüfstandes ist in Abbildung 2 dargestellt.

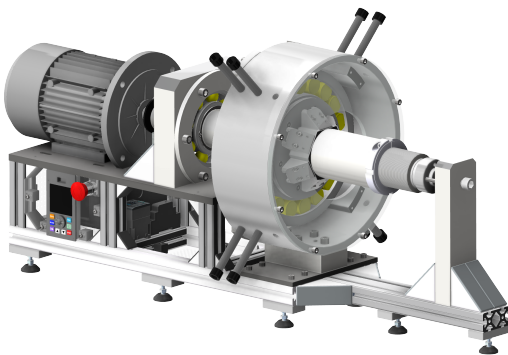


Abbildung 2: 3D-Modell des ausgelegten Prüfstandes zur Detektion von Wälzlagerschäden

Die Basis des Prüfstandes bildet dabei eine Konstruktion aus Item-Profilen, welche über acht höhenverstellbare Füße auf der Auflagefläche platziert sind. Die Elektronik befindet sich dabei in einer abgetrennten Kammer und wird auf der Oberseite von einer Stahlplatte umfasst. Die Mechanik wird über zwei getrennte Stahlplatten und einen Aluminiumsteher in den Aufbau integriert.

Der Aufbau des entwickelten Prüfstandes zur Lagerschadendetektion besteht aus einem Elektromotor, einer damit angetriebenen, gelagerten Welle und Krafterleitungen, welche sowohl axial, wie auch radial aufbringbar sind. Die verschiedenen Prüflager können durch die Realisierung von Klemmvorrichtungen an der Welle fixiert werden. Eine Darstellung des realisierten Prüfstandes ist in Abbildung 3 zu sehen.

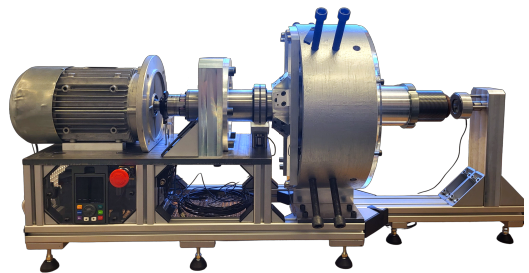


Abbildung 3: Realisierter Prüfstand zur Detektion von Wälzlagerschäden

Auf der linken Seite befindet sich ein Elektromotor, an dessen Welle ein 3D-Druckteil angebracht ist, um mittels Lichtschranke die Drehzahl zu messen. Die Motorwelle ist über eine elastische Klauenkupplung mit der Welle verbunden. Am Anfang der Welle befindet sich ein Lagerbock, in welchem sich das Fixlager befindet. Dies dient zur Abfederung der axialen, sowie radialen Kräfte, welche sonst in die Motorwelle eingeleitet werden. Anschließend erfolgt die radiale Krafterbringung auf die Welle. Diese wird über ein in der Stahlplatte eingebrachtes, metrisches M20-Gewinde und einer Schraube realisiert. Wird die Schraube angezogen, so drückt ein gefrästes Aluminiumteil auf ein Nadellager, welches anschließend die Kraft auf die Welle einleitet. Die Hälfte der so eingeleiteten Kraft gelangt so in das Fixlager und die andere Hälfte in das Prüflager, welches sich im gleichen Abstand dazu befindet. Anschließend zur Radialkrafterbringung befindet sich ein Stahlling, in welchem das Prüflager radial geklemmt ist und dem Lageraußenring zusätzlich einen axialen Anschlag

bietet. Der Innenring wird über eine an der Welle verschraubte Konstruktion angeschlagen und über ein sich am Ende der Welle befindliches, 164 mm langes, metrisches M80x2-Gewinde geklemmt. Die axiale Krafteinleitung erfolgt über ein metrisches M16-Gewinde, welches in einem Steher aus Aluminium eingebracht ist. Wird eine M16-Schraube gekontert, drückt ein gefrästes Aluminiumteil auf ein Axiallager, welches die Kraft anschließend in die Welle einleitet.

III. ERGEBNISSE

Die Wahl des Prüflagers fällt auf das Zylinderrollenlager SKF NU236 ECM. Dieses liegt zwar außerhalb der definierten Abmessungen, kann aber dank Modifikationen des Spannsystems im Prüfstand betrieben werden. Das gewählte Wälzlager ist in Abbildung 4 ersichtlich.



Abbildung 4: Beschädigtes Zylinderrollenlager SKF NU236 ECM

Das abgebildete Lager stammt aus der Führungswelle eines in Österreich betriebenen Kleinwasserkraftwerks und bildet eine geeignete Grundlage für die Erfassung von Messdaten, da dieses mit einem ausgeprägten Käfigschaden versehen ist. Das Zylinderrollenlager wird in der vorliegenden Messreihe mit einer Frequenz von 4.88 Hz betrieben und eine zusätzliche Radialkraft in den Aufbau eingeleitet. Diese wird mit 400 N beaufschlagt und dient dem Erhöhen auftretender Schadamplituden. Die von SKF zur Verfügung gestellten Schadfrequenzen liegen bei

- BPFI 52.966 Hz
- BPFO 39.771 Hz
- BPFR 33.607 Hz
- BPFC 2.093 Hz

Diese Frequenzen und deren höhere Ordnungen dürfen nicht mit Frequenzpeaks der Beschleunigungsdaten zusammenfallen, um das Wälzlager als schadfrei kennzeichnen zu können. Der Beschleunigungssensor wird für die Erstellung der Messdaten an der oberen Fläche der Spannvorrichtung angebracht, da die direkt auf dem stillstehenden Außenring auftretenden Beschleunigungsamplituden durch die Unwucht des Wälzlagerkäfigs bereits in Richtung der maximalen für den Beschleunigungssensor ausgelegten Werte von 500 g geht.

Da der Schaden am Käfig des Lagers bereits mit freiem Auge sichtbar ist, muss sich dieser für eine erfolgreiche Inbetriebnahme des Prüfstandes in der Auswertung eindeutig erkennbar machen. Die mit der Käfigschadfrequenz und deren höherer Ordnungen modifizierten Beschleunigungsmessdaten sind in Abbildung 5 ersichtlich. Dabei reicht bereits ein Frequenzabschnitt von 20 Hz aus, um die ersten 9 Ordnungen des Schadens abzubilden.

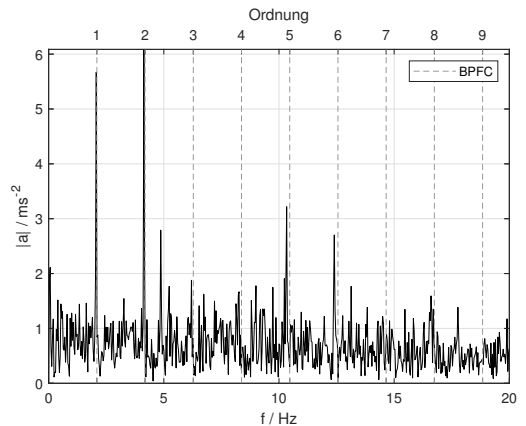


Abbildung 5: Messdaten zur Identifikation eines Käfigschadens am beschädigten Wälzlager

Wie angenommen zeigt sich eine zusammenfallende Erhöhung der Beschleunigungsdaten mit der Grundschadfrequenz der Überrollfrequenz des Käfigs. Zusätzlich befinden sich höhere Ordnungen ebenfalls in Regionen, in welchen Beschleunigungserhöhungen auftreten. Dies führt dazu, dass der optisch sichtbare Käfigschaden über die Messung verifiziert werden kann.

Es folgt das Einbinden der frequenzabhängigen Schadfrequenzen der Überrollfrequenz des Innenrings und deren höherer Ordnungen in die aufgenommenen Beschleunigungsdaten. Dieser Vorgang ist in Abbildung 6 visualisiert, wobei die Grundfrequenz der Überrollfrequenz des Innenrings und deren höhere Ordnung in ein Frequenzspektrum bis 150 Hz eingblendet wird.

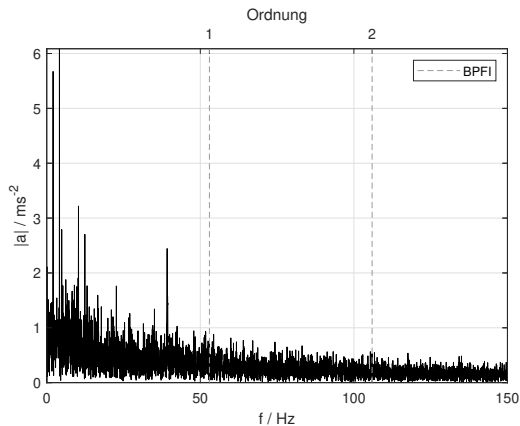


Abbildung 6: Messdaten zur Identifikation eines Innenringschadens am beschädigten Wälzlager

Aus der Untersuchung geht hervor, dass weder die erste noch die zweite Ordnung mit einer signifikanten Amplitudenerhöhung der Beschleunigungsdaten zusammenfallen. Da dies auch entlang des weiteren Frequenzspektrums nicht der Fall ist, kann ein Innenringschaden ausgeschlossen werden.

Um aber etwaige weitere Beschädigungen sichtbar zu machen, wird eine Bandpassfilterung auf das Frequenzspektrum durchgeführt, siehe Abbildung 7.

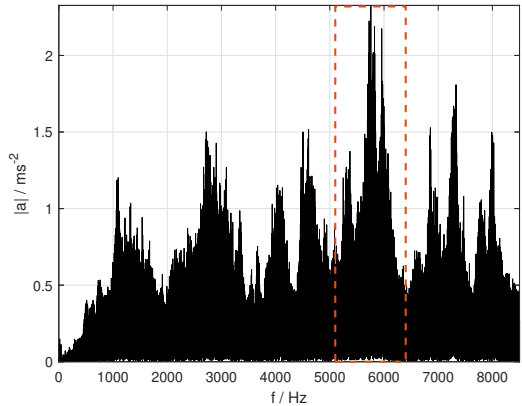


Abbildung 7: Frequenzspektrum der Messreihe bis 8500 Hz am beschädigten Lager und Markierung des Bereichs für den Bandpassfilter

Dabei wird der mit einem Rechteck umrahmte Bereich, welcher von 5100 Hz bis 6400 Hz reicht, für die Bandpassfilterung gewählt. Alle anderen Frequenzen werden aus dem Spektrum entfernt. Mit Hilfe des bandpassgefilterten Signals können keine neuen Schadmerkmale festgestellt werden. Lediglich der Käfigschaden wird erneut erfasst. Dies bestätigt die bereits erhaltenen Ergebnisse, und der sich am Wälzlager befindliche Käfigschaden kann verifiziert werden.

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Der umgesetzte Prüfstand zur Detektion von Wälzlagerschäden ist dazu in der Lage, die in den Anforderungen zusammengetragenen Auflagen gänzlich zu erfüllen und Schäden an Wälzlager zielsicher zu detektieren. Zusätzlich ist es möglich, die Anforderungen durch leichte Adaptionen des Spannsystems im Bezug auf die untersuchbaren Lagerdimensionen zu überschreiten. Ein limitierender Faktor ist hierbei die Drehzahl, mit welcher der Prüfstand betrieben werden kann. Die interne, drehzahlabhängige Motorkühlung reicht bei unterschreiten von 600 s^{-1} nicht

mehr aus, um ein Überhitzen des Motors zu verhindern. So können keine längeren Tests unterhalb dieser Drehzahl absolviert werden. Auf die Detektion von Lagerschäden hat dies aber wenig Einfluss, da Messreihen innerhalb weniger Minuten erstellt werden können. Künftige Arbeiten können sich mit der Absolvierung von Lebensdauertests mit Hilfe des Prüfstandes beschäftigen. Eine Überlastung der Prüflager durch eine axiale, sowie radiale Kraftkomponente kann für diesen Zweck in den Aufbau eingeleitet werden. Ebenfalls kann eine Erweiterung der zu untersuchenden Lagerarten vorgenommen werden. Dies kann durch eine Adaption der Klemmvorrichtung erreicht werden. Die vom Prüfstand generierten Messdaten können zusätzlich für die Entwicklung eines Algorithmus zur aktiven Zustandsüberwachung von Anlagen genutzt werden.

LITERATUR

- [1] SKF, *Bearing damage and failure analysis*, 2017.
- [2] —, *Service-Handbuch*, 2012.
- [3] H. Wittel, D. Jannasch, *Roloff/Matek Maschinenelemente - Normung, Berechnung, Gestaltung*, 2017.
- [4] Motovario, *Elektromotoren - Standard IEC*, 2021.