



Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

www.VDI-Mechatroniktagung.de

Schwingungsanalyse von instationären Wälzlagern in Continuous Motion Maschinen

Vibration analysis of unsteady bearings in Continuous Motion Machines

Manuel Bauer, Hochschule Aalen, Institut für Antriebstechnik, 73430 Aalen, Deutschland, manuel.bauer@hs-aalen.de
Fabian Wagner, Hochschule Aalen, Institut für Antriebstechnik, 73430 Aalen, Deutschland, fabian.wagner@hs-aalen.de
Markus Kley, Hochschule Aalen, Institut für Antriebstechnik, 73430 Aalen, Deutschland, markus.kley@hs-aalen.de

Kurzfassung

Die Zustandsüberwachung von Maschinen gewinnt in der heutigen Industrie zunehmend an Bedeutung. Insbesondere die Überwachung von Wälzlagern bietet die Möglichkeit, den fehlerfreien Maschinenbetrieb abzusichern und Wartungskosten zu senken. Im Zuge der vierten industriellen Revolution werden neue Techniken und Methoden entwickelt, um diese Ziele zu erreichen. Dieser Beitrag thematisiert die Zustandsüberwachung von instationären, also nicht ortsfesten Wälzlagern. Hierbei liegt der Fokus auf der Wälzlagerdiagnose mittels Schwingungsanalyse.

In der vorliegenden Publikation werden die Grundlagen der Schwingungsüberwachung von stationären Wälzlagern erläutert. Es wird ein Einblick in die Methoden und Theorien des Condition Monitoring von Wälzlagern gegeben und die zugrunde liegenden Intentionen und Zielsetzungen dargelegt. In einer theoretischen Betrachtung wird die geplante Methodik zur Schwingungsüberwachung instationärer Wälzlager beschrieben, sowie die zu erwartenden Signale und die damit einhergehenden Modifikationen in der Signalverarbeitung aufgezeigt.

Abstract

Condition monitoring of machines is becoming increasingly important in today's industry. In particular, the monitoring of bearings offers the opportunity to insure error free machine operation and reduce maintenance costs. In the course of the fourth industrial revolution, new techniques and methods to reach these goals are developed. This article describes the condition monitoring of non-steady bearings, focusing on bearing diagnosis via vibration analysis. In this publication the basics of vibration analysis of steady bearings is shown. An insight of the methods and theories of condition monitoring is given. The purposes and objectives of the condition monitoring of bearings are reasoned. In a theoretical consideration the planned methodology for vibration analysis of non-steady bearings is shown and the expected signals and the thereby attended modifications of signal processing are presented.

1 Einleitung

Wälzlager zählen zu den wichtigsten Maschinenelementen. Obwohl sie im Allgemeinen zuverlässige Bauteile sind, kann es bereits während der Nennlebensdauer der Lager zu Lagerschädigungen kommen. Dies ist insbesondere dann problematisch, wenn es bei Lagerausfällen zu Produktionsstopps, Maschinen- oder gar Personenschäden kommen kann. Um die Sicherheit und Produktionsfähigkeit von Maschinen und Anlagen zu gewährleisten, kommt, auch dank dem stetigen technischen Fortschritt im Rahmen der vierten industriellen Revolution, immer häufiger das Condition Monitoring, also die Zustandsüberwachung von Maschinen und Maschinenelementen, zum Einsatz.

In diesem geförderten Projekt (ZF4438002WM7) soll der Zustand von instationären, also nicht ortsfesten Wälzlagern überwacht werden. Es handelt sich hierbei um Lager, die im Laufe eines Prozesses nicht nur um die eigene Achse rotieren, sondern zudem ihre Position verändern. Die Zustandsüberwachung soll auf einer Schwingungsanalyse basieren. Dem zugrunde liegt die vergleichsweise einfache

technische Umsetzung einer Schwingungsüberwachung gegenüber beispielsweise der Analyse des Schmierstoffes, sowie die aus der Schwingungsüberwachung resultierende hohe Aussagefähigkeit der Daten wie auch die frühzeitige Detektierbarkeit von Lagerfehlern. Um die Vibrationen der Wälzlager zu erfassen, sollen Beschleunigungssensoren in, von instationären Lagern überrollte, stationäre Bauteile integriert werden. Lagerfehler werden im Sinne einer Wälzlagerdiagnose identifiziert.

Instationäre Wälzlager finden vor allem in sogenannten Continuous Motion Maschinen Anwendung. Der Aufbau einer Continuous Motion Maschine ist in Bild 1 dargestellt. Die Lager sind mit dem rotierenden Teil der Maschine verbunden und rollen auf den Kurvenbahnen ab. Es handelt sich dementsprechend um Lager mit rotierendem Außen- und stehendem Innenring. Im Laufe einer Anlagenrotation verändern die Lager ihre Position auf der Kurvenbahn. In diesen Maschinen haben im Besonderen die Sicherung der Produktion wie auch die zustandsabhängige Wartung eine große Bedeutung.

Da Continuous Motion Maschinen häufig im Dauerbetrieb produzieren, sind hier Maschinenausfälle mit hohen Kosten verbunden.

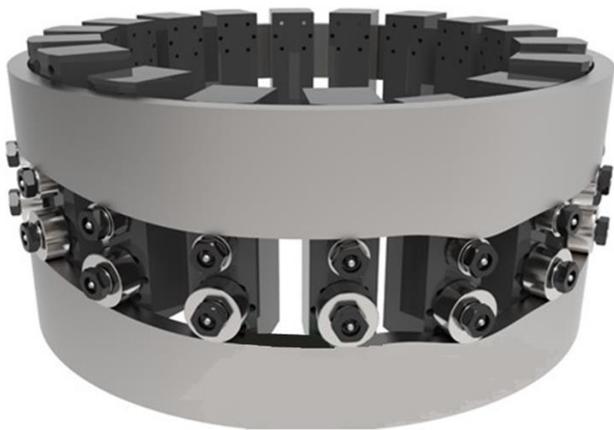


Bild 1: Aufbau einer Continuous Motion Maschine

Zudem sind Wartungsarbeiten nicht außerhalb des Maschinenbetriebs möglich und dementsprechend ebenfalls kostenintensiv. Durch die Absicherung der Produktion mittels Condition Monitoring wird die Ausfallwahrscheinlichkeit der Maschinen gesenkt. Die auf Basis der Zustandsüberwachung mögliche, zustandsabhängige Instandhaltungsmethode kann Wartungsarbeiten auf ein Minimum reduzieren. Durch das Detektieren geschädigter Wälzlager und deren gezielten Austausch kann gegenüber herkömmlichen Wartungsmethoden, in denen in regelmäßigen Intervallen alle Lager eines Maschinenabschnittes präventiv ersetzt werden, eine Kostenersparnis erzielt werden. Die Überwachung mehrerer Lager durch einen, in stehende Teile der Maschine integrierten Sensor führt ebenfalls zu einer Kostenersparnis bezüglich der Anschaffungskosten für das Condition Monitoring Equipment.

Zur Entwicklung der hier beschriebenen Methode des Condition Monitoring von instationären Wälzlagern wurde eine Continuous Motion Maschine aus der Industrie zur Orientierung herangezogen. Hierbei wird die Methode zur Überwachung von instationären Wälzlagern an die konventionelle Condition Monitoring Methoden angelehnt und entsprechend modifiziert.

2 Stand der Technik

Condition Monitoring respektive die Zustandsüberwachung von Maschinen beschreibt die Überwachung des Maschinenbetriebes mit dem Ziel der Detektion von kritischen Betriebszuständen [1].

Das Condition Monitoring ist ein sich stark im Wachstum befindlicher Technologiezweig. Die intelligente Vernetzung von Maschinen mit der Absicht der Effizienzsteigerung und Verschwendungsreduktion gewinnt in vielen Wirtschaftssektoren an Bedeutung. Zu erkennen ist das steigende Interesse an der Zustandsüberwachung anhand der Anzahl der zu diesem Thema veröffentlichten Patente pro Jahr.

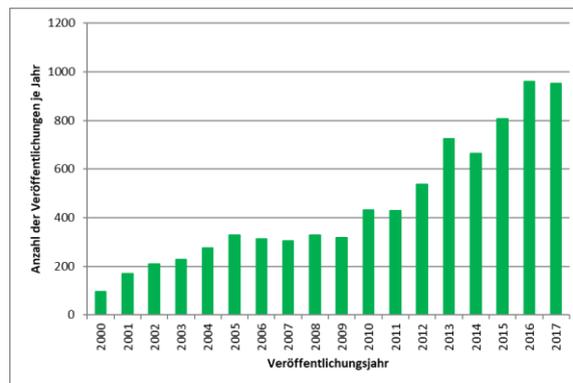


Bild 2: Anzahl von Veröffentlichungen zum Thema CM

In Bild 2 sind die aus einer Patentrecherche entnommenen Anzahlen der Patentveröffentlichungen zum Thema Condition Monitoring pro Jahr für den Zeitraum 2000 bis 2017 abgebildet. [2]

Zu Systemen und Methoden der Zustandsüberwachung stationärer Wälzlager lässt sich eine Vielzahl an Veröffentlichungen recherchieren. Dahingegen konnten explizit zur Schwingungsüberwachung von instationären Wälzlagern keine Ergebnisse gefunden werden. Hieraus wird die Folgerung gezogen, dass die Zustandsüberwachung von instationären Wälzlagern eine Anwendung des Condition Monitoring mit hohem Innovationspotential ist.

Condition Monitoring Systeme, im Weiteren auch als CM-Systeme bezeichnet, können sich in Bezug auf die spezifische Zielsetzung und die Dauer der Überwachung sowie auf die zu überwachenden Maschinenparameter unterscheiden. Hinsichtlich der Zielsetzungen wird zwischen verschiedenen Konzepten unterschieden, die in ihrer Leistungsfähigkeit variieren [1]. Das Condition Monitoring System kann eine reine Überwachungsaufgabe mit dem Ziel der Fehlererkennung und der Anzeige des Fehlers erfüllen, einer Fehlerfrüherkennung dienen oder durch die Implementierung von Trendanalysen eine Prognose zur erwartenden Restlaufzeit der Maschine vor Eintritt eines kritischen Fehlers stellen. Ersichtlich wird hier, dass der Aufwand der Integration eines CM-Systems abhängig von seiner geforderten Zielsetzung ist. [1]

Bezogen auf die Dauer der Anwendung eines CM-Systems wird zwischen permanenter und intermittierender Überwachung unterschieden. Permanente Überwachungssysteme sind fest installiert und werden kontinuierlich betrieben. Die Integration eines solchen Systems ist mit einem hohen Aufwand verbunden, aber zur Vermeidung fataler Fehler und zur Qualitätskontrolle ist sie aufgrund der kontinuierlichen Überwachung geeignet. Intermittierende Systeme bezeichnen nicht fest installierte Systeme, bei denen in regelmäßigen Abständen mit mobilen Messgeräten Messungen an der Maschine vorgenommen werden. Diese Systeme eignen sich vor allem zur Fehlerfrüherkennung und Fehlerdiagnose, da für diese Zielsetzungen regelmäßige intermittierende Messungen ausreichend sind und der Aufwand der Integration eines solchen CM-Systems verhältnismäßig gering ist. [1]

Prinzipiell können im Sinne des Condition Monitoring alle Maschinen- bzw. Bauteilparameter überwacht werden, die Rückschlüsse über den Maschinenzustand erlauben. Im Falle eines Wälzlagers lassen sich Schäden unter anderem anhand der Veränderung von Vibration, Akustik, Temperatur, Schmierstoffzustand und Rauchentwicklung des Lagers detektieren. Diese Schadensindikatoren treten, wie in Bild 3 dargestellt, in unterschiedlichem zeitlichen Abstand von Beginn der Schädigung bis zum Lagerausfall auf. Während bei Wälzlagern in der Regel erst Minuten vor einem Ausfall der Lagerung Rauchentwicklung zu erkennen ist, lassen sich die Bauteilschwingungen in der Regel schon Monate vor einem kritischen Defekt detektieren. Zudem unterscheiden sich die Analysen der Parameter in Aufwand sowie in der Aussagekraft der gewonnenen Daten. Hervorzuheben ist hier die Schwingungsanalyse, die bereits einige Monate vor einem kritischen Schaden aufschlussreiche Ergebnisse liefern kann. Zudem ist sie im Regelfall technisch gut umsetzbar. [3]

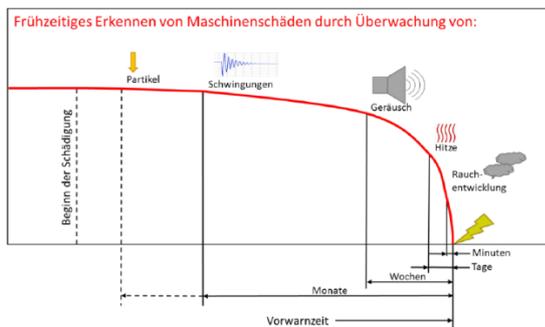


Bild 3: Schadensverlauf und Detektierbarkeit in Abhängigkeit der Zeit [4]

Die zu überwachenden Parameter müssen anhand der Zielsetzung des Condition Monitoring Systems wie auch der Realisierbarkeit im jeweiligen Anwendungsfall gewählt werden.

Dem Condition Monitoring liegen unabhängig von Art und spezifischer Zielsetzung in der Regel folgende generelle Absichten zugrunde:

- Schutz vor fatalen Schäden an Maschine, Umwelt oder Menschen
- Schutz vor unerwarteten Maschinenausfällen
- Zustandsabhängige Wartungsplanung
- Sicherung der Produktion
- Qualitätskontrolle [1]

Kritische Fehler in Maschinenkomponenten können sowohl die Maschine als auch den Bediener gefährden. Zudem kann es bei einigen Maschinen und Anlagen im Falle eines Maschinenschadens zu Umweltbelastungen kommen. Mithilfe des Condition Monitoring lassen sich kritische Fehler idealerweise schon vorab erkennen und so Maschinenschäden und unerwartete Maschinenausfälle vermeiden. Gerade bei Maschinen, die durchgehend produzieren, können solche Ausfälle hohe Kosten verursachen. Durch die Fehlerfrüherkennung können Maschinenausfälle jedoch reduziert oder ganz vermieden, und so die Produk-

tion zuverlässiger gestaltet werden. Da sich viele Bauteilfehler auf die Qualität des hergestellten Produktes auswirken, ist Condition Monitoring ebenfalls ein wichtiges Werkzeug für die Qualitätssicherung. Werden Fehler früh erkannt, kann man die betroffenen Maschinenteile austauschen, bevor eine signifikante Qualitätsminderung des Produktes eintritt.

Einen besonderen Vorteil in Bezug auf die Kostenersparnis bietet die zustandsabhängige Wartung. [1]

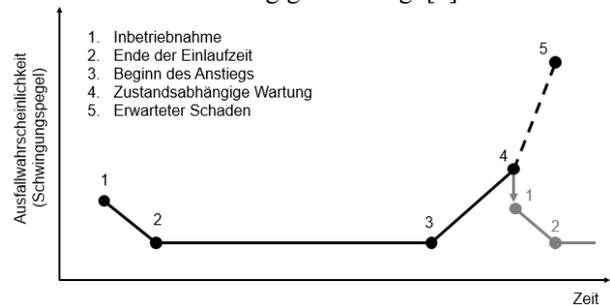


Bild 4: Typischer Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit einer Maschine während eines Wartungsintervalls (vgl. [1])

Wie aus Bild 4 ersichtlich wird, ist die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Maschine zeitabhängig. Hierbei basiert der dargestellte Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit auf Erfahrungswerten und hat nicht für jeden Maschinentyp Gültigkeit. Die auf Basis dieser Kurve getroffenen Aussagen bleiben davon jedoch unberührt. Bei Inbetriebnahme der Maschine besteht vorerst eine erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit, was sich mit Material- und Montagefehlern erklären lässt. Während des regulären Wartungsintervalls bleibt die Ausfallwahrscheinlichkeit relativ konstant, bis sie ab einer entsprechenden Betriebsdauer aufgrund von Materialermüdung und Verschleiß stark ansteigt. [1] In herkömmlichen Instandhaltungsmethoden muss die Wartung noch in den Bereich der niedrigen Ausfallwahrscheinlichkeit gelegt werden, dessen Ende in Bild 4 mit dem Punkt 3 dargestellt wird, um einen ausreichenden Sicherheitsabstand zum statistisch erwarteten Ausfallzeitpunkt zu haben. Hieraus ergeben sich konkrete finanzielle Nachteile aufgrund des aus technischer und wirtschaftlicher Sicht zu kurz angesetzten Wartungsintervalls. [1]

Da diese Betrachtungen hauptsächlich auf Erfahrungen und statistischen Berechnungen beruhen, kann das Wartungsintervall ebenfalls zu lang angesetzt werden, wodurch es zum Ausfall der Maschine kommt. [5]

Die zustandsabhängige Wartung, im englischen Predictive Maintenance, zielt darauf ab, das Wartungsintervall auf Basis der Zustandsüberwachung von Maschinen zu maximieren. Die durch das Condition Monitoring gesammelten Erkenntnisse, wie beispielsweise die verbleibende Betriebsdauer bis zum kritischen Maschinenzustand, werden auf die Instandhaltung übertragen, wodurch die Wartung auf einen technisch und wirtschaftlich sinnvollen Zeitpunkt gelegt werden kann, wie in Bild 4 durch Punkt 4 dargestellt. So lassen sich die Wartungskosten minimieren. Da die zustandsabhängige Wartung auf konkreten Messdaten und nicht nur auf statistischen Abschätzungen beruht, wird

hierbei eine höhere Sicherheit für das geplante Wartungsintervall erreicht. Voraussetzung hierfür ist ein CM-System, das zur Fehlerfrühdiagnose und der Erstellung von Trendanalysen geeignet ist. [1, 5]

Wie bereits ausgeführt wurde, stellt die Analyse von Lagerschwingungen eine geeignete Methode zur Zustandsüberwachung von Wälzlagern dar. Im Folgenden werden deshalb deren Theorie wie auch eine gängige Vorgehensweise dieser Zustandsüberwachungsmethode vorgestellt. Diese Vorgehensweise wird auch im Rahmen dieses Projekts für die Analyse stationärer Signale angewendet.

Die Schwingungsüberwachung von Wälzlagern basiert auf dem Phänomen, dass durch wälzlagerinduzierte oder wälzlagerfremde Einflüsse Körperschall im Lager angeregt wird. Im Besonderen entstehen Lagerschwingungen bei Überrollung von geometrischen Abweichungen im Lager selbst oder durch äußere Anregungen. Durch Abweichung der Schwingungssignale des Lagers zwischen beschädigtem und unbeschädigten Zustand lassen sich Schädigungen im Lager detektieren. Hierfür ist es dementsprechend notwendig, Daten des zu untersuchenden Lagers oder von Lagern des gleichen Typs im unbeschädigten Zustand und in Abhängigkeit des Betriebszustandes zu erfassen. Idealerweise liegen ebenfalls Daten über einen charakteristischen Schädigungsverlauf im Betriebsfall vor, sodass durch einen Vergleich detaillierte Aussagen zum Grad der Lagerschädigung getroffen werden können. Zur Datenerfassung in der Schwingungsanalyse eignen sich Beschleunigungssensoren, die in geeigneter Position zum überwachten Lager in die Anlage integriert werden müssen. Unter Einsatz eines Beschleunigungssensors erhält man dementsprechend ein Beschleunigungs-Zeit-Signal der Schwingungsamplitude des Lagers. Im Weiteren wird das Signal digitalisiert, um anschließend analysiert werden zu können. Je nach Anwendung und Auswertung der Daten kann eine weitere Signalverarbeitung angezeigt sein. Als Beispiel ließe sich hier eine Filterung des Signales anführen. Zur Auswertung des Signals stehen je nach Zielsetzung der Zustandsüberwachung verschiedene Methoden zur Verfügung, die unterschiedlich detaillierte Aussagen über den Lagerzustand ermöglichen. Vor allem die Überrollimpulse und deren charakteristische Frequenzen lassen detailliertere Aussagen zu. Durch die Überrollimpulse wird das Lager in seiner Eigenfrequenz angeregt, wobei die Amplitude des Impulses und somit die Amplitude der Lagerschwingung neben anderen Einflussfaktoren wie der Drehzahl des Lagers und der Lagerlast auch von der Ausprägung des Schadens abhängig ist. Eine generelle Erhöhung der Schwingungsamplituden lässt bei Kenntnis der Lager-Betriebsparameter somit unter Verwendung diverser Analysemethoden auf den Zustand des Lagers schließen. Hierbei geben die für diverse Schädigungen am Lager charakteristischen und von Betriebszustand und Lagergeometrie abhängigen Frequenzen der Überrollimpulse detaillierten Aufschluss über die Lokalisation und die Art des Schadens. [3]

Diese Schadfrequenzen lassen sich mit folgenden Formeln für die Überrollfrequenz beispielhaft für den Außen- und Innenring berechnen [6]:

$$f_a = \frac{1}{2} \cdot f_n \cdot Z \left(1 - \frac{D_w}{D_{pw}} \cdot \cos \alpha \right) \quad (1)$$

$$f_i = \frac{1}{2} \cdot f_n \cdot Z \left(1 + \frac{D_w}{D_{pw}} \cdot \cos \alpha \right) \quad (2)$$

In den Gleichungen bezeichnet f_n die Relativfrequenz von Innen- und Außenring. Weiterhin bedeuten Z die Anzahl der Wälzkörper, D_w den Wälzkörperdurchmesser und D_{pw} den Teilkreisdurchmesser der Wälzkörper in mm und α den Druckwinkel in Grad. Während im Amplituden-Zeit-Signal des überwachten Lagers Einflüsse wie Unwuchten detektiert werden können, ist für die Betrachtung der Schadfrequenzen eine Signalmodulation nötig. Es wird hier eine Fast-Fourier-Transformation zur Generierung eines Amplituden-Frequenzspektrums eingesetzt. Weiter wird eine Hüllkurve über das Zeitsignal gelegt. Sowohl aus dem Amplituden-Zeit-Signal als auch aus der Einhüllenden werden Frequenzspektren abgeleitet. Das Hüllkurvenspektrum vereinfacht die Detektion einer Amplitudenerhöhung der zugehörigen Schadfrequenzen oder deren harmonischen Vielfachen. Aufgrund von Lagerschlupf können diese Frequenzen geringfügig abweichen, weswegen jeweils eher Frequenzbereiche für die zugehörigen Lagerschädigungen als konkrete Einzelfrequenzen zu betrachten sind.

Weiterhin lassen sich durch die Definition und Überwachung diverser Kennzahlen des Schwingbilds Aussagen über den Lagerzustand treffen. Insbesondere eine Verschlechterung des Lagerzustandes lässt sich aus solchen Kennzahlen ableiten. Die kontinuierliche Überwachung dieser Kennzahlen bietet den Vorteil, vor allem bei Systemen mit einer hohen Anzahl an zu überwachenden Lagern, die rechenintensive Bildung der Frequenzspektren nur bei einer im Amplituden-Zeit-Signal detektierten Verschlechterung des Lagerschwingbildes durchzuführen, um falls notwendig eine genauere Identifikation der vorliegenden Schädigung zu erzielen.

Betrachtet werden hier die Veränderung des Effektivwertes der Schwingung, auch Root Mean Square oder abgekürzt RMS, sowie des Crestfaktors. [7]

Der RMS (q) ist ein Maß für den Gesamtschwingungspegel des Lagers und berechnet sich mit folgender Formel:

$$q = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_n^2)} \quad (3)$$

In Formel 3 bezeichnet n die Anzahl der Messpunkte und a_1 bis a_n die zugehörigen Amplitudenwerte.

Der Crestfaktor (S) bildet das Verhältnis des Spitzenwertes der Amplitude der Schwingung zum RMS ab.

$$S = \frac{|A|_{max}}{q} \quad (4)$$

In Formel 4 steht A für die maximale Amplitude. Steigt der RMS, impliziert dies eine Steigung der Amplituden der Lagerschwingung, welche durch eine Schädigung am Lager verursacht werden kann. Da ein diskreter Defekt jedoch nicht zwangsweise eine detektierbare Gesamtamplitudenerhöhung verursacht, ist die alleinige Betrachtung des RMS

nicht ausreichend für eine vollständige Schwingungsanalyse. Dahingegen erhöht sich das Verhältnis von Spitzenwert der Schwingungsamplitude zu RMS bei Vorliegen einer diskreten Schädigung. Kombiniert ergeben beide Kennwerte einen Indikator für vorliegende Lagerschädigungen.

3 Theoretische Betrachtung

Im Vorfeld der experimentellen Untersuchung wurde eine theoretische Betrachtung der Merkmale einer instationären Schwingungsanalyse von Wälzlagern und deren Unterschiede zur herkömmlichen, stationären Schwingungsanalyse durchgeführt. Diese Betrachtung basiert auf einem realen Anwendungsbeispiel für die instationäre Schwingungsüberwachung. Das Messsystem basiert auf einem in die Kurvenbahn der Anlage integrierten piezoelektrischen Beschleunigungssensor. Aufgrund der Relativbewegung der Lager in der betrachteten Anlage besteht keine Möglichkeit, einen Sensor mit kabelbasierter Datenübertragung direkt am Lager zu positionieren. Eine telemetrische Datenübertragung erfordert pro überwachtem Lager einen Sensor mit Übertragungseinheit, und ist somit aufgrund der damit verbundenen hohen Systemanschaffungskosten unwirtschaftlich. Zudem ist die Störanfälligkeit eines solchen Systems gegenüber einem stationär verbauten Beschleunigungssensor erhöht. In dieser theoretischen Vorstudie wurde das zu erwartende Schwingbild für instationäre Lager des hier verwendeten Typs qualitativ untersucht. Hierfür wurde ein theoretischer Versuchsaufbau definiert, der sich unter Vernachlässigung diverser Einflussfaktoren am Anwendungsbeispiel orientiert. Berücksichtigt wurde hierbei ebenfalls der im Anwendungsbeispiel eingesetzte Lagertyp, ein zweireihiges Zylinderrollenlager und dessen Geometrie. Es wird ein theoretisches einachsiges Beschleunigungssignal untersucht. Um den Einfluss von Maschinenschwingungen sowie anderer Lager auf das Schwingverhalten des gerade zu analysierenden Wälzlagers auszuschließen, wird eine theoretische Messzone in der Kurvenbahn, auf welcher die Lager abrollen, definiert. Diese Messzone ist gegenüber der restlichen Kurvenbahn ideal isoliert und es ist ein Beschleunigungssensor angebracht. Es befindet sich jeweils nur ein Wälzlager zeitgleich auf der theoretischen Messzone. Die Lager selbst sind ebenfalls gegen den Rest der Maschine an den Aufhängepunkten ideal isoliert.

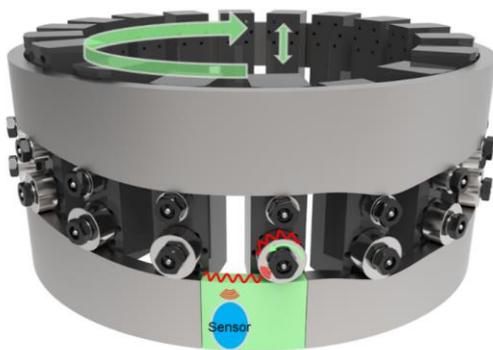


Bild 5: Prinzipdarstellung der Signalübertragung und -detektion.

In Bild 5 ist der theoretische Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Der Beschleunigungssensor (blau) detektiert ausschließlich die Vibrationen, die vom betrachteten Lager ausgehen (rot), während die Vibrationen der anderen Wälzlager durch die Isolierung nicht in die Messzone vordringen. Des Weiteren wird der Einfluss des Schlupfes und der wirkenden Trägheitsmomente auf das Lager vernachlässigt. Die Drehzahl der Lager in der Messzone wird als konstant und die Lager als unwuchtfrei angenommen. Es wird eine theoretische Lagerlastzone von 180° definiert.

Aus einer Maschinenanalyse der Beispielanlage wurde der zu erwartende Betriebszustand der Lager, insbesondere Drehzahl und Lagerlast, abgeleitet.

Aus den Formeln für die Überrollfrequenzen und dem theoretischen Versuchsaufbau ergeben sich somit die vereinfachten theoretischen Schwingbilder für angenommene Lagerschädigungen. Untersucht wird hier das Schwingbild für ein Lager mit theoretischem Innenringschaden in der Lagerlastzone, wobei das Signal qualitativ und nicht quantitativ betrachtet wird.

Durch den instationären Charakter der Wälzlager ergeben sich somit in der Theorie signifikante Unterschiede in Bezug auf die Schwingungsanalyse, sowohl im Schwingungssignal des Lagers als auch in der Verarbeitung und Auswertung der Daten.

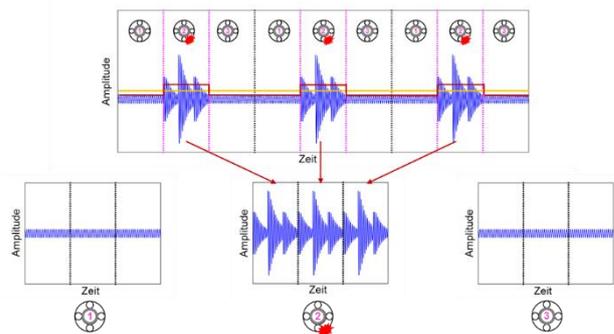


Bild 6: Signalmodifikation zur Verarbeitung instationärer Signale

In Bild 6 sollen diese Unterschiede prinzipiell verdeutlicht werden. Das gemessene Amplituden-Zeit-Signal ist für drei Lager auf der Kurvenbahn dargestellt, wobei eines der Lager einen theoretischen Innenringschaden aufweist. Signifikant ist die durch den Aufbau des Messsystems entstehende Trennung der einem spezifischen Lager zugehörigen Signale. Pro Umdrehung der Anlage wird je Lager eine Signaldauer entsprechend der Dauer der Messzonenüberrollung aufgenommen. Die durch die Anlagengeometrie bedingte Länge der Messstrecke ist durch die Anzahl der Überrollungen eines Lagers je Messzonenüberquerung definiert. In Abhängigkeit der Überrollungsanzahl und dem Lagerwinkel bei Eintritt in die Messzone, wie auch der Schadensart und Schadenslokalisierung im Lager, kann die gemessene Anzahl der Schadens-Überrollimpulse je Messzonenüberrollung variieren. Um die hieraus bedingten Abweichungen zu minimieren, ist es notwendig, eine ausreichende zeitliche Länge des Lagersignals auszuwerten.

Hierfür wird, wie in Bild 6 dargestellt, das gemessene Signal aufgeteilt und den einzelnen Lagern zugeordnet. Durch eine geeignete Fensterung in den Abschnitten kann so ein lagerspezifisches Amplituden-Zeit Signal für jedes Lager der Anlage generiert und im weiteren Verlauf analysiert werden.

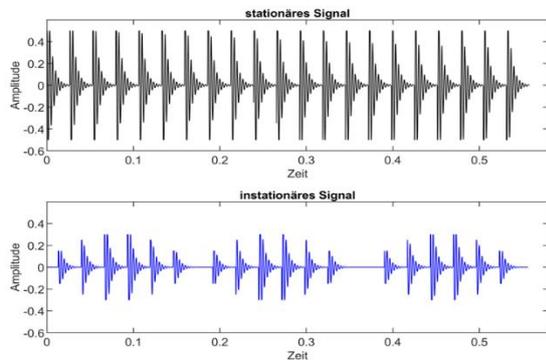


Bild 7: Vergleich eines stationären mit einem instationären Lager-signal

In Bild 7 ist dem theoretischen stationären Signal (schwarz) eines Lagers das erwartete instationäre Amplituden-Zeit-Signal (blau) des gleichen Typs, das sich in der Theorie aus der oben genannten Vorgehensweise ergibt, qualitativ gegenübergestellt.

Aufgrund des drehenden Außenrings und des stehenden Innenrings des Lagers im theoretischen Versuchsaufbau bleibt der, durch einen theoretischen Innenringschaden verursachte Überrollimpuls in beiden Fällen konstant. Es wird hier dargestellt, dass die gesamte Amplitude des gemessenen Signals aufgrund der indirekten Messung durch die Kurvenbahn gegenüber einem stationären Signal verringert ist. Da sich das Lager relativ zum ortsfesten Beschleunigungssensor bewegt und somit die Distanz zu diesem mit der Zeit variiert, ist eine positionsabhängige Amplitudenschwankung zu erwarten. Ist die Messzone kleiner als die durch die Lageranzahl und Anlagengeometrie bedingte maximale Länge, so ergeben sich Unterbrechungen zwischen den Lagern und somit auch zwischen den einzelnen Messabschnitten eines Lagers. Die Länge dieser Unterbrechungen ist ebenfalls aufgrund des jeweiligen Eintrittswinkels des Lagers in die Messzone variierend. Hieraus ergibt sich eine Abweichung der Schadfrequenzen im Frequenzspektrum.

Die Amplitudenänderung im instationären Signal kann ohne zusätzliche Maßnahmen berücksichtigt werden, wodurch eine Identifizierung einer generellen Lagerschädigung über die Erhöhung der mittleren Amplitude beziehungsweise des RMS möglich ist.

Dem gegenüber ist die Abweichung der Frequenzen aufgrund der Aneinanderkettung der Lagersignale und der zugehörigen Fensterung wie auch der Messunterbrechungen im Mittel zu identifizieren und zu kompensieren, um eine korrekte Aussage über die Art und Lokalisation des Schadens treffen zu können.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag stellt die theoretischen Grundlagen der Schwingungsüberwachung instationärer Lager in Continuous Motion Maschinen dar. Ziel ist es, die Methoden des Condition Monitoring kostengünstig und effizient auf dieses Anwendungsgebiet zu erweitern. Hierbei ergeben sich für die untersuchten Maschinen aufgrund der hohen Anzahl verbauter Lager und den Betriebszeiten besondere Vorteile aus einer zuverlässigen Lagerzustandsüberwachung. Im weiteren Verlauf des Projektes sind Versuche an einem nach den Ausführungen in Kapitel 3 entwickelten Prüfstand vorgesehen. Im Vorfeld dieser Versuche wurden die hier verwendeten Lager auf einem Prüfstand im stationären Betrieb mit angetriebenem Außenring untersucht. Hierbei ließen sich die in diesem Beitrag erläuterten Condition Monitoring Methoden verifizieren. Ein folgender Vergleich der stationären und instationären Versuche der Lager soll die hier beschriebenen Unterschiede der Schwingungssignale sowie die hier vorgestellte Methode der Signalverarbeitung instationärer Schwingungssignale belegen. Ausführliche Versuchsreihen aufbauend auf Lagern mit unterschiedlicher Schädigungen sollen die Anwendbarkeit der Condition Monitoring Methoden auf instationäre Wälzlager belegen und eine Modifikation dieser Methoden zur zielgerichteten Anwendung ermöglichen.

5 Literatur

- [1] Kolerus, J. u. Wassermann, J.: *Zustandsüberwachung von Maschinen*. Das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker. Edition expertsoft, Bd. 79. Renningen: expert verlag 2017
- [2] Deutsches Patent- und Markenamt: DEPATISnet, o.J. <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=experte>, abgerufen am: 29.06.2018
- [3] Schaeffler Technologies AG & Co. KG: *Wälzlagerpraxis. Handbuch zur Gestaltung und Berechnung von Wälzlagerungen*. Antriebstechnik. Mainz: Vereinigte Fachverl. 2015
- [4] Manuel Bauer, Markus Kley u. Marco Thomisch: *Smarte Leichtbaulagerung durch innovative Sensorintegration und intelligente Algorithmen*. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017. Stuttgart 2017, S. 10
- [5] Mobley, R. K.: *An introduction to predictive maintenance*. Amsterdam, New York: Butterworth-Heinemann 2002
- [6] Schlecht, B.: *Maschinenelemente 2. Getriebe, Verzahnungen und Lagerungen*. Ing. Hallbergmoos: Pearson Studium 2017
- [7] VDI 3832; April 2013. *Körperschallmessungen zur Körperschallmessung zur Zustandsbeurteilung von Wälzlagern in Maschinen und Anlagen*