

Condition Monitoring im Kontext von Industrie 4.0

Dr. Rainer Wirth, GfM Gesellschaft für Maschinendiagnose mbH, Berlin

Zusammenfassung

Condition Monitoring ist die Beurteilung des Schädigungszustands von rotierenden Maschinen auf der Basis von schwingungsdiagnostischen Verfahren. Kenngrößen bildende Verfahren erlauben eine schnelle Interpretation der Messwerte bei überschaubarer Diagnosediefe. Kennfunktionen bildende Verfahren dagegen ermöglichen sehr detaillierte, tiefendiagnostische Einblicke in die mechanischen Phänomene rotierender Maschinen. Dabei werden charakteristische Frequenzmuster überprüft, die für Unregelmäßigkeiten an Antriebselementen typisch sind. Mittels Ordnungsanalyse ist die Diagnose an drehzahlvariabel betriebenen Antrieben durchführbar.

Zur Automatisierung der Maschinendiagnose gibt es verschiedene Ansätze. Die GfM ist mit der konsequenten Anwendung der DVS-Analyse sehr erfolgreich. Industrie 4.0 gibt der Automatisierung eine zusätzliche Motivation, da Diagnoseergebnisse zwingend vollautomatisch in digitaler Form vorliegen müssen. Auch steigen die Anforderungen an die Diagnosezuverlässigkeit, während gleichzeitig hohe Gesamtübersetzungen in kompakten Getrieben zu vielen kinematische Frequenzen mit Harmonischen und Seitenbändern führen, die schwer trennbar sind.

1 Warum überwacht man ausgerechnet Schwingungen?

Der Begriff Condition Monitoring suggeriert grundsätzlich sehr viele verschiedene Mess- und Analysemethoden. Tatsächlich beschränkt sich die Maschinendiagnostik an mechanischen Antrieben zum Zweck der Frühfehlerdiagnose häufig auf die Analyse der mechanischen Schwingungen. Das resultiert daraus, dass Schwingungen sehr viele Informationen, insbesondere über mechanische Phänomene, enthalten. Schwingungen breiten sich außerdem sehr gut aus, sind leicht zu messen und gut zu interpretieren.

Die Messung erfolgt überwiegend mit piezoelektrischen Beschleunigungssensoren, die primär eine der Kraft äquivalente Ladung erzeugen. Diese wird meist mit Hilfe eines im Sensor integrierten Ladungsverstärkers in ein Spannungssignal gewandelt. Die Stromversorgung dieses Verstärkers erfolgt über die Messleitung. Piezoelektrische Beschleunigungssensoren sind hinreichend genau und decken einen sehr großen Messbereich ab. Außerdem sind die robust, leicht zu installieren und preiswert. Kabellängen bis etwa 100 Meter sind absolut unproblematisch.

Doch auch Sensoren, die auf alternativen Mess- und Signalübertragungsprinzipien basieren, finden durchaus Verwendung.

2 Kenngrößenüberwachung

Die Beschreibung des Maschinenzustands anhand von Kenngrößen ist seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts gebräuchlich und partiell erfolgreich. Zu den bekanntesten Anwendungen dürfte die inzwischen zurückgezogenen VDI-Richtlinie 2056 gehören. Dort wurde ursprünglich der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit genutzt, um den Einfluss rotierender Maschinen auf die Fundamentierung von Elektromaschinen zu beschreiben. Doch auch auf andere Messobjekte wurden diese Vorschrift angewandt. Die Inhalte der VDI-Richtlinie 2056 sind in die DIN ISO 10816 eingeflossen. Ergänzend ist die Überwachung des Effektivwerts der Schwingbeschleunigung interessant. Hier werden höherfrequente Erscheinungen deutlicher visualisiert.

Während im Effektivwert sinusförmige Schwingungen sehr gut abgebildet werden, werden stoßimpulsförmige Schwingungen eher im Spitzenwert der Schwingbeschleunigung repräsentiert. Das trifft auf Effekte durch beginnende Wälzlagerunregelmäßigkeiten zu. Diese Kenngröße ist dadurch für die Wälzlagerdiagnose interessant, unterliegt aber wie alle Kenngrößen sehr stark dem Einfluss von Schwingungen anderer Erreger, was eine Differenzierung von Schwingungsursachen und damit die Zuordnung von Schwingungen zu bestimmten mechanischen Ursachen erschwert oder verhindert.

Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe spezieller Diagnosekenngrößen, meist für die Wälzlagerdiagnose, z.B. Crestfaktor, $K(t)$ bzw. $DK(t)$, Kurtosis, SPM, Spike Energy, BCU oder auch SEE, eine Kenngröße, die extrem hochfrequente Schwingungen nutzt.

Die Überwachung von Kenngrößen lässt eine schnelle Reaktion zu und erfordert keine Kenntnis der kinematischen Zusammenhänge des Antriebs. Die Diagnose ist allerdings unscharf. Schadensart und -ort sind in der Regel, abhängig von der Komplexität des Antriebs, nicht eindeutig bestimmbar.

3 Frequenzselektive Überwachung

Wesentlich aussagefähiger als die Kenngrößenüberwachung ist die frequenzselektive Überwachung von Schwingungen. Hier ist der Rückschluss auf den jeweiligen Verursacher anhand der kinematischen Frequenz möglich. Schadensart und -ort sind exakt bestimmbar. Die Analysewerkzeuge sind Kennfunktionen, nämlich das Spektrum zur Analyse energiereicher sinusförmiger Schwingungen sowie das Hüllkurvenspektrum zur Analyse stoßimpulsförmiger Schwingungsereignisse.

Im Spektrum sind demnach Unwucht, Ausrichtfehler sowie lokale und umlaufende Flankenformabweichungen an Zahnrädern von Getriebestufen zuverlässig nachweisbar.

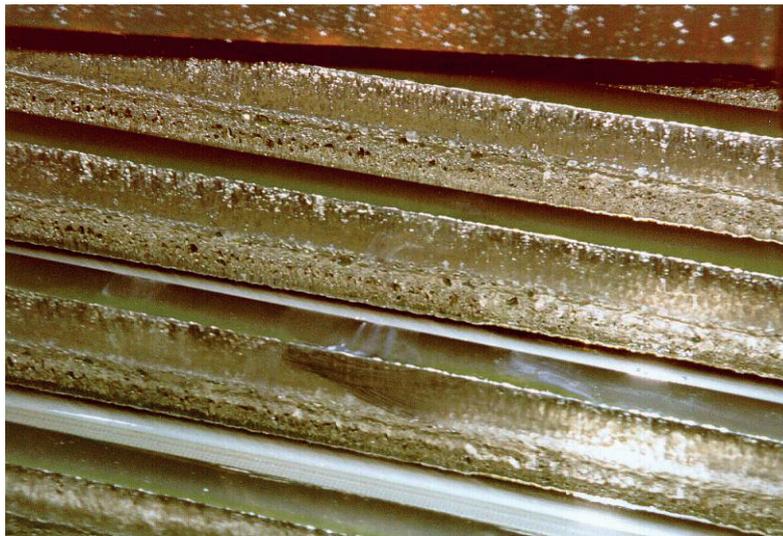


Bild 1: umlaufender Verzahnungsschaden – Pitting, Fressen [2]

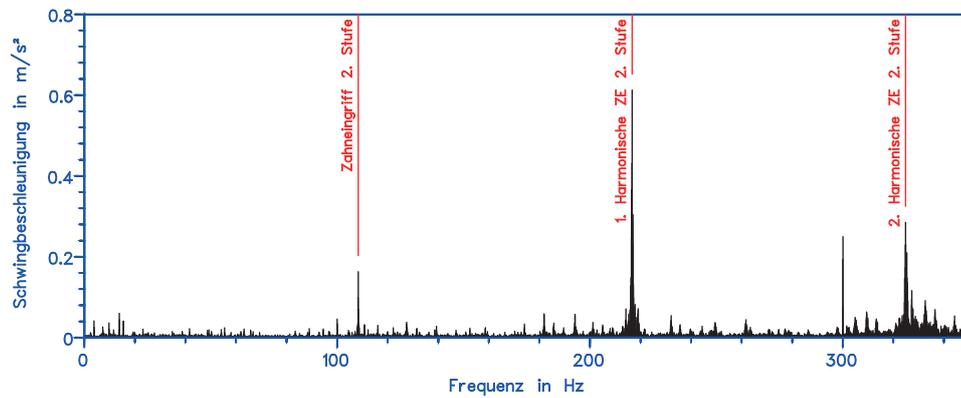


Bild 2: Spektrum bei umlaufendem Zahnflankenschaden. Die Harmonischen zur Zahneingriffsschwingungen sind dominant nachweisbar

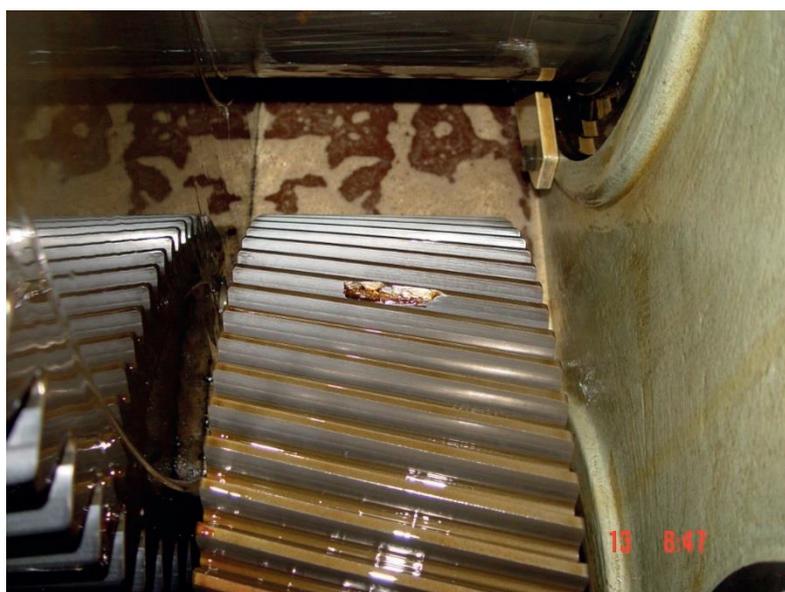


Bild 3: Zahnflankenschaden am Rad der schnellen Stufe [1]

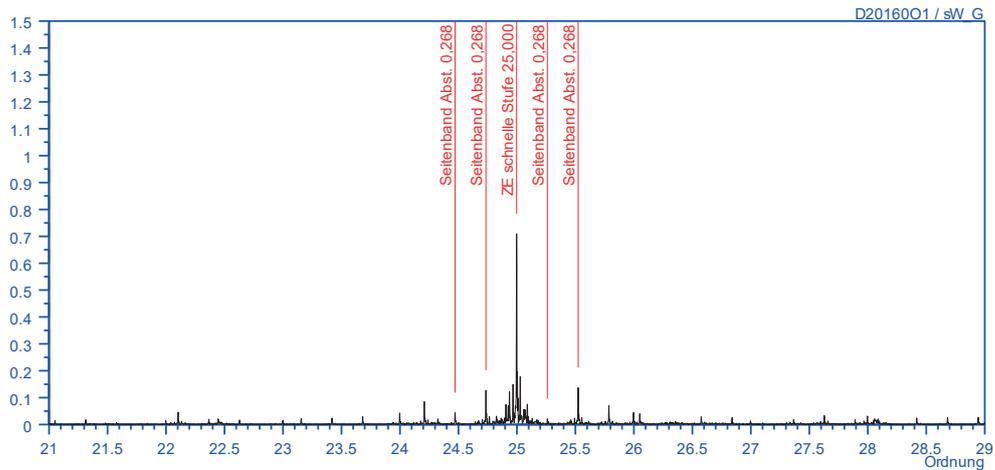


Bild 4: Ordnungsspektrum bei lokalem Zahnflankenschaden. Deutlich erkennbar sind die Seitenbänder zur Zahneingriffsfrequenz im Abstand der Drehfrequenz des geschädigten Zahnrades.

Dagegen findet man im Hüllkurvenspektrum neben Hinweisen auf alle beginnenden Wälzlerschäden auch Hinweise zu Lagersitzproblemen und Wellenanriss.



Bild 5: Ausbruch im Bereich der Passfeder an einer Welle [2]

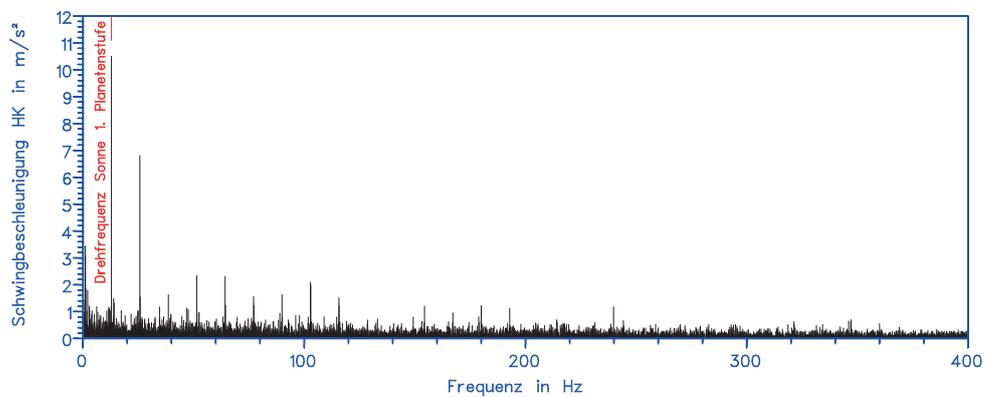


Bild 6: Hüllkurvenspektrum bei Wellenschaden [2]



Bild 7: Ermüdungsschaden am Außenring eines Wälzlagers

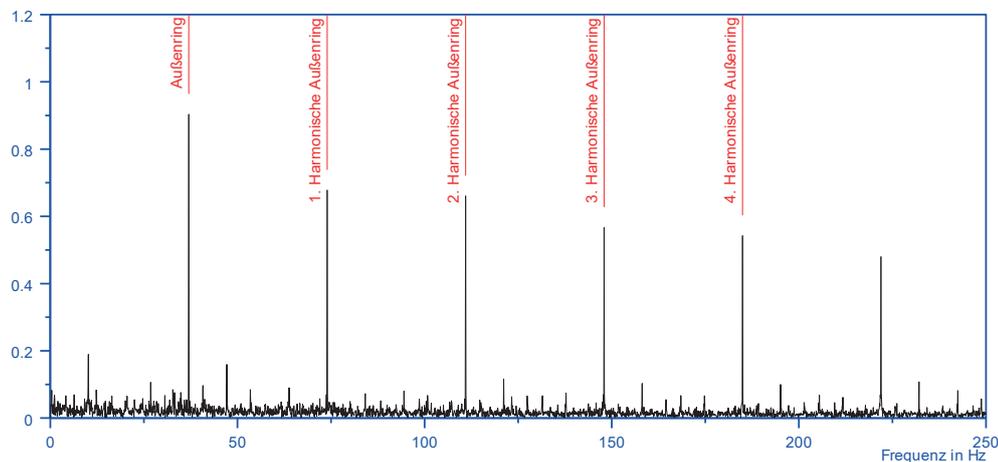


Bild 8: Hüllkurvenspektrum bei einem Wälzlageraußenringsschaden

Die frequenzselektive Überwachung erfordert eine gewisse Datenmenge und erfolgt damit zwangsläufig etwas zeitverzögert. Zwingend erforderlich sind die Kenntnis der kinematischen Zusammenhänge des Antriebs sowie – abhängig von der Automatisierungstiefe des jeweiligen Systems – ein gewisses Maß an Diagnosewissen.

4 Ordnungsanalyse

Die Frequenzanalyse basiert auf zeitsynchron erfassten Daten. Für drehzahlkonstant betriebene Antriebe ist das ausreichend. Da kinematisch bedingte Schwingungen jedoch nicht zeitsynchron, sondern Drehzahlsynchron erzeugt werden, führt die Frequenzanalyse schon bei minimaler Drehzahlwelligkeit zur Verteilung von Spektralanteilen über einen mehr oder weniger großen Bereich von Spektrallinien. Für die Interpretation von Spektren ist das hinderlich.

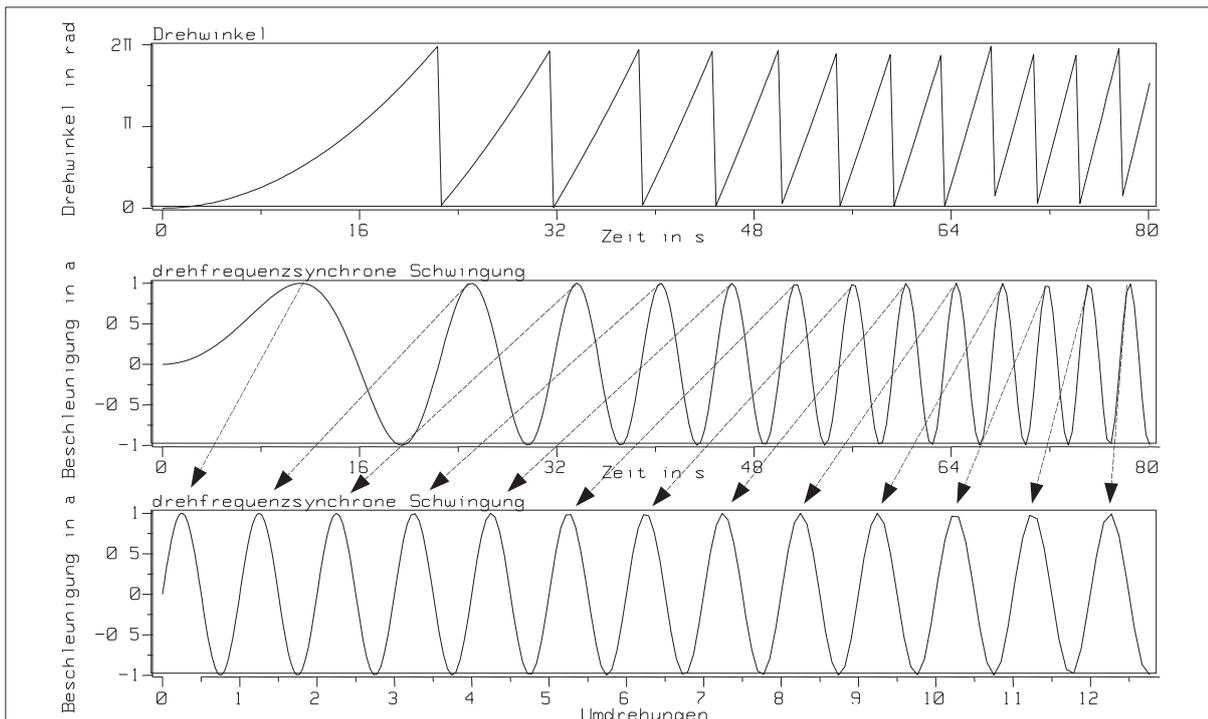


Bild 9: drehfrequenzsynchrone Schwingung zeit- und drehwinkelbasiert

Eine Lösung liefert die Ordnungsanalyse. Schwingungen werden nicht zeitsynchron, sondern drehwinkelsynchron erfasst. Die von diesem Signal gebildeten Spektren nennt man Ordnungsspektren bzw. Hüllkurvenordnungsspektren. Es muss der Bezug zu einer Referenzwelle hergestellt werden, welche dann die Ordnung Eins hat.

Tatsächlich ist der praktizierte Weg, Schwingungen zeitsynchron zu erfassen und gleichzeitig den Verlauf der Drehzahl über der Zeit zu speichern. Auf der Basis des aufgezeichneten Drehzahlverlaufs wird das Schwingungssignal einer Neuabtastung unterzogen.

Das folgende Beispiel stammt aus einer Schwingungsdiagnose an einer drehzahlkonstanten Windenergieanlage.

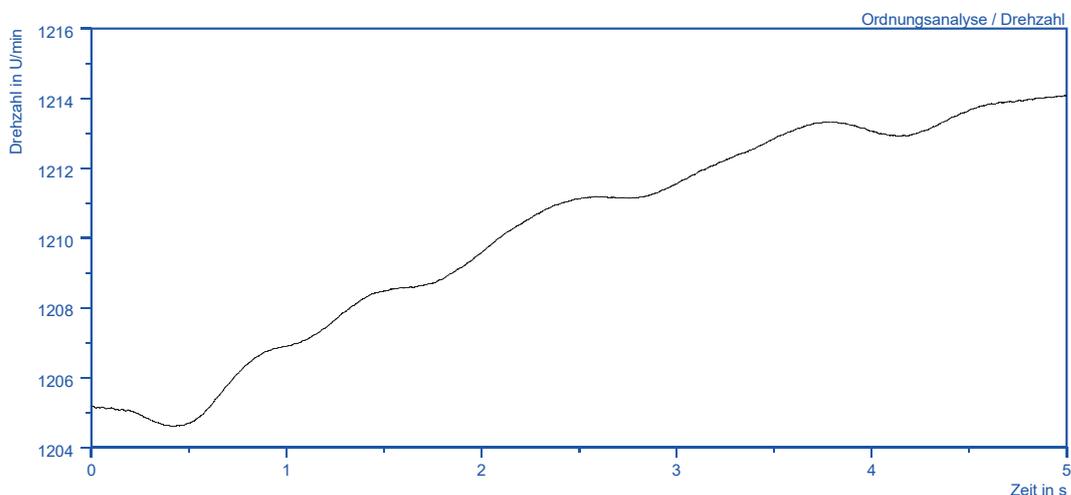


Bild 10: Drehzahl als Funktion der Zeit von einer drehzahlkonstanten Windenergieanlage

Während der Datenerfassung, hier über fünf Sekunden, variierte die Drehzahl zwischen 1205 und 1214 Umdrehungen pro Minute, lag also im Mittel bei 1209 Umdrehungen pro Minute. Die Drehzahlwelligkeit lag also hier bei lediglich 0,7 Prozent. Die Drehzahländerung verläuft nicht monoton.

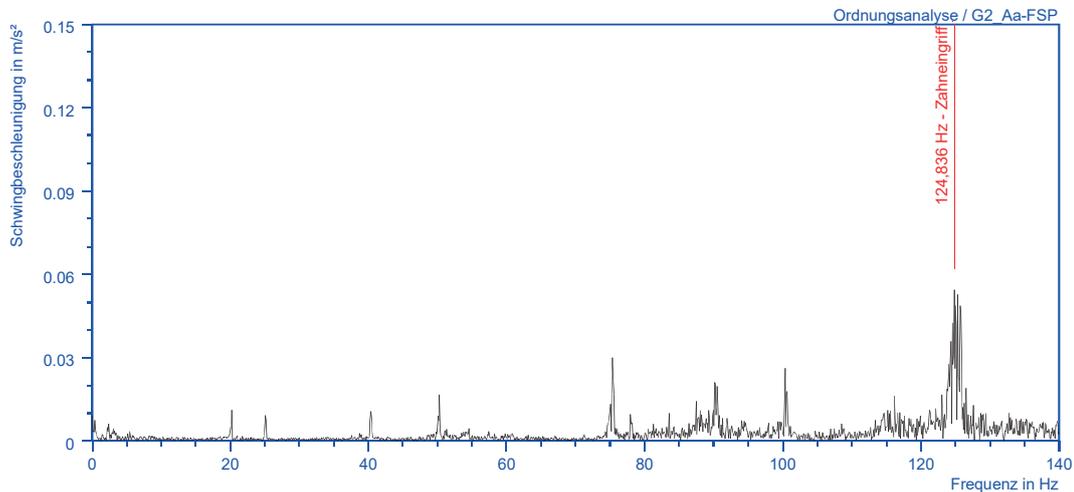


Bild 11: Frequenzspektrum von einer drehzahlkonstanten Windenergieanlage

Im Frequenzspektrum ist der Zahneingriffsspeak bei einer Frequenz von 124,836 Hz zwar ungefähr zu erahnen, jedoch verteilt er sich durch die Drehzahlwelligkeit auf einen Frequenzbereich, der bei 123,912 Hz beginnt und bei 125,760 Hz endet. Alle Spektren werden mit moderner Signalanalysetechnik sehr hochauflösend dargestellt, also mindestens in 0,1 Hz-Schritten oder noch besser aufgelöst. Das bedeutet, dass sich der Zahneingriffsspeak hier auf 18 Stützstellen bzw. Spektrallinien verteilt. Diese Verteilung ist nicht gleichmäßig, da ja der Drehzahlbereich auch nicht gleichmäßig durchfahren wird. Doch die Möglichkeit der genauen Zuordnung gefundener Spektralanteile wird drastisch eingeschränkt. Ein genaues Ausmessen des Zahneingriffspeaks wird also nicht gelingen. Es ist auch nicht auszumachen, ob zum Zahneingriff Seitenbänder existieren.

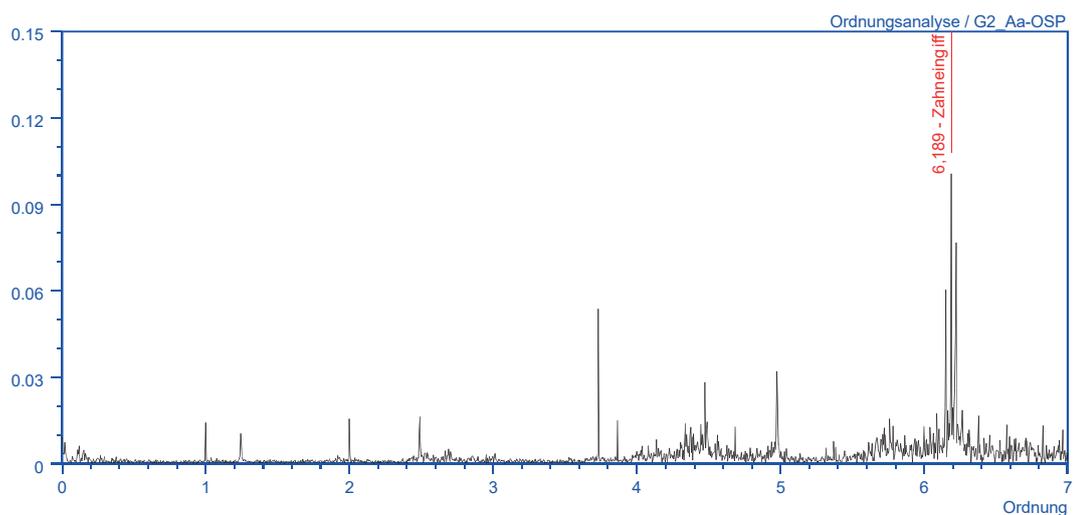


Bild 12: Ordnungsspektrum von einer drehzahlkonstanten Windenergieanlage

Im Ordnungsspektrum desselben Signals dagegen ist der Zahneingriff eindeutig zu erkennen, er wird mit nur einer Linie abgebildet. Man erkennt auch eindeutig Seitenbänder links und rechts zum Zahneingriffsspeak, die hier die Flügelpassierfrequenz der Windenergieanlage repräsentieren.

Darüber hinaus führt die Verwendung des Frequenzspektrums zur Verfälschung der Amplitude, da die Energie der betreffenden Schwingung hier auf mehrere Stützstellen aufgeteilt wird. Die Verwendung des Frequenzspektrums in Verbindung mit der Überwachung der Amplituden auf voreingestellte Grenzwerte oder gar die Ableitung von Alarmschwellen scheint in diesem Zusammenhang äußerst fragwürdig. Im Ordnungsspektrum gibt es dagegen keine derartigen Verfälschungen.

An Antrieben, die planmäßig drehzahlvariabel betrieben werden, ist die Anwendung der Ordnungsanalyse obligatorisch – eine Frequenzanalyse würde nicht zum Ziel führen.

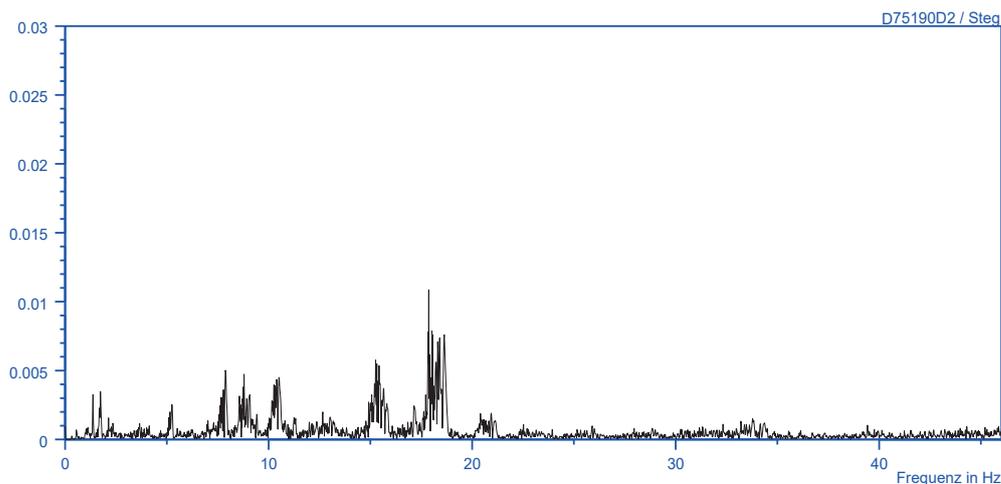


Bild 13: Frequenzspektrum bei Drehzahlvarianz, Schaden am Rotorlager

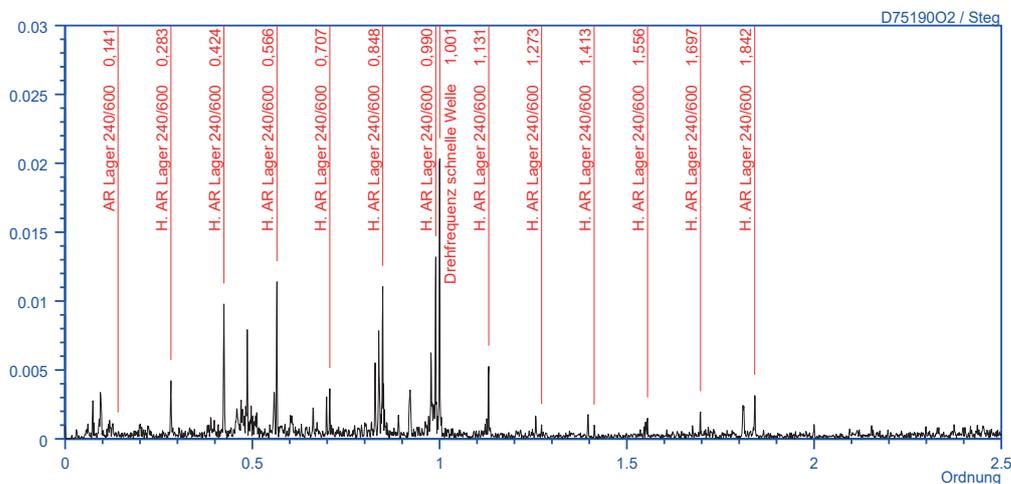


Bild 14: Ordnungsspektrum bei Drehzahlvarianz, Schaden am Rotorlager. Markiert sind die Außenringüberrollfrequenz und Harmonische des Rotorlagers einer WEA.

Die Bilder zeigen das Frequenzspektrum sowie das Ordnungsspektrum desselben Zeitsignals. Im Ordnungsspektrum sind die kinematischen Frequenzen für eine Unregelmäßigkeit am Außenring des Rotorlagers einer WEA markiert. Die Peaks zeigen sich scharf abgegrenzt und sind gut von breitbandigen Schwingungsanteilen zu unterscheiden. Im Frequenzspektrum wäre die Zuordnung praktisch unmöglich.

Dass für die Darstellung eines Wälzlagerschadens hier das Spektrum und nicht das Hüllkurvenspektrum genutzt wurde, hängt damit zusammen, dass sich weit fortgeschrittene Schäden oft deutlicher im Spektrum als im Hüllkurvenspektrum äußern.

5 Automatisierung

Der breite Einsatz von Condition Monitoring ist nur bei automatischer Analyse vorstellbar. Doch während bei der Überwachung von Temperaturen, Drücken und Füllständen Warn- und Alarmschwellen in aller Regel aus dem Prozess resultieren, führen Versuche, die Höhe eines Peaks im Spektrum direkt mit der Schadensgröße zu korrelieren, aus folgenden Gründen eher nicht zum Ziel:

Erstens erfasst ein Diagnosegerät grundsätzlich nur das Abbild der erzeugten Schwingungen. Zweitens werden Einflüsse auf den Schalltransport nicht betrachtet. Dazu gehören die Schwingfreudigkeit der Gehäusestruktur, Dämpfung, der Einfluss der Fundamentierung, Resonanzen und Grenzübergänge. Bei Wälzlagern kommt hinzu, dass die Amplitude des originalen Stoßimpulses abhängig ist von der Lage zum Lastzonenmaximum und der Relativbewegung zu dieser. Darüber hinaus werden Stoßimpulse durch Faltung übertragen. Die Qualität der angeregten Eigenfrequenzen hat Einfluss auf die Amplituden im Hüllkurvenspektrum.

Die im Jahr 2007 als Weißdruck erschienene und 2013 überarbeitete VDI-Richtlinie 3832 nennt Kennwerte und Kennfunktionen zur Beurteilung des Wälzlagerzustands und beschreibt fünf Bewertungstufen des Schadensausmaßes.

Für die Automatisierung tatsächlich zielführend ist die Nutzung bezogener Größen für die Bewertung der Intensität von Peaks.

Eine oft anzutreffende Methode besteht darin, einen klar abgrenzbaren Frequenzbereich, der kinematisch interessant ist, mit einer Amplitudenschwelle zu belegen. Während der Überwachung wird dann lediglich überwacht, ob die so definierte Schwelle im betrachteten Frequenzbereich durch die gemessenen Amplituden überschritten wird. Tritt dieses Ereignis ein, wird ein Alarm generiert. Derartige Schwellen können bei vielen Systemen auch für mehrere Frequenzbänder verschieden definiert werden. So können unterschiedliche Frequenzbereiche individuell behandelt werden. Probleme bereitet jedoch oft das Festlegen der Schwellwerte. Diese haben zwangsläufig subjektiven Charakter. Hier sind hohe Kompetenz und Erfahrung des Bedienpersonals gefragt.

Andere Systeme arbeiten mit Lernmustern. Dazu wird eine Lernphase durchlaufen. In dieser Zeit wird dem Antrieb unterstellt, er sei fehlerfrei und laufe unter repräsentativen Bedingungen. Unter diesen Bedingungen werden zulässige Amplituden für die einzelnen relevanten Schadensfrequenzen erlernt. Die Definition der Alarmschwelle kann dann durch Multiplikation der messtechnisch ermittelten und statistisch abgesicherten Amplitudenwerte mit einem Faktor erfolgen. Werden dann später im realen Betrieb Abweichungen von diesen Lernmustern registriert, wird ein Schadensereignis vermutet. Bei dieser Methode wird Objektivität durch statistische Masse geschaffen. Folglich liegt der Erfolg in der Qualität der Referenzen.

Bei der GfM wurde ein alternativer Weg zur Nutzung bezogener Größen für die Bewertung der Intensität von Peaks basierend auf einer modifizierten Signifikanzanalyse entwickelt, welches in etwa das Herangehen eines Diagnostikers nachbildet. Dieses Verfahren kommt ohne Lernmuster und folglich ohne eine Lernphase aus. Es wird in den Online-Condition-Monitoring-Systemen der GfM unter dem Namen DVS-Analyse eingesetzt und steht ebenso für offline gemessene Daten zur Verfügung. DVS steht für Drive Vibration Significance.

Dabei ist es nicht von Bedeutung, ob eine bestimmte Amplitude erreicht wird, sondern mittels eines allgemeingültigen mathematischen Verfahrens werden Peaks gefunden, die sich deutlich von den anderen Spektralanteilen abheben. Alle Spektren, Hüllkurvenspektren, Ordnungsspektren und Hüllkurvenordnungsspektren werden so auf besonders auffällige Peaks untersucht.

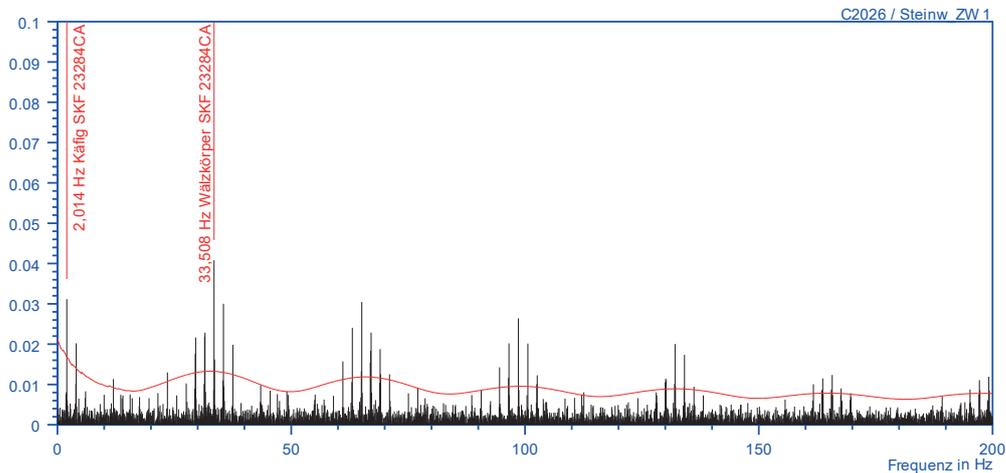


Bild 15: Hüllkurvenspektrum mit Wälzkörperschaden und eingezeichneter Signifikanzschwelle

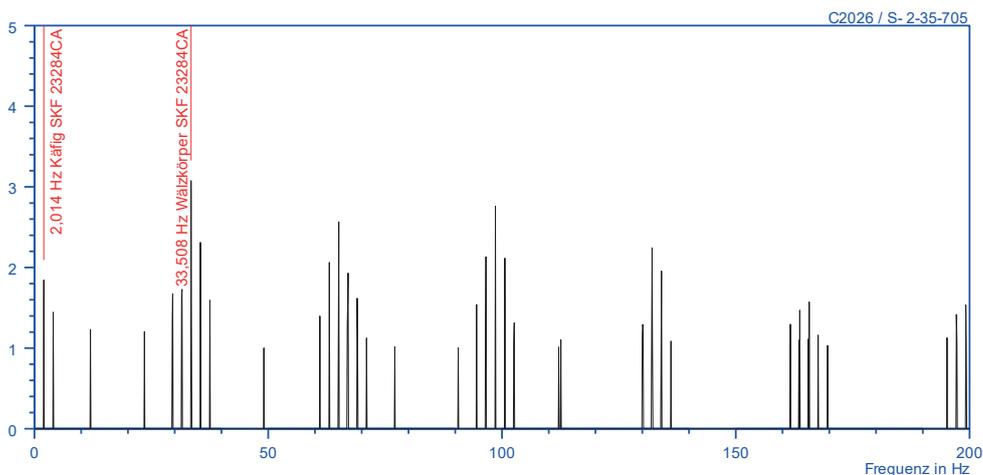


Bild 16: DVS-Hüllkurvenspektrum mit Wälzkörperschaden

Zunächst wird die gleitende Signifikanzschwelle gebildet, die ein Maß für den spektralen Energiegehalt darstellt. Aus dem Quotienten zwischen Spektrum oder Hüllkurvenspektrum und der Signifikanzschwelle wird dann das DVS-Spektrum gebildet. Frequenzen, deren Signifikanz kleiner als 1 ist, werden als „nicht signifikant“ eingeschätzt, sofort ausgeblendet und nicht weiter betrachtet.

Die im DVS-Spektrum oder DVS-Hüllkurvenspektrum auffälligen Peaks werden anschließend anhand der Kinematik des Antriebs auf für Schäden typische Muster untersucht. Dem liegt die jeweilige kinematische Frequenz zugrunde, die über einen einstellbaren Toleranzbereich auf ein Frequenzband erweitert werden kann. Dies ist erforderlich um

- einerseits Rechenungenauigkeiten auszugleichen sowie
- andererseits gerade bei Wälzlagern Schlupf zu kompensieren.

Dieses Verfahren arbeitet also unabhängig von der konkreten Signalintensität, und ist damit bei Teillastbetrieb eines Antriebes genauso erfolgreich wie unter Vollast.

6 Condition Monitoring und Instandhaltung 4.0

Trotz moderner Rechentechnik und leistungsfähigen Datendiensten wird sich der Mensch in der Entscheidungskette mittelfristig nicht ersetzen lassen. Sehr wohl aber können Informationen zielgerichtet und wohldosiert an die jeweiligen Verantwortlichen übermittelt werden. Das soll mit folgendem Bild skizziert werden:

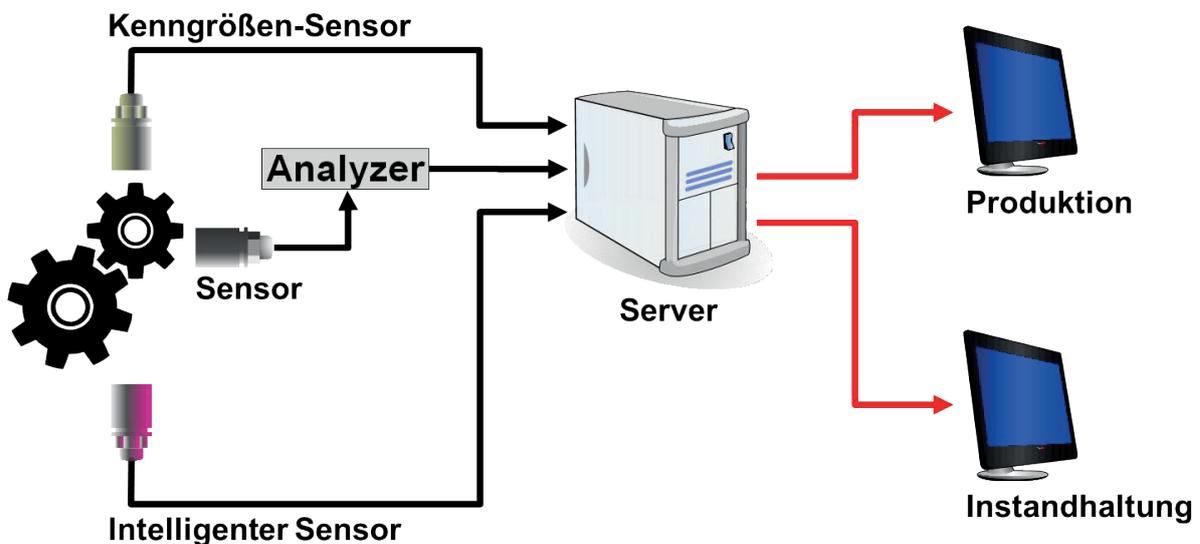


Bild 17: DVS-Hüllkurvenspektrum mit Wälzkörperschaden. Grafiken: www.publicdomainvectors.org

Kenngrößen können direkt im Sensor gebildet und unter Zuhilfenahme von Werkzeugen der mathematischen Statistik bewertet werden. Über die begrenzte Diagnostiefe wurde bereits gesprochen. Für die frequenzselektive Diagnose wird überwiegend das originale Zeitsignal einem Analysator zugeführt, welcher aus dem Schwingungssignal eine Diagnoseaussage generiert. Das ist heute Stand der Technik. In den letzten Jahren gibt es verstärkt Bemühungen, bestimmte Analysefunktionen direkt im Sensor zu applizieren. Das ist ganz sicher der Weg der nächsten Jahre und Jahrzehnte.

Umfangreiche Diagnoseinformationen sollten zweckmäßigerweise der Instandhaltung zugeführt werden. Unter Umständen kann es sinnvoll sein, ausgewählte Informationen direkt der Produktion zuzuführen.

Ein Beispiel für einen intelligenten Sensor wurde durch das Forschungsvorhaben ECoMoS geliefert. Dort wurde das Funktionsmuster für einen kabellosen Sensor entwickelt, der keinen Batteriewechsel benötigt und trotzdem die automatische frequenzselektive Diagnose mit hoher Frequenzauflösung beherrscht. Energie wurde letztlich durch ein Peltier-Element erzeugt, was jedoch nur durch eine extrem energieoptimierte Arbeitsweise ausreichend sein kann.

7 Resümee

Sowohl Online-Condition-Monitoring als auch Offline-Maschinendiagnose haben sich in den letzten 50 Jahren zum festen Bestandteil der zustandsorientierten Instandhaltung entwickelt. Die Kosten für Condition Monitoring setzen sich aus heute meist überschaubaren einmaligen Anschaffungskosten für Systeme sowie aus wiederkehrenden Kosten für die Überwachung zusammen. Systeme kann man erwerben oder bilanzneutral leasen. Um wiederkehrende Kosten niedrig zu halten, ist die Verwendung sehr weit automatisierter Systeme unabdingbar.

Auch wenn Condition Monitoring Primärschädigungen an Antriebselementen nicht verhindern kann, ergibt sich der Nutzen dieser Systeme und Verfahren aus

- der Vermeidung unnötiger Betriebsunterbrechung, weil Instandsetzungsarbeiten langfristig organisiert, Instandsetzungspersonal, Ersatzteile und Hebezeuge beschafft werden können,
- der Möglichkeit der Verschiebung von Instandsetzungen in Perioden mit geringer Auslastung und vor allem
- der Vermeidung von Sekundärschäden bis hin zum Totalverlust der Anlage.

Meist amortisieren sich Condition Monitoring Systeme bereits durch einen einzigen rechtzeitig erkannten Schaden mehrfach. Denn grundsätzlich gilt, dass auch kein Schaden vorhanden ist, wenn im Schwingungssignal keine Symptome auf Schäden nachgewiesen werden können.

8 Literatur

- [1] Stöckl, M: Verzahnungs- und Lagerschäden an Industriegetrieben. Vortrag im Rahmen des Seminars Maschinendiagnose, Berlin, 2008
- [2] Wirth, R.: Maschinendiagnose an Industriegetrieben. Teil II: Signalidentifikation in der Praxis. Antriebstechnik 37(1998), Nr. 11, S.77-81