

Xiaodong Cao*, Bramila Tarigan, Christian Rembe und Hubert Schwarze

Schadenserkennung an Wälzlagern

Damage identification at rolling contact bearings

DOI 10.1515/teme-2017-0029

Zusammenfassung: White Etching Cracks (WECs) und White Etching Areas (WEAs) sind Schadensbilder, die oftmals in Wälzlagern (z. B. in Windkraftanlagen) auftreten (siehe Abb. 1). Es fehlt bisher eine Möglichkeit, WECs und WEAs in Wälzlagern frühzeitig zu detektieren, d. h. möglichst lange bevor die Oberflächenschädigung auftritt. In diesem Beitrag wird das Schwingungsverhalten des Innenrings eines Wälzlagers (Abb. 2) im beschädigten Zustand (mit WEAs und WECs) und im Neuzustand miteinander verglichen, um eine erste Aussage über das Potenzial der vibrationsbasierenden Messmethode zur Detektion der Ausbildung von WECs und WEAs zu treffen. Mit Hilfe von einem eigenentwickelten roboter-gesteuerten Vibrometer-Messsystem werden die Oberflächenschwingen beider Lagerzustände erfasst und miteinander verglichen. Für den Vergleich werden Kohärenzfunktion, Frequency-Response-Assurance-Criterion (FRAC) und Cross-Signature-Assurance-Criterion (CSAC) als Kriterien verwendet. Es wird gezeigt, dass durch die Kombination dieser drei Kriterien eine Detektion von WECs und WEAs in Wälzlagern möglich ist. Die flächenhafte Messung ist dabei notwendig und sollte, wenn möglich, mit mehreren Kanälen parallel durchgeführt werden.

Schlüsselwörter: Schadenserkennung, Online-Monitoring, White-Etching-Crack, White-Etching-Areas, FRAC, CSAC.

Abstract: White Etching Cracks (WECs) and White Etching Areas (WEAs) are failure modes, which appear prevalently in rolling contact bearings. There is still a lack of methods to identify such failure modes before the visible crack appears on the bearing surface as early as

possible. In this article the measured operational deflection shapes (ODS) from a rolling contact bearing with and without WECs and WEAs are compared. The measurement was obtained by using our vibrometer system, which is mounted on a robot. The measured ODS's are compared by using the ordinary coherence, Frequency Response Assurance Criterion (FRAC) and Cross Signature Assurance Criterion (CSAC) for checking their correlation. The results show that the ODS's from the bearing with and without WECs and WEAs are not correlated in the hole frequency spectrum. Therefore monitoring the ODS's of the bearing by using the three comparing criterions seems to be feasible to detect the existence of WECs or WEAs in bearings. Online measuring ODS's require surface vibration measurements which should be realized by simultaneous measurement techniques with multiple channels.

Keywords: Failure mode, online monitoring, White Etching Crack, White Etching Areas, Frequency Response Assurance Criterion, Cross Signature Assurance Criterion.

1 Einleitung

In Wälzlagern treten häufig Schäden auf, die durch Entstehung von White Etching Cracks (WECs) und White Etching Areas (WEAs) verursacht werden (Abb. 1). WECs sind spezielle Rissnetzwerke, die sich zunächst unterhalb der Lageroberfläche ausbilden und dann bis an die Oberfläche fortschreiten. WEAs sind weiße Flächen, die aus feinkörnigem, kohlenstoffübersättigtem Ferrit oder kubischem Martensit bestehen [4]. Mit Hilfe des ITR-Wälzlagerprüfstandes können WECs und WEAs reproduzierbar in Wälzlagern erzeugt werden, wobei aber auch immer zusätzlich Oberflächenschäden auftreten.

Bisher fehlt noch eine Möglichkeit, WECs und WEAs so frühzeitig zu detektieren, dass noch keine Oberflächenschäden aufgetreten sind. Dies liegt daran, dass eine Erkennung von WECs und WEAs kurz nach dem Entstehen, mit den üblichen Beschleunigungszeitsignalen nicht aufgelöst werden kann. Für die Ursachenforschung der Ausbildung von WECs und WEAs ist es aber notwendig, die Rissbildung in einem sehr frühen Stadium zu erfassen. Das

*Korrespondenzautor: Xiaodong Cao, Institut für Elektrische Informationstechnik TU Clausthal, Leibnizstraße 28, 38768 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland, E-Mail: cao@iei.tu-clausthal.de
Bramila Tarigan, Hubert Schwarze, Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen TU Clausthal, Leibnizstraße 32, 38768 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland, E-Mail: tarigan@itr.tu-clausthal.de, schwarze@itr.tu-clausthal.de
Christian Rembe, Institut für Elektrische Informationstechnik TU Clausthal, Leibnizstraße 28, 38768 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland, E-Mail: rembe@iei.tu-clausthal.de

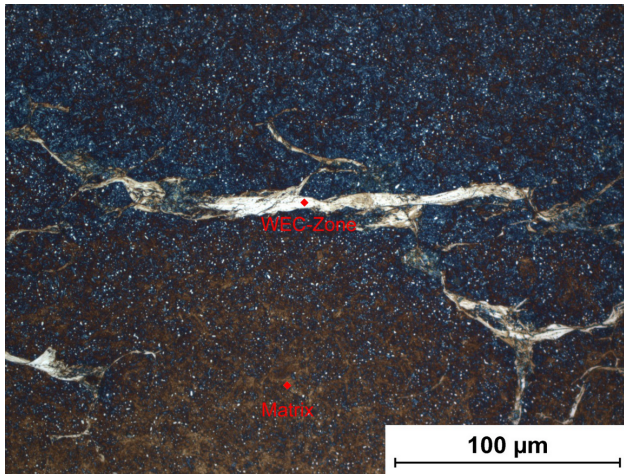


Abb. 1: Gefügebild mit WECs.

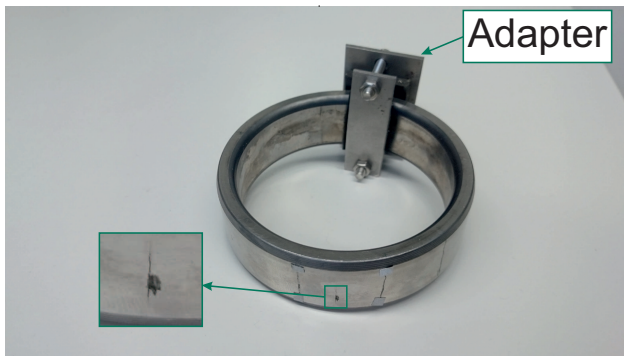


Abb. 2: Innenring eines Wälzlagers mit Schaden.

Verständnis der Entstehung von WECs und WEAs ist notwendig, um ein Prüfverfahren zu erarbeiten, mit dem Risse vor Oberflächenschädigungen erkannt werden können. Risse auf der Lageroberfläche führen schnell zu einer Zerstörung des Lagers. Im WEA-Gebiet ist das Material 30 % bis 50 % härter als das umgebende intakte Material [4], so dass das Schwingungsverhalten (z. B. Lage der Eigenfrequenzen) des Systems beeinflusst wird. Daraus ergibt sich somit ein messtechnischer Zugang zur zerstörungsfreien Detektion von Rissen [3]. In diesem Beitrag werden Schwingungsmessungen an dem Innenring eines Wälzlagers (Abb. 2) im beschädigten und unbeschädigten Zustand durchgeführt. Die Messergebnisse werden miteinander verglichen, um eine erste Aussage über das Potenzial der vibrationsbasierenden Messmethode zur Detektion der Entstehung von WECs und WEAs zu treffen.

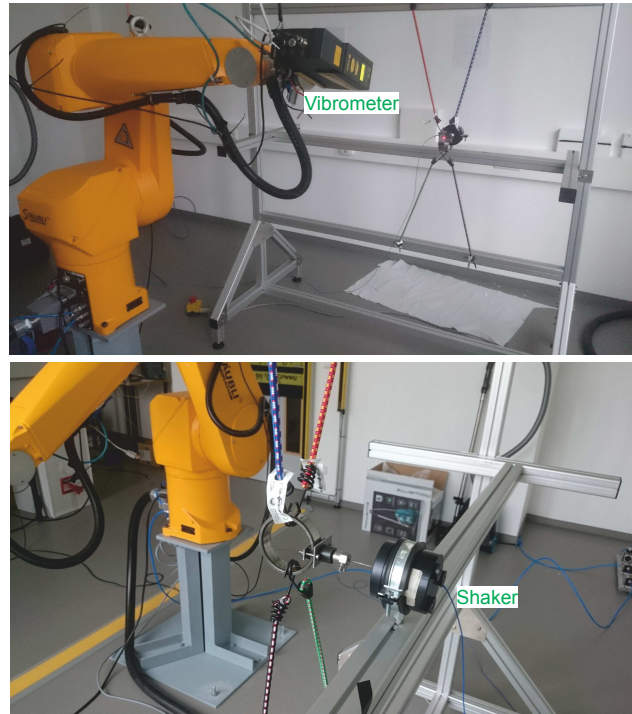


Abb. 3: Messaufbau.

2 Messaufbau

Die zu untersuchenden Lagerringe werden durch eine weiche Aufhängungen möglichst gut von ihrer Umgebung entkoppelt, damit ein Erreger die Resonanzen des Lagers ungestört anregen kann. Für die Schwingungsmessungen kommt ein eigenentwickeltes robotergesteuertes Vibrometer-Messsystem zum Einsatz [8]. Das Messsystem besteht wesentlich aus einem 6-Achs-Industrieroboter RX90L der Firma Stäubli und einem 1D-Laser-Doppler-Vibrometer (1D-LDV) PDV 100 der Firma Polytec (Abb. 3 oben). Diese Kombination ermöglicht eine Oberflächenschwingungsmessung bei reproduzierbaren Schwingungen durch das Abrastern mehrerer Messpunkte nacheinander und kann für Strukturen mit gekrümmten Oberflächen besonders von Vorteil sein, weil das LDV mit Hilfe des Roboterarms für jeden Messpunkt aus der optimalen Messposition messen kann. Für die hier durchgeführten Messungen befinden sich die Messpositionen wegen der Rotationssymmetrie des Lagerrings immer radial zur Rotationsachse. Insgesamt werden 52 Messpunkten (13 Punkte in Umfangsrichtung und 4 Punkte in axiale Richtung, gleichmäßig verteilt auf $\frac{1}{6}$ der Lageroberfläche) erfasst, um zusätzlich zu den Eigenfrequenzen noch die zugehörigen Schwingformen mit zu ermitteln. Die Schwingformen werden zur Detektion von WECs und WEAs ausgewertet. Ein Mini-Shaker von der

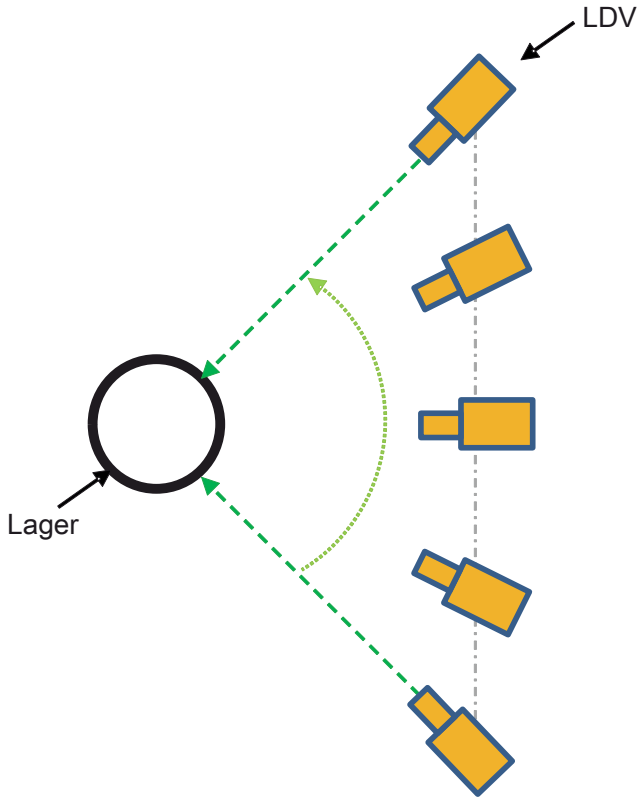


Abb. 4: Messablauf.

Firma Brüel&Kjær (Type 4810) wird als Anregungsquelle verwendet (Abb. 3 unten). Er ist durch seine kompakte Bauweise gut für Vibrationsmessung an kleinen Messobjekten geeignet. Damit die Lauffläche des Lagerrings von der Shaker-Anregung verschont bleibt, wird ein Adapter auf die Lauffläche angebracht. Der Adapter besteht aus zwei Blechen mit harten Gummis auf der Innenseite. Befestigt wird der Adapter durch zwei fest angezogene Schrauben (Abb. 2). Zur Aufbringung der Anregung befindet sich ein Magnet zwischen dem Shaker-Kopf und der Außenseite des Adapters. Der Lagerring wird so positioniert, dass der Schadensbereich sich ungefähr in der Mitte des Messgitters befindet, wobei an der Rückseite mit einem Chirp-Signal periodisch angeregt wird. In Abb. 5 sind die verwendeten Chirp-Signalspektren von allen Messpunkten dargestellt (beschädigter Lagerring in Schwarz und unbeschädigter in Grau). Im betrachteten Frequenzbereich (zwischen 1 kHz und 8 kHz) sind die Amplituden des Chirp-Signals nahezu konstant. Da die Schwingungen reproduzierbar sind, können die Messdaten durch das Abtastern erfasst werden. Um die Spektren der Messdaten zu ermitteln, werden die gemessenen Zeitsignale zunächst im Zeitbereich mit einer Rechteckfensterung bearbeitet. In Abb. 6 ist die Zeitsignal am Messpunkt 2 des beschädigten Lagers als Beispiel dargestellt. Nur das Signal innerhalb

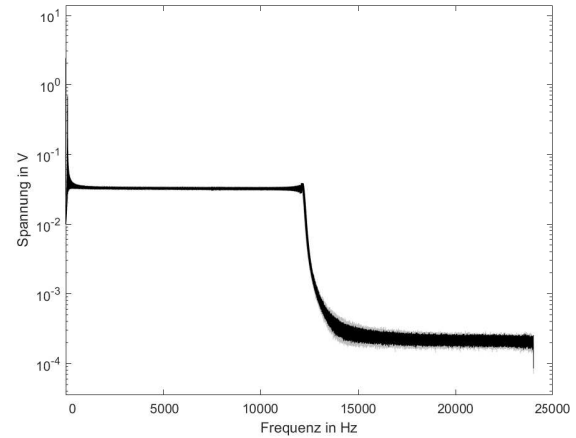


Abb. 5: Spektrum des verwendeten Chirp-Signals.

des rot markierten Rechtecks wird für die Auswertung verwendet, um die Einflüsse durch Einschwingvorgang (links von der Markierung) und Leck-Effekt (Leakage) rechts von der Markierung) zu vermeiden, welche durch Roboterbewegung und Einschränkungen der Messsoftware verursacht werden und nur mit hohem Aufwand direkt während der Messung zu beseitigen sind. Die Periodendauer des Geschwindigkeitssignals und des Anregungssignals sind gleich. Letztere lässt sich bei der Definition des Chirp-Signals genau bestimmen. Somit sind die für Auswertung verwendeten Messsignale immer n -fache Perioden lang und frei von Leakage.

Für die Darstellung und den Vergleich einzelner Messpunkte werden zusätzlich noch die Übertragungsfunktionen zwischen Geschwindigkeitsspektren und Anregungssignal mit der $H_{1,2}$ -Schätzungsmethode nach

$$\underline{H_1}(f) = \frac{\sum_{i=1}^N \underline{F_i^*}(f) \underline{X_i}(f)}{\sum_{i=1}^N \underline{F_i^*}(f) \underline{F_i}(f)} \quad (1)$$

$$\underline{H_2}(f) = \frac{\sum_{i=1}^N \underline{X_i^*}(f) \underline{X_i}(f)}{\sum_{i=1}^N \underline{X_i^*}(f) \underline{F_i}(f)} \quad (2)$$

ermittelt [5]. Dabei sind F das Eingangssignal (Anregungssignal) und X das Ausgangssignal (Geschwindigkeitssignal). Komplexe Größen werden durch den Unterstrich gekennzeichnet. Das hochgestellte Sternchen steht für komplexe Konjugation. Der laufende Index i beschreibt die Periodennummer und N ist die Anzahl der Perioden. Alle Größen H_1 , H_2 , F und X sind von der Frequenz f abhängig. Im Gegensatz zu weiteren Schätzungsmethoden wird die H_1 -Schätzung nur durch den Fehler des Anregungssignals beeinflusst, weil die Kreuzleistungsspektren unkorrelierter Größen durch hinreichend große Mittelungszahlen (in diesem Fall Periodenanzahl der Messungen

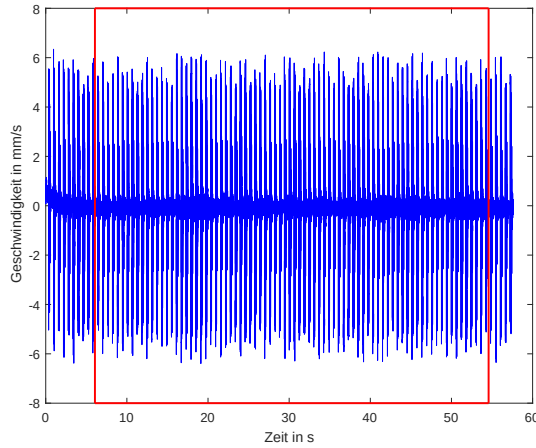
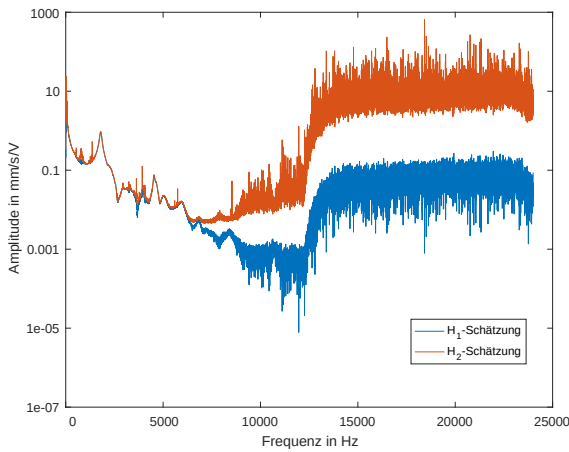


Abb. 6: Datenauswahl für die Auswertung (Beispiel).

Abb. 7: H_1 - vs. H_2 -Schätzung am Messpunkt 1.

n) gegen Null streben. n liegt zwischen 30 und 80. Das Anregungssignal wird direkt aus dem Signalgenerator aufgenommen und wird daher als nahezu fehlerfrei angenommen. Die H_1 -Schätzung kann daher in diesem Fall das beste Ergebnis liefern. In Abb. 7 sind die nach H_1 - und H_2 -Schätzung ermittelten Übertragungsfunktionen am Messpunkt 1 des beschädigten Lagers aufeinander als Beispiel dargestellt. Man sieht, dass die H_1 -Schätzung insbesondere im oberen Frequenzbereich ein besseres Ergebnis als die H_2 -Schätzung zeigt.

Um die Eigenfrequenzen und die zugehörigen Schwingformen zu ermitteln und miteinander zu vergleichen, soll zunächst die Qualität aller Übertragungsfunktionen überprüft werden, weil die Signalqualität der einzelnen Messpunkte selbst mit sorgfältiger Messdurchführung in der Regel nicht einheitlich sein kann. Messpunkte mit schlech-

ter Signalqualität können Schwingformen verfälschen und sollen vor der Darstellung berücksichtigt werden.

Zur Beurteilung der Qualität der gemessenen Übertragungsfunktion wird oft die Kohärenzfunktion γ^2 herangezogen [5]. Sie ist definiert durch

$$\gamma^2(f) = \frac{H_1(f)}{H_2(f)} = \frac{G_{FX}(f)G_{XF}(f)}{G_{FF}(f)G_{XX}(f)}. \quad (3)$$

G steht hier für das gemittelte einseitige Leistungsspektrum aus zwei Signalen, welche durch die beiden Indizes beschrieben werden. Sind die Indizes gleich ($G_{FF}(f)$ und $G_{XX}(f)$), dann ist G das Autoleistungsspektrum, ansonsten ($G_{FX}(f)$ und $G_{XF}(f)$) das Kreuzleistungsspektrum. Die Kohärenzfunktion beschreibt die lineare Abhängigkeit zwischen Anregungs- und Antwortsignal. Da bei idealen Signalen die H_1 - und H_2 -Schätzung das gleiche Ergebnis erzielen, beträgt der maximale (beste) Wert der Kohärenzfunktion 1. Der Wert Null wird erreicht, wenn die beiden Signale unkorreliert sind.

Zum Vergleich der Schwingformen werden einige Kriterien in Anlehnung an Modal-Testing eingesetzt [2]. Diese Kriterien werden häufig verwendet, um die Übereinstimmung zwischen analytischem Modell und Experiment zu überprüfen. Alle Kriterien haben die Werte zwischen Null und 1 und sind vom Prinzip her ähnlich wie die Kohärenzfunktion (Gleichung 3). Das bekannteste Kriterium ist das Modal-Assurance-Criterion (MAC) [1]. Dabei werden die modalen Schwingformen aus zwei Messungen oder Berechnungen verglichen. Da es hier um Messungen geht, sind die Kriterien in Frequenzspektrum wie z. B. Frequency-Response-Assurance-Criterion (FRAC) und Cross-Signature-Assurance-Criterion (CSAC) besser als MAC geeignet [7]. Als Faustregel für alle Kriterien gilt: Ein Wert größer als 0,9 steht für gleiche bzw. sehr gut korrelierte Messungen und Werte kleiner als 0,9 für unterschiedliche bzw. schwach korrelierte Messungen [6].

Das FRAC vergleicht die Übertragungsfunktionen beider Lagerzustände an jedem Messpunkt separat und liefert generell eine Matrix mit Elementen:

$$FRAC(i, j) = \frac{\left| \left(\hat{H}_{ij}^A(f) \right)^H \hat{H}_{ij}^B(f) \right|^2}{\left(\left(\hat{H}_{ij}^A(f) \right)^H \hat{H}_{ij}^A(f) \right) \left(\left(\hat{H}_{ij}^B(f) \right)^H \hat{H}_{ij}^B(f) \right)}. \quad (4)$$

Dabei stehen die Indizes i und j für Freiheitsgrade (Degrees of Freedom DOF) von den Antwortsignalen und den Anregungssignalen. Da es bei Messungen hier nur eine Anregungsstelle gibt, ist die Anzahl von j gleich 1. Das FRAC wird somit ein Vektor. $\hat{H}_{ij}$ ist die gemessene Übertragungsfunktion zwischen den Positionen i und j , und

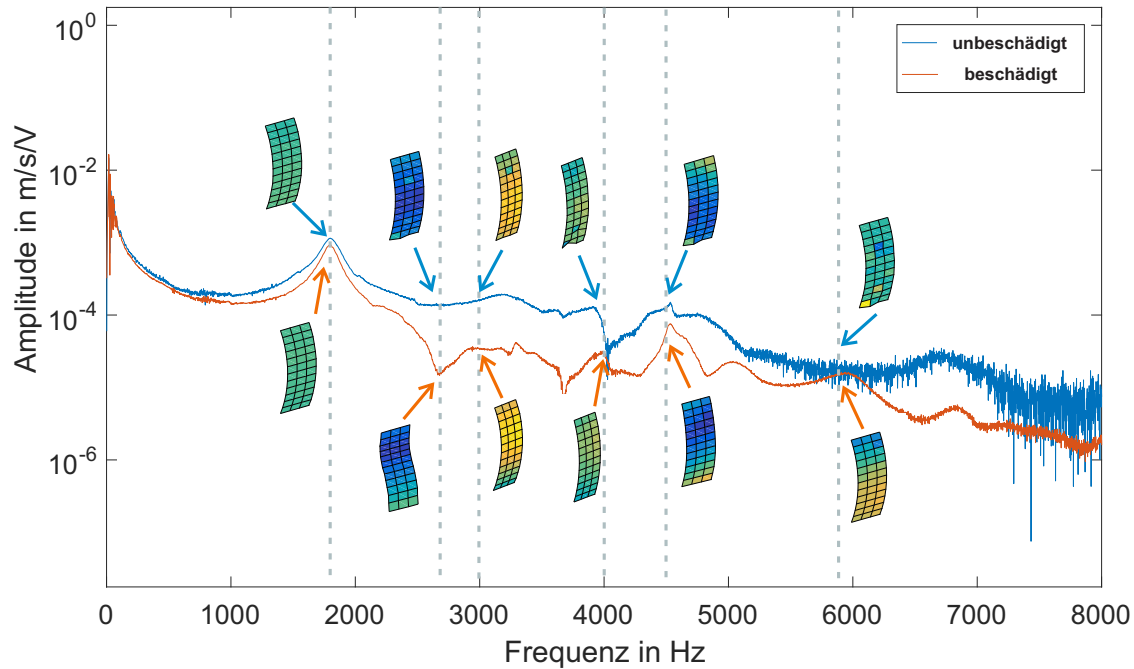


Abb. 8: Übertragungsfunktionen H_1 am Messpunkt 1 und einige Schwingformen bei ausgewählten Frequenzen.

wird hier wie bereits beschrieben durch H_1 geschätzt. Das hochgestellte H steht für adjungierte Matrix. Die hochgestellten Indizes A und B kennzeichnen jeweils die beiden zu vergleichenden Messungen. In diesem Fall sind es die Messungen in dem beschädigten und dem unbeschädigten Lagerzustand.

Wie in Gleichung 4 zu sehen ist, vergleicht FRAC die Übertragungsfunktionen von Lagerzustände A und B an jedem koinzidenten Messpunktpaar miteinander und gibt den Grad der Übereinstimmigkeit beider Lagerzustände für jede Messposition im ausgewählten Frequenzbereich an.

Das FRAC ist deshalb sehr stark abhängig von dem betrachteten Frequenzbereich. Bei Übertragungsfunktionen, die im gesamten Frequenzbereich mit einander schlecht korreliert sind, kann der FRAC-Einsatz besonders vorteilhaft sein. Ein schlechter FRAC-Wert in einem breiten Frequenzbereich kann auch auf schlechte Signalqualität der Übertragungsfunktion hindeuten.

Das CSAC vergleicht Schwingformen beider Lagerzustände bei jeder Frequenz und wird durch

$$CSAC(j, f) = \frac{\left| \left(\tilde{H}_j^A(f) \right)^H \tilde{H}_j^B(f) \right|^2}{\left(\left(\tilde{H}_j^A(f) \right)^H \tilde{H}_j^A(f) \right) \left(\left(\tilde{H}_j^B(f) \right)^H \tilde{H}_j^B(f) \right)} \quad (5)$$

definiert. Das CSAC gibt den Grad der linearen Abhängigkeit von zwei Schwingformen an und ist daher vom Prinzip her ähnlich wie der MAC-Wert, wobei der Vergleich im modalen Raum durchgeführt wird. Der Vektor $\tilde{H}_j$ beschreibt die Schwingform des Lagers bei Frequenz f . Die Elemente des Vektors $\tilde{H}_j$ sind die Werte aller Übertragungsfunktionen bei der Frequenz f . Da die Messungen hier nur mit einer Anregungsquelle durchgeführt werden, ist das CSAC hier nur von der Frequenz f abhängig, d. h. die Anzahl von j ist eins, und lässt sich wie die Kohärenzfunktion zwischen dem Wert 0 (unkorreliert) und dem Wert 1 (vollständig korreliert) über die Frequenz f darstellen.

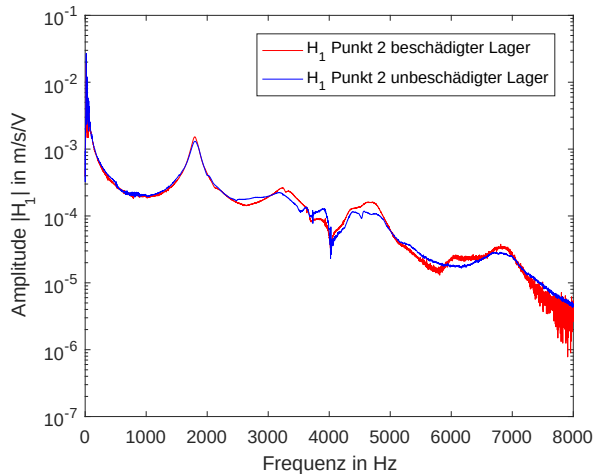


Abb. 9: Vergleich der Übertragungsfunktionen H_1 am Messpunkt 2.

3 Ergebnisse

In Abb. 8 werden einige gemessene Schwingformen entlang der Frequenzachse grafisch dargestellt. Die Übertragungsfunktionen an einem ausgewählten Messpunkt (Messpunkt 1) wird beispielsweise als Referenz mit eingetragen. Alle Schwingformpaare werden in Phase dargestellt. Der Unterschied zwischen den beiden Lagerzuständen im Frequenzbereich lässt sich sowohl an Übertragungsfunktionen als auch an Schwingformen visuell eindeutig erkennen. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Detektion der Entstehung von WECs und WEAs in Wälzlagern mit Hilfe frequenzbasierender Methode möglich ist. Unterhalb 2000 Hz befinden sich in diesem Fall die Grundswingformen der beiden Lagerzustände (radialsymmetrische Ausdehnung). Sie sind nahezu identisch. Erst ab 2000 Hz sind Unterschiede zu erkennen, wobei ab 6000 Hz die Signalqualitäten einiger Messpunkte drastisch sinken. Somit sind die Ergebnisse mit dem eingesetzten Messsystem im Bereich von 2000 Hz bis 5000 Hz aussagekräftiger.

Damit dieses Ergebnis für die Zustandsüberwachung z. B. am Prüfstand genutzt werden kann, müssen die Unterschiede beider Lagerzustände im Frequenzspektrum durch quantitative Größen beschrieben werden. Nur so kann das Überwachungssystem den Zustand des Lagers überwachen und Hinweise über Entstehung von WECs und WEAs melden. Als Nächstes werden die im letzten Abschnitt erläuterten Kriterien an die Messdaten beider Lagerzustände angewendet, um eine mögliche Überwachungsmethode zu entwickeln.

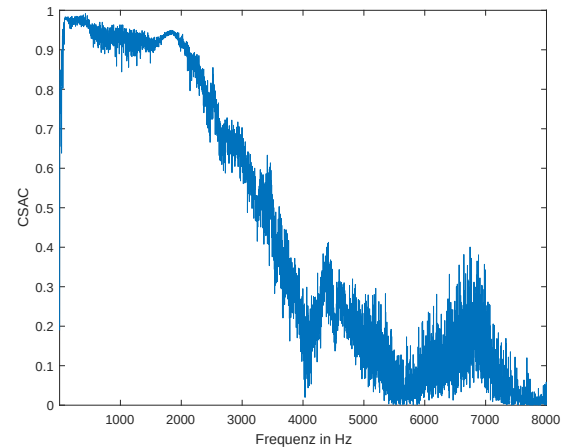


Abb. 10: CSAC-Vergleich bis 8000 Hz.

Wie bereits im letzten Abschnitt beschrieben, lässt sich die Ähnlichkeit zweier Übertragungsfunktionen durch den FRAC-Wert quantifizieren. Nach Gleichung 4 beträgt der FRAC-Wert am Messpunkt 1 im Frequenzbereich von 50 Hz bis 6000 Hz ungefähr 0,825, obwohl der Unterschied zwischen den beiden Übertragungsfunktionen eindeutig zu erkennen ist (Abb. 8). Betrachtet man nun im Frequenzbereich zwischen 2500 Hz und 5000 Hz sinkt der FRAC-Wert am Messpunkt 1 auf 0,08. Das liegt offenbar daran, dass sich die Grundswingform ungefähr bei 1800 Hz befindet. Im Frequenzbereich unterhalb 2000 Hz sind die beiden Übertragungsfunktionen nahezu identisch und dies verbessert den FRAC-Wert für den Gesamtfrequenzbereich bis 6000 Hz. Wertet man den FRAC-Wert an einem anderen Messpunkt (Messpunkt 2) aus, bei dem sich das Spektrum in Abb. 9 ergibt, so erhält man schon im Frequenzbereich von 50 Hz bis 6000 Hz einen nahezu idealen Wert von 0,95. Diese beiden Beispiele zeigen, dass der Einsatz vom FRAC Vorkenntnisse über den Frequenzbereich und auch über relevante Messpositionen benötigt, um den Unterschied der Lagerzustände genau erkennen zu können. Für die Überwachung des Lagerzustands ist eine solche Vorkenntnis nicht immer vorhanden. Das FRAC ist daher allein für die Schadenserkennung wahrscheinlich nicht ausreichend.

In Abb. 10 ist das CSAC dargestellt, das aus den kompletten Messdaten des beschädigten und des unbeschädigten Lagerrings bis 8000 Hz berechnet wurde. Die CSAC-Werte liegen im Bereich bis 2000 Hz (Grundswingform) fast alle über 0,9. Ähnliche Ergebnisse werden auch bei dem FRAC-Vergleich angezeigt. Dies deutet darauf hin, dass die durch WEC und WEA hervorgerufenen lokalen Schädigungen offensichtlich die Grundswingformen des Lagers kaum beeinflussen. Die Einflüsse durch sol-

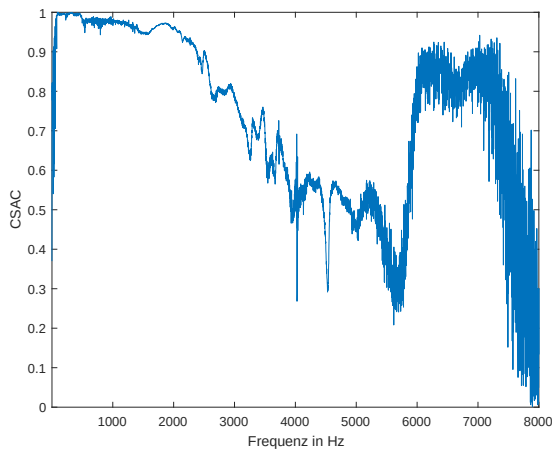


Abb. 11: CSAC-Vergleich bis 8000 Hz aus ausgewählten Übertragungsfunktionen.

che lokalen Materialeigenschaftsänderungen lassen sich im oberen Frequenzbereich mit Hilfe von CSAC besser identifizieren. In diesem Fall sinken die CSAC-Werte ab 2000 Hz drastisch ab, was einen großen Unterschied zwischen Schwingformen beider Lager bedeutet.

Da auch eine schlechte Signalqualität, wie bereits diskutiert, die Assurance-Criterion Werte verschlechtern kann, wird als Nächstes mit Hilfe der Kohärenzfunktionen nur der Teil der gesamten gemessenen Übertragungsfunktionen ausgewählt, bei dem die Frequenzkomponenten sehr gute Kohärenzwerte und somit gute Signalqualität besitzen. Lediglich aus diesen selektierten Übertragungsfunktionen wird der CSAC-Wert neu berechnet und in Abb. 11 dargestellt. Im Vergleich zu den CSAC-Werten aus allen Übertragungsfunktionen (Abb. 10), d. h. mit teilweise stark verrauschten Signalen, ist der Kurvenverlauf jetzt besser zu erkennen, allerdings gibt es bei hohen Frequenzen nicht mehr genügend Messpunkte, um die Schwingformen eindeutig identifizieren zu können, was zu einem falschen Ansteigen der CSAC-Werte ab etwa 6000 Hz führt. Der Verlauf des CSAC-Wertes ist jedoch unterhalb von 6000 Hz ohne die verrauschten Übertragungsfunktionen besser erkennbar. Somit kann man feststellen, dass das Schwingverhalten beider Lager ab 2000 Hz deutliche Unterschiede erweist.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die mit Hilfe unseres robotergesteuerten Vibrometer-Messsystems durchgeführten Messungen zeigen, dass die Ausbildung von WECs und WEAs in Lagerringen Schwing-

verhaltensänderungen verursachen. Diese Veränderungen lassen sich mit geeigneten Messsystemen auch vibrationsbasierend zerstörungsfrei detektieren. Die Untersuchungen zeigen auch, dass WECs und WEAs das Spektrum vor allem im oberen Frequenzbereich verändern. Im unteren Frequenzbereich, wo Grundswingformen dominierend sind, sind kaum Veränderungen zu erkennen.

Die Kriterien FRAC, CSAC und Kohärenzfunktion helfen Veränderungen im Spektrum besser zu identifizieren. Dadurch ist ein Online-Monitoring des Lagerzustands z. B. am Prüfstand und später sogar im Betrieb durch Kombination der drei Kriterien denkbar. Das FRAC überwacht das gesamte Spektrum an jedem Messpunkt während das CSAC die gesamte Schwingform für jede Frequenz auswertet. Mit Hilfe der Kohärenzfunktion kann das Aussortieren von nichtbrauchbaren Messdaten ermöglicht werden. Aus den ausgewählten Messdaten lassen sich Schwingverhaltensänderungen und somit Hinweise über Entstehung von WECs und WEAs durch Betrachtung in den einzelnen Frequenzen genau erkennen.

Im nächsten Schritt soll die hier vorgestellte Methode am Prüfstand durchgeführt werden. Dabei sollen möglichst mehr Messpunkte mit LDV-Technik gleichzeitig erfasst werden. Da der Prüfstand wesentlich komplexer als der Lagerring selber ist, dürfte die Auswahl von günstigen Übertragungsfunktionen (Messpositionen), welche besser zur Entstehung von WECs und WEAs korreliert sind, deutlich anspruchsvoller sein.

Die flächenhafte oder zumindest mehr-kanalige Messung ist insbesondere für die Verwendung des CSAC-Kriteriums notwendig (mindestens zwei Messpunkte werden benötigt). Das LDV ist in diesem Fall durch seine große Messbandbreite, hohe Empfindlichkeit und flexible bzw. exakte Positionierbarkeit im Vergleich zur konventionellen Verfahren mit Beschleunigungssensoren vorteilhaft, bzw. zwingend erforderlich. Beim Online-Monitoring ist es durchaus auch denkbar, dass die Schwingformen mit Kurzzeit-FFT erfasst werden. Dafür kann die hier verwendete rasternde Technik an ihre Grenze stoßen und soll durch eine parallel messende Technik (mehrere Kanäle gleichzeitig) erweitert werden.

Literatur

- [1] R. J. Allemang. *Investigation of Some Multiple Input/output Frequency Response Function Experimental Modal Analysis Techniques*. PhD thesis, University of Cincinnati, 1980.
- [2] R. J. Allemang. The Modal Assurance Criterion – Twenty years of use and abuse, *Sound and Vibration*, 37(8):14–23, 2003.

- [3] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime. A summary review of vibration based damage identification methods, *Shock and Vibration digest*, 30(2):91–105, 1998.
- [4] M.-H. Evans. White structure flaking (WSF) in wind turbine gearbox bearings: effects of 'butterflies' and white etching cracks (WECs), *Materials Science and Technology*, 28(1):3–22, 2012.
- [5] F. G. Kollmann, R. Angert und T. F. Schösser. *Praktische Maschinenakustik*. Berlin: Springer. 1. Auflage, 2006.
- [6] S. Richardson, J. Tyler, P. McHargue, and M. Richardson. A New Measure of Shape Difference. *Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 71–80, March 2014.
- [7] T. A. N. Silva, N. M. M. Maia, and J. I. Barbosa. A model updating technique based on FRFs for damped structures. *Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2012)/ International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2012)*, 2213–2226, September 2012.
- [8] T. Ziemer. *Demonstration einer 3D-Schwingungsmessung mit einem Einpunkt-Laser-Doppler-Vibrometer und einem 6-Achs-Industrieroboter*. Master thesis, Technische Universität Clausthal, 2012.