

Zerstörungsfreie Diagnose von Wälzlagern mit Hilfe der Hochfrequenz-Impuls-Messung an Windenergieanlagen

Sören BARTELDES¹, Peter-Christian ZINN¹, Walter HOLWEGGER², Daniel MERK³

¹ QASS GmbH Qualität Automation Systeme Software, Wetter (Ruhr)

² Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach

³ Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Schweinfurt

Kurzfassung. Windenergieanlagen sind vielfältigen Belastungen unterworfen und die Schadensbilder sind oft vielfältig. Gerade der Antriebsstrang ist besonderen Belastungen mechanischer, chemischer und nicht zuletzt elektrischer Art unterworfen. Innovative Messtechnik in Verbindung mit durchdachter Instandhaltungsstrategie sollen die Anlagenverfügbarkeit erhöhen. Im Offshore-Bereich lassen sich Instandhaltungsstrategien nur in engen Zeitfenstern realisieren, daher liegt der Fokus auf einer möglichst frühen Erkennung potentieller Schadensbilder. Die Hoch-Frequenz-Impuls-Messung bietet dem Anwender eine zustandsorientierte Überwachung von Wälzlagern hinsichtlich eines kombinierten Schmierstoff-Schaden-Monitorings. Bislang an Prüfständen bewiesen, steht nun der Sprung als serienfähiges Condition-Monitoring-Verfahren an.

Abstract. Wind energy plants suffer multiple stress and strains from mechanical, chemical and electrical sources. Primarily the drive train is affected. Innovative monitoring devices combined with a smart maintenance and repair strategy shall increase plant availability. This strategy can be realized in tight time frames only, especially for offshore wind energy plants. Focusing on early detection of damages is therefore necessary. High-frequency-impulse-measurement (HFIM) enables monitoring and maintenance strategies based on the actual mechanical conditions and lubrication status as well as for damage of bearings. Test-rig-level measurements prove HFIM as valuable tool for such a sophisticated condition-monitoring.

1 Einleitung

Windenergieanlagen sind im Betrieb hochdynamisch. Diese Dynamik betrifft vorwiegend die großen Anlagenbauteile wie Rotorblätter und Nabe. Der Antriebsstrang von Windenergieanlagen ist dagegen tribologischen, tribochemischen und triboelektrischen Belastungen ausgesetzt [1]. Insbesondere die Wälzlager im Bereich des Planetengetriebes und der schnellen Welle sind betroffen. Typische Wälzlagerschäden sind nach DIN ISO 15243 Graufleckigkeit, Fressen und Verschleiß, sowie Ermüdungsschäden [2]. Jedoch auch atypische Schäden wie weiß-anätzende-Gefügebereiche und damit in Verbindung stehende



Rissnetzwerke (White Etching Cracks) verringern die Anlagenverfügbarkeit. Als Ursache wird eine kombinierte Belastung aus Betriebsbedingungen und Schadenstreibern vermutet. In Betracht kommen hierbei Schmierstoffe, die ihrerseits durch Ionisierungsvorgänge Lagerströme erzeugen oder Schaltvorgänge im Frequenzumrichter, sowie Bremsvorgänge, die zusätzliche elektrische Energie in Form von Lagerströme erzeugen [3].

An Prüfständen für Wälzlager konnte durch Variation von Schmierstoffen verschiedener Zusammensetzung und durch Anwendung der Hoch-Frequenz-Impuls-Messung (HFIM) unter gleichen mechanischen Bedingungen der schmierstoffabhängige akustische Fingerabdruck von Axialzylinderrollenlagern bestimmt werden. Die HFIM ist ein Verfahren bei der niederfrequente und hochfrequente Körperschallsignale verarbeitet werden. Die Messkette besteht aus einem piezokeramischen Sensor ohne seismische Masse. Die seismische Masse dämpft insbesondere hochfrequente Anteile von Körperschallsignalen ab und dies ist für die Messauswertung nachteilig. Das Signal wird über einen Ladungsvorverstärker geleitet und direkt durch eine Fast-Fourier-Transformation mathematisch berechnet. Die hochfrequenten Signalanteile beschreiben Veränderungen in Bauteilen und Prozessen wesentlich sensitiver und können zuverlässig auch kurzzeitige Ereignisse wie Risse oder die Zunahme des Reibmoments darstellen. Kernstück der HFIM ist die dreidimensionale Darstellung des Signals als Zeit-Frequenz-Amplitudenschaubild in einem Kaskadendiagramm. Der bisherige Stand der Technik, die Hüllkurvenanalyse, wird damit überflügelt. Denn liegt der energetische Anteil einer Bauteilveränderung am Gesamtsignal unterhalb dem Anteil der Prozessfrequenzen, ist diese Bauteilveränderung nicht zu detektieren. Kurzfristige Prozessveränderungen, die zeitlich indifferent erfolgen oder kurzweilig sind, können nicht bestimmt werden. Hinzu kommt, dass mit der Hüllkurvenanalyse nur eine post-process-Analyse bzw. eine Schadensbestimmung in Intervallen möglich ist [4]. Die HFIM bildet kurzfristige Veränderungen ab. Der Vorteil der HFIM liegt also in der Anwendung als Früherkennungssystem zur zustandsbezogenen Bauteilüberwachung mit Darstellung hochfrequenter Signalanteile. Das System wird u.a. zur Lagerüberwachung an FE-8 Prüfständen eingesetzt. Die FE-8 Prüfstände geben die Schäden von Wälzlagern auf einer Prüfebene wieder. In Versuchen wird dort der Einfluss von Schmierstoffen auf den Lagerlauf untersucht. Es zeigt sich, dass bestimmte Additive einen Einfluss auf die Lebensdauer und das Schädigungsverhalten von Axialzylinderrollenlagern besitzen [5].

2 Physikalische Grundlagen

Die akustische Emissionsmessung basiert auf der Entstehung von Festkörperschallwellen durch werkstoffverändernde Ereignisse in Bauteilen, sowie auf der Änderung von Prozessparametern und dem veränderten Betriebseigenschaften von Bauteilen oder Werkzeugen. Eingesetzt wird die Technik zur Überwachung von Bauteilen, Maschinen und Anlagen, die sich dynamisch verhalten. Entweder findet eine Schwingungsanalyse oder eine Zustandsüberwachung statt. Die HFIM stellt eine Weiterentwicklung bisheriger Verfahren dar. Sie ermöglicht eine andere, zeit- und frequenz aufgelöste Auswertung von Körperschallsignalen. Vom Prinzip her besteht die Anwendung aus denselben mathematischen Grundprinzipien wie die Hüllkurvenanalyse. Bei der Hüllkurvenanalyse wird aus einem Zeit-Amplituden-Signal durch eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) ein Spektrum der Prozessfrequenzen erzeugt. Das Spektrum besteht aus Maschinen- und Prozessfrequenzen. Das Signal unterliegt einer Faltung und muss z.B. mit einer Hilbert-Transformation entfaltet werden. Neben den harmonischen Maschinensignalen treten Prozess- und mögliche Schadensfrequenzen hervor. Der Nachteil besteht darin, dass nur sehr deutliche, singuläre und stetige Frequenzen aus der Menge der Harmonischen herausragen.

Schadfrequenzen, die besonders kurze Ereignisse darstellen, wie z.B. Risse werden nicht dargestellt. Prozessfrequenzen mit höhere Amplitude überlagern die Schadsignale. Der Schaden geht im Signalrauschen unter [6][7].

Die Anwendung der HFIM zielt dagegen auf die Darstellung von plötzlich auftretenden Prozessfrequenzen. Durch leistungsstarke Hardware, meist FPGA-Chips, kann die FFT direkt während der Fertigung durchgeführt werden. Die HFIM nutzt dazu einen mathematischen Fehler der FFT, da insbesondere kurze, nicht periodisch auftretende Ereignisse (Risse, Reibung, Stöße) nicht definiert sind. Aus dem Gesamtsignal werden Spektren berechnet und in einem dreidimensionalen Achsensystem nach Zeit-Frequenz-Amplitude visualisiert. Die als Sonogramm oder Kaskadendiagramm bekannte Visualisierung ermöglicht eine direkte Deutung des Messsignals und erlaubt eine treffende Unterscheidung zwischen Prozesssignalen und Schadsignalen [8]. Die Darstellung eines Riss-Ereignisses mit der HFIM ist in Abbildung 1 gegeben. Durch den Abbruch einer Grafitmiene (HSU-Nielsen Test) mit 0,5mm Durchmesser und der Härte 2H kann ein definiertes Ereignis erzeugt werden [9]. Es entsteht ein Signal mit niederfrequenten Anteilen bis 50 kHz und deutlichen hochfrequenten Anteilen bis 400 kHz.

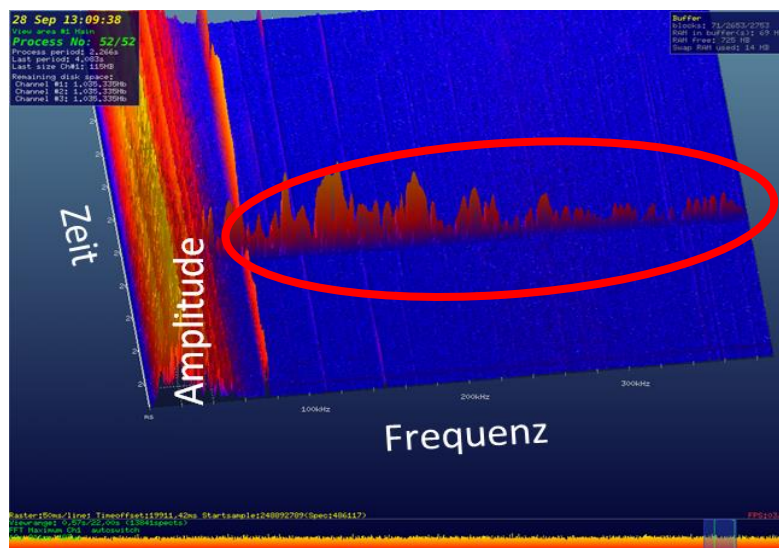


Abb. 1. Kaskadendiagramm der Hochfrequenz-Impuls-Messung in der 3-dimensionalen Darstellung mit deutlichem Signal durch den Abbruch einer Grafitmiene der Härte 2H mit 0,5 mm Durchmesser (HSU Nielsentest nach DIN 1330-9)

Das Kaskadendiagramm ist eine 3-dimensionale Darstellung der vom Piezosensor stammenden Information. Die x-Achse beschreibt die Zeit [ms], die z-Achse die Frequenz [kHz] und die y-Achse die Amplitude. Die Amplitude ist der qualitative Energiewert des Schallsignals. Durch die Darstellung und Zerlegung des Signals in Spektren wird diesem ein Energiewert in verschiedenen Frequenzbereichen zugeordnet. Als Faustformel gilt: Je intensiver das Ereignis, desto intensiver die Festkörperschallwellen. Die für die Detektion der Festkörperschallwellen genutzten Piezosensoren nutzen den piezoelektrischen Effekt und werden zur Bestimmung einer Messgröße in Richtung einer Hauptspannung eingesetzt und zur Druck-, Beschleunigung-, Spannung- oder Kraft-Messung genutzt. Der piezoelektrische Effekt beschreibt die Änderung der elektrischen Polarisierung und damit das Auftreten von elektrischen Spannungen an Festkörpern bei elastischer Verformung. Die Spannung kann durch Elektroden abgegriffen werden. Auch der inverse Effekt mit Verformung des Piezoelements beim Anlegen elektrischer Spannung ist möglich und wird zur Erzeugung von Ultraschallwellen genutzt. Piezoelektrische Kristalle sind Quarz, Lithiumniobat, Blei-Zirkon-Titanat, während piezoelektrische Keramiken aus Blei-Zirkonat-Titanat oder Blei-

Magnesium-Niobaten bestehen. Die Abbildung 2 zeigt den typischen Aufbau eines Piezosensors und dessen einheitliches Wirkprinzip.

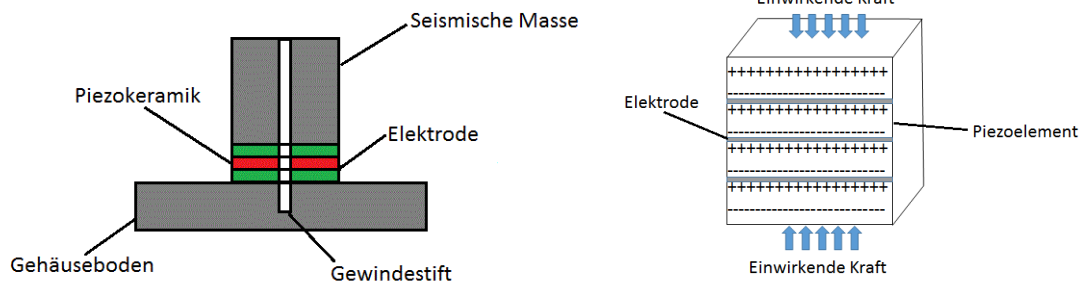


Abb. 2. Aufbau eines Piezosensors mit Piezokristallen (links) und Wirkprinzip der Piezokristalle (rechts)

3 Prozessmonitoring am FE -8 Prüfstand

Die HFIM wird in FE-8 Prüfständen (DIN 51819) zur Detektion von Defekten an Axialzylinderrollenlagern eingesetzt. Der Prüfstand wird zur mechanisch-dynamischen Prüfung von Schmierölen eingesetzt. In den Prüfungen wird zudem das Verschleißschutzvermögen unter praxisähnlichen Bedingungen ermittelt. Die Lager werden mit einer axial gerichteten Kraft belastet und mit einer vorher festgelegten Prüfdrehzahl bis zu einem festgelegten Zeitpunkt betrieben. Nach einer Einlaufphase, die eine Glättung der Lageroberfläche zur Folge hat, stellt sich ein Beharrungsreibmoment ein. Die Oberfläche des Lagers wird auch weiterhin tribologisch belastet, so dass es zu einer Verlustleistung des Lagerwerkstoffs kommt. Diese Verlustleistung ist stark temperaturkorreliert. Die Verlustleistung wird durch den Gewichtsverlust der Lagerbestandteile klassifiziert. Die Prüfkraft wird mit Hilfe eines Tellerfederpakets aufgebracht. Der Prüfkopf ist mit einem kegeligen Wellensitz der Prüfkopfwelle lösbar mit der Antriebseinheit verbunden. Der Aufbau besteht aus zwei Prüflagern und zwei Hilfsagern, welche die Antriebswelle lagern. Der Schmierstoff wird durch entsprechende Ölbohrungen zu den Lagern geleitet und in einem geschlossenen System umgewälzt. Standardmäßig sind am FE-8 Prüfstand eine Vorrichtung zur Bestimmung der Reibkraftmessung und eine Temperaturmessung installiert [10]. An dem betrachteten Prüfstand ist gleichfalls ein Beschleunigungssensor zur Messung von Impulsen installiert. Die Impulse entstehen aus dem Vorliegen von Schäden nach DIN ISO 15243 und sind vorwiegend als Oberflächenschäden der Lageroberfläche zu klassifizieren. Bei diesen Schäden handelt es sich unter anderem um Pittings, Graufleckigkeit, Fressverschleiß u.a. Schäden [2].

Die HFIM wird dagegen eingesetzt um frühe Stadien von Schäden zu detektieren, deren zeitliches Auftreten vom eingesetzten Schmierstoff abhängt. Im dargestellten Fall handelt es sich um die Provokation weiß-anätzender Rissnetzwerke unterhalb der Oberfläche von Wälzlagerstählen. Das als White-Etching-Cracks (WEC) bekannte Phänomen wird durch die folgenden Faktoren beeinflusst [11]:

- Abhängigkeit von der Öl-Additivkombination
- Einfluss von elektrischen Strömen
- Einfluss durch Lagerbelastung

WEC verursachen ausgeprägte Rissnetzwerke unterhalb der intakten Oberfläche von Wälzlagern. Erreichen diese Rissnetzwerke die Oberfläche oder vereinigen diese sich, dann entstehen ausgeprägte Pittings, Abschälungen der Wälzlageroberfläche oder Durchrisse. Das Lager fällt weit vor der prognostizierten Lebensdauer aus. Alle Industrieanwendungen sind betroffen. Die Windenergieanlagenindustrie trifft dieser Umstand besonders, da durch das

spontane Auftreten keine wirtschaftlichen Instandhaltungskonzepte greifen und Schäden an den Lagern der schnellen Welle oder des Getriebes häufig Folgeschäden verursachen. Der spontane Ausfall bei offshore-Anlagen ist dabei besonders zu betrachten, da häufig dem Anlagenbetreiber nur ca. zwei Wochen pro Jahr zur Verfügung stehen, um eine Anlage zu warten. Entsteht der lagerbedingte Anlagenausfall in windreichen Monaten, dann verzögert sich die Amortisation der Anlagen auf größer 20 Jahre [12][13].

In den Prüfstandversuchen mit der HFIM wird auf spezielle Schmierstoffkombinationen zurückgegriffen. Die Versuche werden mit einem „Low Reference-Öl“ und einem „High-Reference-Öl“ klassifiziert durchgeführt. Das Low Reference-Öl (LR) ist ein Mehrbereichs-Motorenöl mit der Spezifikation SAE 75 W 80. Zur Stabilisierung der Viskosität werden Viscosity Index Improver (VIS) additiviert. Dies dient der Temperaturstabilität, um insbesondere bei höheren Temperaturen eine ausreichende Viskosität sicher zu stellen. Dazu werden Korrosionsschutzmittel in Form von überbasischem Calciumsulfonat und Magnesiumsulfonat eingesetzt. Dies dient der Einlagerung von Schmutz- und Schlammteilchen und der Bindung von Wasser. Vorteilhaft ist die hohe Hafttragfähigkeit an Metalloberflächen. Ebenfalls hinzugefügt werden Verschleißschutzadditive in Form von Zinkdithiophosphat und Borsäurealkylestern. Diese werden eingesetzt als Schutz vor Kaltverschweißungen, sollte es zu einer Mangelschmierung bei verschiedenen Temperaturen kommen. Die Additive bilden jedoch Ablagerungen, die eine Transformation oberflächennaher Bereiche durchführen. Dies ist nicht erwünscht. Zuletzt werden dem LR-Öl Antioxidantien zugesetzt, um durch Sauerstoff verursachte Oxidationen zu unterbrechen. Das High Reference-Öl (HR) unterscheidet sich vom LR-Öl durch das Weglassen der Verschleißschutzadditivierung und einem stärkeren Gehalt an Grundöl. Tabelle 1 gibt die Bestandteile der Ölzusammensetzung der Versuche wieder.

Tabelle 1. Zusammensetzung des Low Reference-Öls und des High Reference-Öls

Low Reference Versuch	High Reference Versuch
Mineralöl SAE 75 W 80	Mineralöl SAE 75 W 80
Überbasisches Calciumsulfonat	Überbasisches Calciumsulfonat
Überbasisches Magnesiumsulfonat	Überbasisches Magnesiumsulfonat
Natriumsulfonat	Natriumsulfonat
Zinkdithiophosphat	Antioxidans
Borsäure-alkylester	VI-Improver
Triphenylphosphorthionat	
Antioxidans	
VI-Improver	

Die Position der verwendeten Piezosensoren zeigt Abbildung 3. Ein Sensor wird direkt in die Lageraufnahme des Prüfstands verschraubt und gewährleistet eine möglichst gute Übertragung der vom Lager ausgehenden Festkörperschallwellen (Bild 4, links). Zur Überprüfung einer Translation der Signale auf andere Positionen wird zudem eine auswärtige Position am äußeren Prüfstandgehäuse gewählt (Bild 4, rechts). Es wird ein dreilagiger Piezosensor verwendet und die Empfindlichkeit wird damit erhöht.

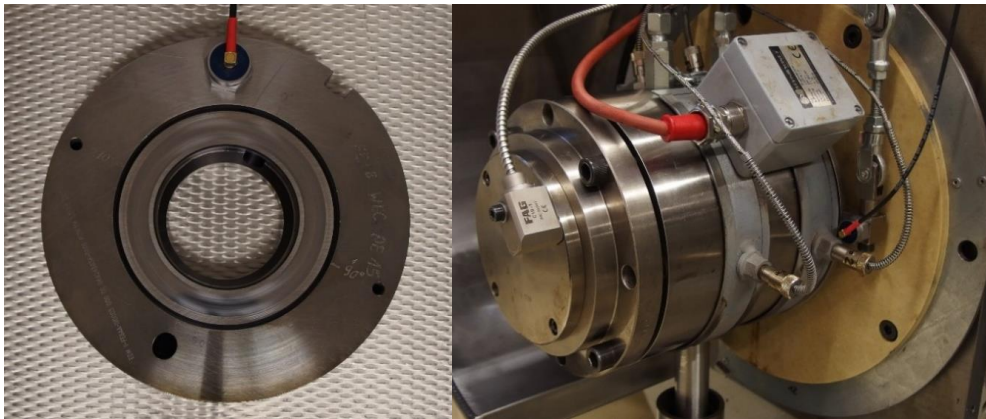


Abb. 3. Position des Piezosensors an der Lageraufnahme (links) und am Gehäuse des FE - 8 Prüfstands (rechts)

4 Ergebnisse

Aus dem Kaskadendiagramm und dem Diagramm der Amplitudenwerte werden Unterschiede hinsichtlich der verschiedenen Schmierstoffqualitäten deutlich. Dabei werden die Amplituden der erzeugten Spektren des Kaskadendiagramms aufsummiert und es stellt damit eine energetische Bewertung der Schallenergie dar. Abbildung 4 zeigt die Amplitudenwerte des HR-Öls. Es handelt sich hierbei zudem um den Versuch bei dem keine WEC provoziert werden. Dabei ist deutlich ein Anstieg der Schallenergiesignale von Beginn an bis ca. 350 min Prüfstandlaufzeit zu erkennen. Nach Erreichen des Maximums nehmen die Signale im gleichen Umfang wie beim Anstieg wieder ab. Nach ca. 800 min Prüfstandlaufzeit zeigen die Signale eine gleichmäßige Energiehöhe. Dem korreliert ist ein Anstieg der Öltemperatur in den ersten 300 min. Durch die zunehmende Gefahr der vorzeitigen Ölalterung mit Verschlammung und Funktionsverlust des Öls, wird die Last über das Tellerfederpaket des FE-8 Prüfstands nach 300 min reduziert. Die Zunahme der Temperatur und die Zunahme der Schallsignale sind ebenso korreliert mit einer Zunahme des Reibmoments, das als Ursache der Erhöhung angenommen werden kann. Durch die Wegnahme der Last sinken sowohl Schallsignale, als auch die Temperatur. Nach 800 min wird dieselbe Laststufe aufgebracht wie sie bereits nach 300 min beim Signalmaximum vorliegt.

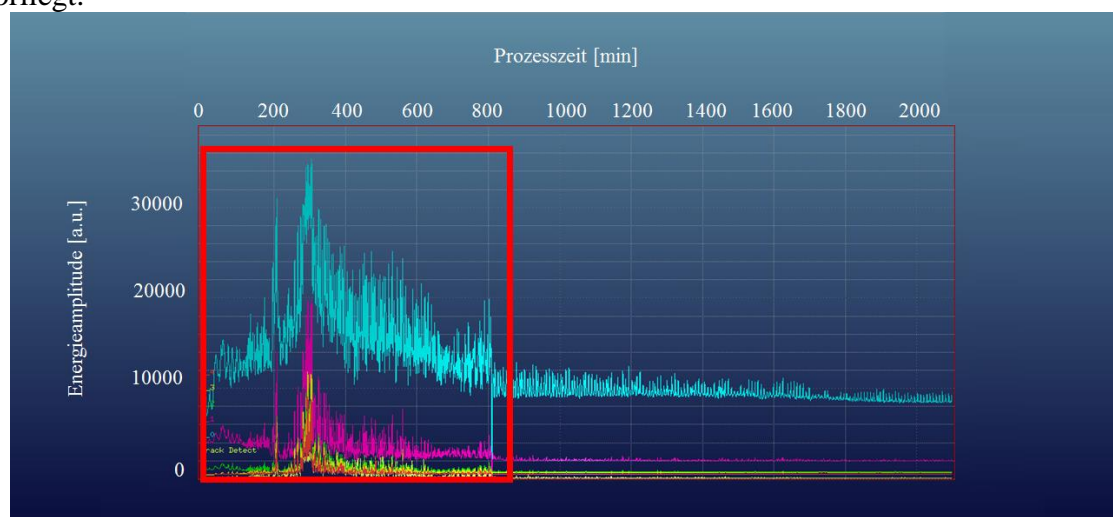


Abb. 5. Diagramm der Energieamplitude der Körperschallereignisse im High Reference-Versuch

Die Kaskadendiagramme zeigen für die entsprechenden Zeitabschnitte von Beginn bis 300 min Prüfstandlaufzeit eine Zunahme von Signalen im hochfrequenten Bereich. Die Signale sind jedoch nicht periodisch, sondern stochastisch. Dazu existieren weiterhin Signalanteile in den Zwischenbereichen, die typisch sind für Reibgeräusche. Die Signale ähneln in diesem Fall einem „Signalteppich“. Nach der beschriebenen Wegnahme der Last gehen die Signalanteile des Reibmoments kontinuierlich zurück. Ab 800 min sind Körperschallbilder vorhanden, die nur einen niederfrequenten Anteil bis 100 kHz besitzen. Abbildung 6 zeigt die Kaskadendiagramme des HR-Versuchs nach 49 und 210 Minuten (obere Reihe) sowie 305 und 1.017 Minuten (untere Reihe).

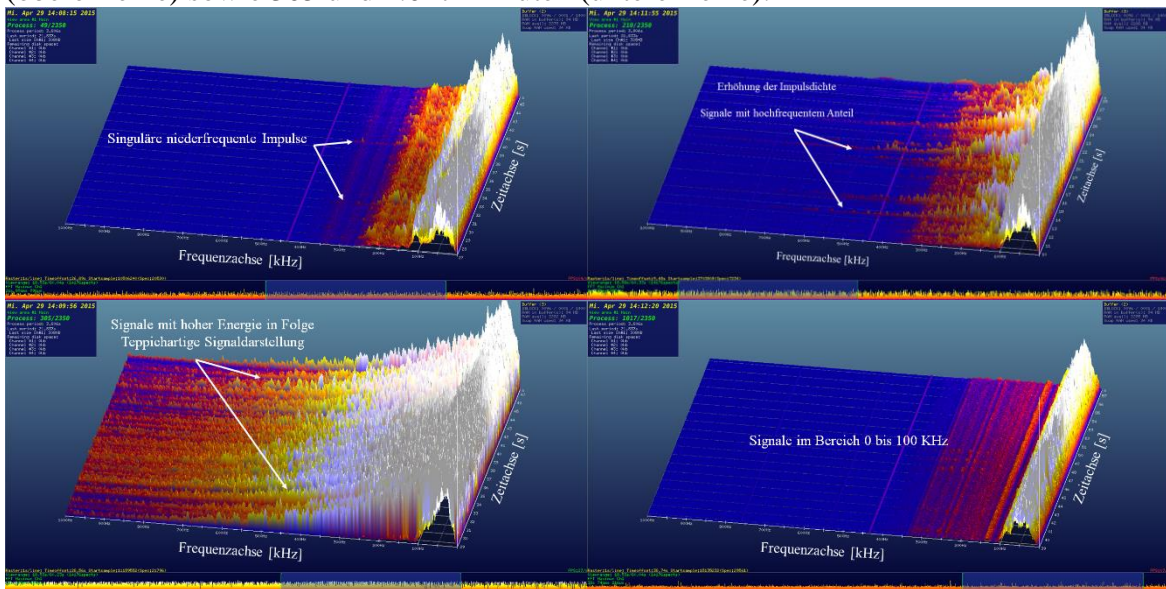


Abb. 6. Kaskadendiagramme des High Reference Versuchs nach 49 und 210 Minuten (obere Reihe) sowie 305 und 1.017 Minuten (untere Reihe)

Im Versuch unter der Verwendung des LR-Öls werden WEC provoziert. Der Versuch dauert insgesamt 41 Stunden und wird durch den Beschleunigungssensor des FE-8 Prüfstand abgebrochen. Die Lageroberfläche zeigt zu diesem Zeitpunkt das Vorliegen von Pittings und Graufleckigkeit. Ultraschalluntersuchungen geben das Vorhandensein von Rissnetzwerken wieder, die WEC verursacht sind. Im Amplitudendiagramm sind nach 1.800 min Auffälligkeiten in der Signalhöhe zu erkennen. Abbildung 7 zeigt das Amplitudendiagramm des LR-Versuchs.

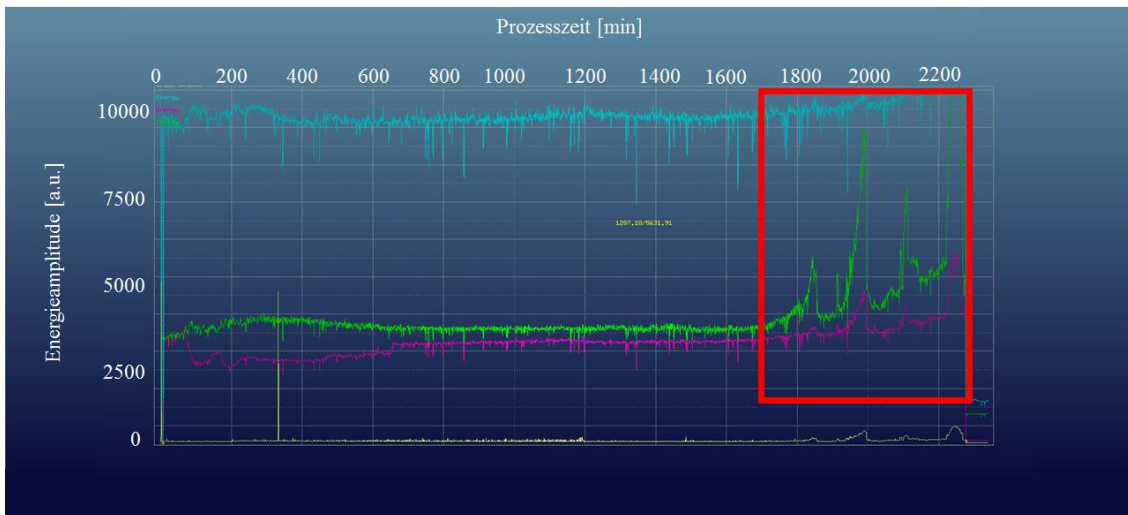


Abb. 7. Diagramm der Energieamplitude der Körperschallereignisse im Low Reference-Versuch

Die Kaskadendiagramme des LR-Versuchs zeigen das Vorhandensein eines Oberflächenschadens. Es entstehen während der Überrollung der Lagerscheiben periodische Signale. Der Impulsabstand der Signale nimmt mit fortschreitender Prüfstandlaufzeit zu. Dies spricht für das Vorhandensein von verschiedenen Bereichen, die einen Oberflächenschaden zeigen. Die Impulse zeigen nach 1.989 min einen Abstand von 10 ms, nach 2.032 min bereits 8ms und nach 2.121 einen Abstand von 3 ms. Abbildung 8 zeigt die entsprechenden Kaskadendiagramme bei 1.989 min und 2.032 min (obere Reihe) und 2.121 min (unten).

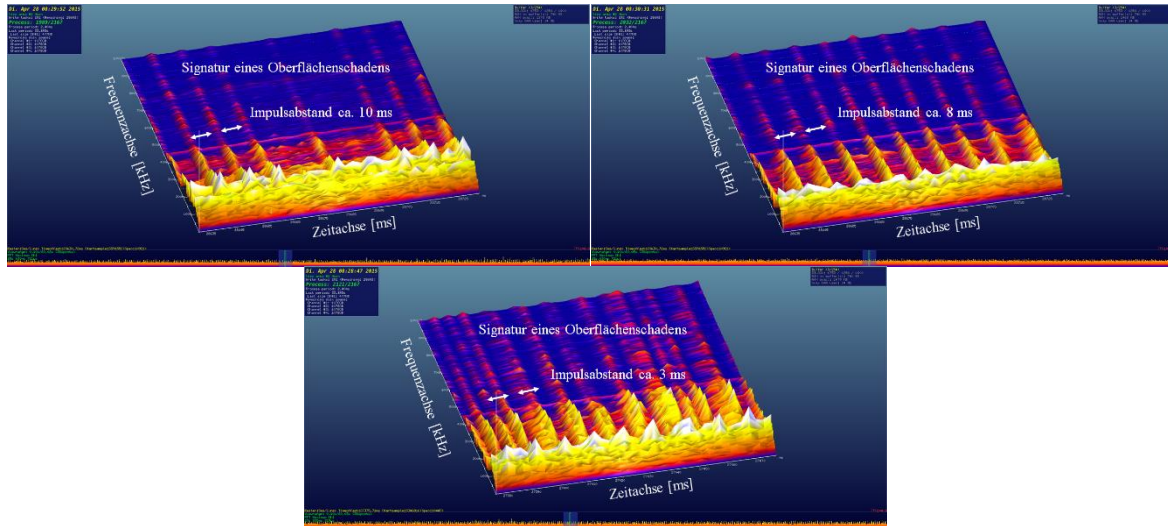


Abb. 8. Kaskadendiagramme des Low Reference Versuchs nach 1.989 und 2.032 Minuten (obere Reihe) sowie 2.121 Minuten (unten)

5 Fazit

Die HFIM kann schmierstoffbedingte Änderungen im Lagerlauf genau abbilden. Selbst kleinste Unterschiede in der Schmierstoffzusammensetzung haben einen erheblichen Einfluss auf den Verschleißschutz. Auch Frühphasen von WEC werden durch die HFIM detektiert. Dies geschieht bis zu 10 Stunden eher, als es bisherige Systeme tun. Die HFIM wird dazu bereits bei Lagerherstellern als Schmierstoffmonitoring und zur Lagerlaufbewertung eingesetzt.

In weiteren Untersuchungen zeigt sich, dass WEC durch eine Volumenzunahme im Material die Oberfläche aufwölben und bei optisch intakter Oberfläche die gezeigten periodischen Signale verursachen. Die HFIM liefert so auch einen entscheidenden Hinweis auf die Entstehungsursache, deren genaue Klärung weiterhin unbekannt ist. Es zeigt sich, dass die WEC eine Latenzzeit in ihrer Entstehung besitzen und nach deren Ablauf in einem engen Zeitfenster entstehen sowie in kurzer Zeit zur Zerstörung des Lagers führen.

6 Referenzen

- [1] Hau, E.: „Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit (VDI-Buch)“, Heidelberg: Springer-Verlag, Ausgabe 2008
- [2] DIN ISO 15243: Wälzlager - Schäden und Ausfälle - Begriffe, Merkmale und Ursachen, Beuth-Verlag, 2004

- [3] Evans, M.-H., Richardson, A. D., Wang, L., and Wood, R. J. K.: Serial Sectioning Investigation of Butterfly and White Etching Crack (WEC) Formation in Wind Turbine Gearbox Bearings, *Wear*, Volume 302, 2013, pp 1573–1582.
- [4] Geropp, B.: Schwingungsdiagnose an Wälzlagern mit Hilfe der Hüllkurvenanalyse, Dissertation, Lehrstuhl und Institut für Bergwerks- und Hüttenmaschinenkunde der RWTH Aachen, Band 14
- [5] Keshtgar, A., Modarres, M.: Detecting Crack Initiation Based on Acoustic Emission. *Chemical Engineering Transactions*, Volume 33, 2013, pp. 547 – 552
- [6] Cooley, J. W., Lewis, P. and Welch, P.: The Fast Fourier Transform and its Applications, *IEEE Trans on Education*, Volume 12, Issue 1, 1969, pp. 28-34
- [7] Feldmann, M.: Hilbert Transform, Envelope, Instantaneous Phase, and Frequency. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, 2009 (published online DOI: 10.1002/9780470061626.shm046)
- [8] DE 101 37 364 A 1 (Patentschrift)
- [9] DIN EN 1330-9: Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 9: Begriffe der Schallemissionsprüfung; Beuth Verlag, 2009
- [10] DIN 51819-3: Prüfung von Schmierstoffen - Mechanisch-dynamische Prüfung auf dem Wälzlagerschmierstoff-Prüfgerät FE8 - Teil 3: Verfahren für Schmieröl, einzusetzende Prüflager, Axialzylinderrollenlager, Beuth-Verlag, 2005
- [11] Holweger, W; Wolf, M, Merk, D, Blass, T., Barteldes, S., Jakociczs, A.: White Etching Root Cause Investigations. *Tribology Transactions*, Volume 58, Issue 1, 2015, pp. 59-66, (published online DOI:10.1080/10402004.2014.942938)
- [12] Barteldes, S.; et al.: Residual stress evolution and acoustic emission during lubrication- assisted White Etching Crack (WEC) Formation. *STLE 2014, Society of Tribologists and Lubrication Engineers Annual Meeting & Exhibition 2014* pp. 1-4.
- [13] Barteldes, S.; Walther, F.; Holweger, W.: Wälzlagerdiagnose und Detektion von White Etching Cracks mit Barkhausen-Rauschen und Hochfrequenz-Impuls-Messung. *Aachener Schriften zur Rohstoff- und Entsorgungstechnik* 81, Hrsg.: K. Nienhaus, P. Burgwinkel, Verlag R. Zillekens, ISBN: 978-3-941277-17-5 2014, pp. 435-444.