

Schwingungsdiagnose an Langsamläufern

Die Diagnose des Schädigungszustands von Wälzlagern basiert auf der Erzeugung hochfrequenter, energiearmer Stoßanregungen, die in der Lage sind, bauteilspezifische Eigenschwingungen zu erregen.

☛ Diese Eigenschwingungen können mittels Hüllkurvenanalyse aus dem messbaren Schwingungssignal selektiert und anhand ihrer Wiederholffrequenz eindeutig einem Schädigungszustand zugeordnet werden. Voraussetzung ist jedoch, dass die einzelnen Stoßimpulse in der Lage sind, Eigenschwingungen zu erregen, was je nach Geometrie der Unregelmäßigkeit eine gewisse minimale Überrollgeschwindigkeit erfordert. An sehr langsam laufenden Wälzlagern sind die Bedingungen, die zur Erregung von Eigenschwingungen führen, zum Teil nicht mehr gegeben. Das Werkzeug Hüllkurvenanalyse erweist sich als nicht hinreichend geeignet. Im Folgenden wird daher diskutiert,

inwieweit dies auf Wälzlager an Windenergieanlagen zutrifft und welche Alternativen möglich sind.

Die Begriffe Maschinendiagnose und Condition Monitoring stehen genaugenommen für die Schwingungsdiagnose an mechanischen meist wälzgelagerten Antrieben. Die vom Antrieb emittierten Schwingungen werden zunächst aufgezeichnet, nach ihrer Schwingungsform unterschieden und anschließend nach enthaltenen Frequenzbestandteilen untersucht, die Hinweise auf Unregelmäßigkeiten oder Schäden an den Antrieben geben können. Die Unterscheidung nach der Schwingungsform geschieht durch die Bildung und getrennte Betrachtung von Spektrum und Hüllkurvenspektrum. Sinusförmige Schwingungsanteile sind die Folge von Unwucht, Ausrichtfehlern und Verzahnungsunregelmäßigkeiten. Diese sind im Spektrum des Schwingungssignals eindeutig nachweisbar. Reine Stoßimpulsfolgen dagegen liefern in der Regel keinen entscheidenden Anteil im Spektrum.

Stoßimpulse entstehen durch das metallische Aufeinander-schlagen zweier Körper oder Maschinenelemente. Auch das schnelle Überrollen einer Unregelmäßigkeit auf einer Wälz-lagerlaufbahn, wie in Abbildung 1 dargestellt, erzeugt unter bestimmten Bedingungen zunächst eine nahezu reine Stoßim-



Abbildung 1:
Ermüdungs-
schaden am
Außenring eines
Wälzlagers

pulsfolge. Derartige Stoßimpulse sind dadurch gekennzeichnet, dass sie vergleichsweise hohe Amplituden besitzen, jedoch relativ wenig Energie beinhalten. Reine Stoßimpulse sind als solche in der Regel weder hörbar noch messbar. Man stelle sich vor, dass eine Glocke zweimal pro Sekunde mit einem Klöppel angeschlagen wird. Die Stoßimpulswiederholffrequenz von zwei Hertz wird man schon deshalb nicht hören, weil das menschliche Ohr derart niedrige Frequenzen nicht wahrnehmen kann. Doch auch einen einzelnen Stoßimpuls hört man nicht, weil er infolge seiner sehr hohen Frequenzbestandteile in festen Körpern nicht allzu weit transportiert wird. Das heißt, die Ausbreitung reiner Stoßimpulse ist stark begrenzt. Dennoch hört man das Anschlagen einer Glocke, denn Stoßimpulse sind in der Lage, die in ihrer Umgebung befindliche schwingfähige Struktur zum Schwingen mit deren Eigenfrequenzen anzuregen. Wir hören also nicht originäre Stoßimpulsfolge, sondern die Reaktion des schwingfähigen Systems „Glocke“ auf die Einwirkung der Stoßimpulsfolge. In der Mathematik wird dieser Signalverknüpfungsmechanismus als Faltung bezeichnet. Das schwingfähige System (Glocke) besitzt eine Übertragungsfunktion, auch Impulsantwort genannt, die die Reaktion des Systems auf einen idealen Impuls (Dirac-Impuls) beschreibt.

Reale Stoßimpulse wirken ähnlich, sind aber im Gegensatz zum Dirac-Impuls im Frequenzgang begrenzt, so dass nur niedrige Eigenfrequenzen zum Schwingen angeregt werden. Gleiches geschieht bei einem Laufbahnschaden an einem Wälzlager, der periodisch überrollt wird und somit für das Erzeugen von Stoßimpulsfolgen sorgt. Die Stoßimpulsfolgen regen die schwingfähige Umgebung (Wälzlageraußenring, Lagerbock, bestimmte Teile des Getriebegehäuses) zum Schwingen mit deren Eigenfrequenzen an. Diese Eigenschwingungen werden vergleichsweise gut und auch relativ weit transportiert und sind an der Maschinenoberfläche messbar. Zur Analyse und Visualisierung dieser Faltungssignale ist die reine Spektralanalyse zunächst nicht geeignet – im Spektrum wird man Stoßimpulsfolgen meist nicht nachweisen können. Daher verwendet man ein simples Verfahren, um die Eigenschwingungen, die ja lediglich als Träger der eigentlichen Information, der Stoßimpulsfolge, dienen, zu eliminieren – die Hüllkurvenanalyse.

Verfahren der Hüllkurvenanalyse

Es gibt verschiedene Verfahren der Hüllkurvenanalyse. Sehr einfach und daher sehr weit verbreitet ist die bloße Gleichrichtung des Zeitsignals. Von dem so entstandenen Hüllkurvenzeitsignal bildet man das Spektrum. Somit erhält man das Hüllkurvenspektrum. Ebenfalls üblich ist es, das Zeitsignal vor der Gleichrichtung einer Hochpassfilterung mit einer Grenzfrequenz oberhalb der zweiten Harmonischen der höchsten zu erwartenden Zahneingriffsfrequenz zu unterziehen. So erreicht man, dass niederfrequente sinusförmige Signalbestandteile keinen Anteil im Hüllkurvenspektrum erbringen, was die Analyse transparenter macht.

Tatsächlich erzeugen Schäden an Wälzlägern nur unter bestimmten Bedingungen nahezu reine Stoßimpulsfolgen. Insbesondere bei weit fortgeschrittenen Schäden ist die zeitliche Ausdehnung der Impulse relativ groß. Somit werden zusätzlich sinusförmige Schwingungsbestandteile erzeugt, die deutlich energiereicher sind. Diese sind im Spektrum des Signals nachweisbar und liefern einen Ansatz zur Schadensquantifizierung. Ganz grob gilt nämlich: Ein beginnender Wälzlagerlaufbahnschaden wird ausschließlich im Hüllkurvenspektrum nachweisbar sein. Ist zusätzlich ein Nachweis im Spektrum möglich, muss auf einen fortgeschrittenen Schaden geschlossen werden. Ist der Nachweis dagegen ausschließlich im Spektrum möglich, liegt ein bereits weit fortgeschrittener Schaden vor, der nicht selten bereits mit einem erheblichen Betriebsrisiko für den Antrieb verbunden ist.

Was hier allerdings zunächst nicht betrachtet wurde, sind die verschiedenen möglichen Randbedingungen. Diese wurden in [1] ausführlich untersucht. Demnach beeinflussen

- Größe und Art des Laufbahnschadens, insbesondere die Kantenform,
- die Überrollgeschwindigkeit und
- die wirkende Belastung

die Art des Stoßimpulses, beziehungsweise seine Amplitude und seine Wirkzeit. Gleichzeitig wird der Frequenzgang beeinflusst, denn bei gegebener Amplitude führt eine kurze Wirkzeit zu einem breiten Frequenzgang. Das heißt, der Stoßimpuls beinhaltet von Null an alle Frequenzen bis zu einer relativ hohen Grenzfrequenz. Eine lange Wirkzeit führt dagegen zu einer niedrigen Grenzfrequenz (Abbildung 3). Oben ist der Ausschwingvorgang eines „harten“ Stoßimpulses dargestellt. Er wurde durch Anschlagen eines frei schwingenden Wälzlageraußenrings (NU 1036) mit einem Gegenstand aus Stahl erzeugt. Im zweiten Bild wurde derselbe Wälzlageraußenring mit einem Gegenstand aus Holz angeschlagen. In den unteren Bildern sind die dazugehörigen Spektren abgebildet. Deutlich zu sehen ist, dass es sich um dieselben Frequenzen handelt, die angeregt werden. Allerdings schneidet der „weiche“ Stoßimpuls bei zirka 10 kHz ab.



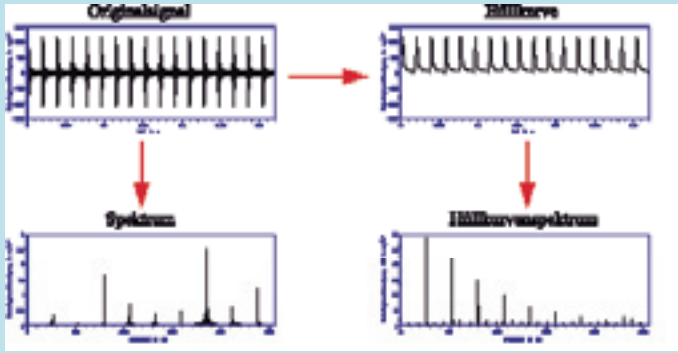


Abbildung 2: Bildung von Spektrum und Hüllkurvenspektrum

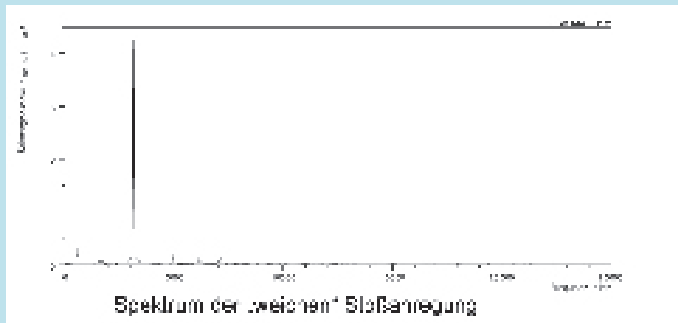
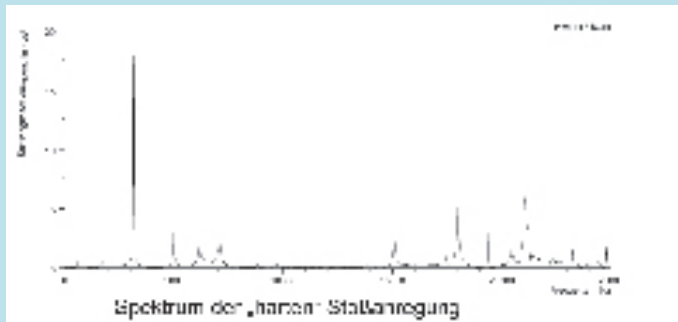
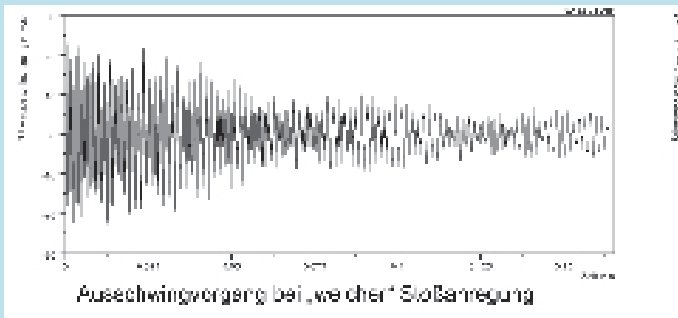
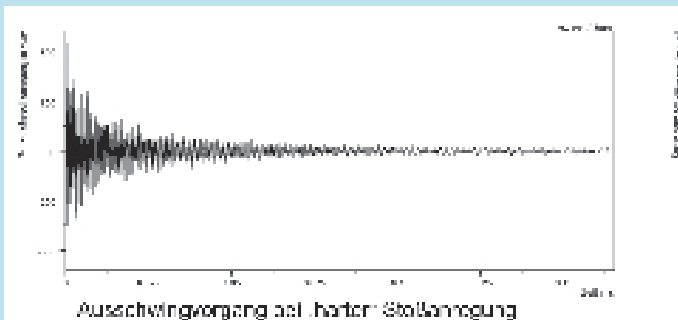


Abbildung 3: Frequenzgang der Impulsantwort bei verschiedenen Formen des Stoßimpulses



Dies hat Auswirkungen auf die Diagnose an extrem langsam laufenden Wälzlagern. Durch das langsame Überrollen einer Unregelmäßigkeit ist die Wirkzeit lang und demzufolge die Grenzfrequenz niedrig. Es können aber nur diejenigen Eigenfrequenzen angeregt werden, die auch im Stoßimpuls enthalten sind. Wenn nun die niedrigsten wirkungsvollen Eigenfrequenzen höher sind als die Grenzfrequenz des Stoßimpulses, wird keine Eigenfrequenz angeregt, und die Hüllkurvenanalyse als sonst so verlässliches Diagnosewerkzeug muss schlichtweg versagen.

Wunsch nach allgemeingültiger Formel

Wo die wirkungsvollen Eigenfrequenzen liegen, lässt sich kaum allgemeingültig bestimmen. Für einfache Strukturen kann man die Eigenfrequenzen näherungsweise abschätzen. Bekannt sind die Näherungsgleichungen für Wälzlager [2]. Für kompliziertere Strukturen – dazu zählt schon ein fest eingespannter oder aufgeschumpfter Lagerring – ist eine analytische Näherung wenig erfolgreich.

In nunmehr mehreren wissenschaftlichen Arbeiten, unter anderem in [1], wurden Ansätze geschaffen, diese Zusammenhänge verallgemeinernd zu beschreiben. Der Wunsch war eine allgemeingültige Formel zur Ermittlung der Grenzdrehzahl, bei deren Unterschreitung die Hüllkurvenanalyse versagt. Die Vielzahl der Einflussgrößen und das unzureichende Wissen darüber lassen jedoch bislang eine allgemeingültige Lösung nicht zu. So sind Diagnostiker gezwungen, allein auf Basis von Erfahrungen zu entscheiden, ob die Hüllkurvenanalyse das richtige Werkzeug ist. Die bisherigen Erfahrungen der GfM Gesellschaft für Maschinendiagnose mbH zeigen, dass die momentan an Windenergieanlagen vorzufindenden Bedingungen keine Probleme bereiten. Wir müssen aber davon ausgehen, dass wir Alternativen zur Hüllkurvenanalyse benötigen, sollten die Drehzahlen und insbesondere die Überrollgeschwindigkeiten in den Wälzlagern bei zukünftigen WEA-Baureihen niedriger werden.

Da das langsame Überrollen von Unregelmäßigkeiten an Wälzlagerlaufbahnen zu energiereicheren sinusförmigen Schwingungen führt, ist eine Detektion von Schäden im Spektrum des Signals grundsätzlich möglich. Erschwert wird dies jedoch dadurch, dass andere sinusförmige Einflüsse wie Unwucht oder Ausrichtfehler und insbesondere alle Zahneingriffsschwingungen an Getrieben, deren Harmonische und Modulationserscheinungen demgegenüber sehr energiereich sind. Die durch Wälzlagerunregelmäßigkeiten erzeugten Peaks in Spektren sind somit vergleichsweise extrem klein und erfordern eine außerordentlich aufmerksame Suche. Dies wirkt sich negativ auf die Diagnosezuverlässigkeit aus und bietet Raum für Fehlinterpretationen.

Ein in der Praxis immer wieder diskutiertes und durchaus praktikables Verfahren ist die Aufzeichnung der Wellenschwingung in zwei zueinander senkrecht stehenden radialen Richtungen. Als Sensoren kommen induktive Wegsensoren infrage. Die Messung muss jeweils an der Welle in unmittelbarer Nähe aller betreffenden Wälzlager erfolgen. Schon daher reduzieren sich die Möglichkeiten bei Windenergieanlagen auf die Rotorwelle, was aber keine Einschränkung darstellt, da alle anderen Wellen an den bekannten Bauformen mit höherer Drehzahl laufen. Die Wellenschwingungsdiagnose basiert darauf, dass sich Unregelmäßigkeiten an Wälzlagern auch in Änderungen der Wellenbahn äußern. Diese sind gering, haben aber auf Grund der Wirkungsweise von Wälzlagerunregelmäßigkeiten periodischen Charakter und führen somit zu detektierbaren Wellenschwingungen. Auf den Abbildungen 4 und 5 erkennt man zunächst, dass die Drehfrequenz deutlich dominiert. Dies ist auch nachvollziehbar, wenn man berücksichtigt, dass auf Grund der Sensibilität des Messverfahrens jede noch so kleine Rundlaufabweichung der Welle extreme Auswirkungen auf das Signal





ADRESSBUCH DER WINDENERGIE 2007

International Directory of Wind Energie 2007



Über 800 Firmeneinträge aus dem In- und Ausland
(zweisprachig deutsch/englisch) – die
Windbranche präsentiert hier ihr Leistungsangebot!

*700 companies worldwide are presenting their
service offers (bilingual in German-English)!*

Bestellung: Hiermit bestelle ich das Adressbuch der Windenergie 2007 zum Preis von 20 € zzgl. 3 € Versandkosten (Bestellungen außerhalb Deutschlands zzgl. 8 € Versandkosten und nur mit Vorkasse oder beigefügtem Scheck über 28€).

Order: We order the bilingual (German-English) International Directory of Wind Energy 2007 for 20 € + 8 € for handling/banking. Orders outside Germany must be paid in advance by bank transfer or cheque enclosed for 28 €.

▲ **Name, Firma / Name, company**

▲ **Straße, Postfach / Street, P.O. Box**

▲ **PLZ, Ort / Address**

▲ **Datum, Unterschrift / Date, signature**

An/Send to: SunMedia Verlags-GmbH, Hans-Böckler-Allee 7, D-30173 Hannover, Fax +49 (0) 511/8550-2500

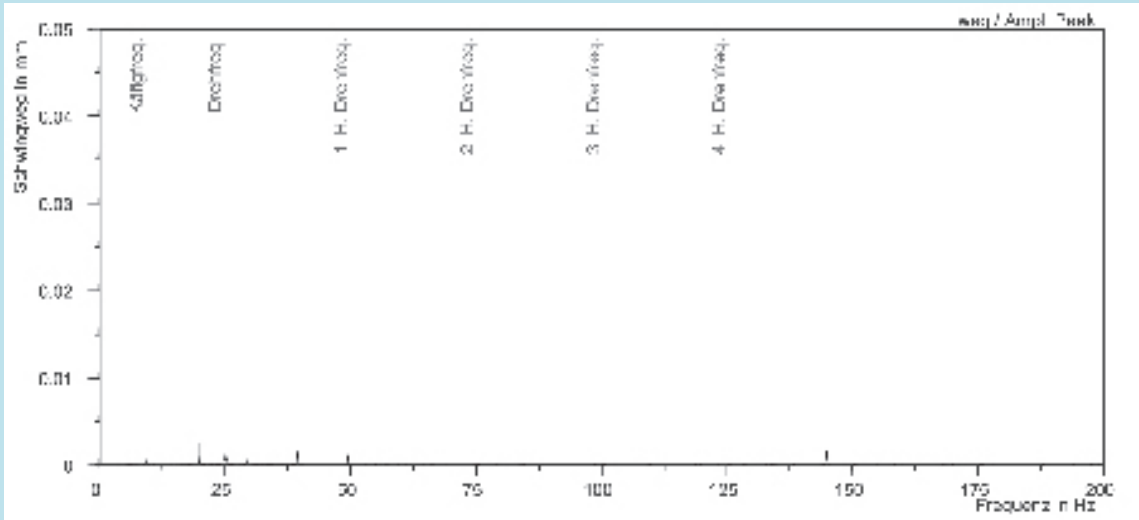


Abbildung 4: Wellenschwingungsspektrum bei Wälzlagerinnenringenschaden

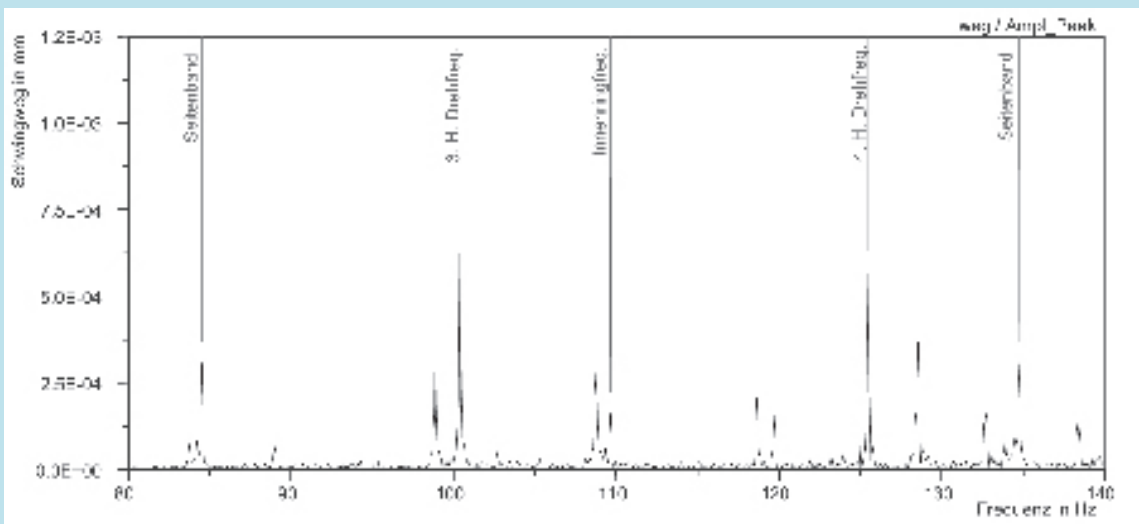


Abbildung 5: Wellenschwingungsspektrum bei Wälzlagerinnenringenschaden, Ausschnitt

haben muss. Doch dies beeinträchtigt die Diagnosemöglichkeiten in keiner Weise, denn die kinematischen Wälzlagerfrequenzen sind fast nie ganzzahlige Vielfache der Drehfrequenz. Vergrößert man den entsprechenden Bereich, so sieht man anschaulich, dass der Innenringpeak mit Seitenbändern im Abstand der Drehfrequenz als für eine Innenringunregelmäßigkeit typisches Muster deutlich abgebildet wird. Die von der GfM angebotenen Geräte sind für die Wellenschwingungsdiagnose vorbereitet. Wenn auch bislang kein Fall im Bereich der Windenergie bekannt ist, bei dem dies zwingend erforderlich wäre, so wären dennoch induktive Wegsensoren sofort anschließbar und könnten in die Analyse einbezogen werden.

Ein weiteres Verfahren ist prinzipiell die Torsionsschwingungsanalyse. Dazu wird eine Drehmomentmessstelle geschaffen, das Drehmoment hochfrequent abgetastet und spektral analysiert. Die Applikation und das Betreiben einer Drehmomentmessstelle ist mit erheblichem technischen Aufwand verbunden. Daher ist die Torsionsschwingungsanalyse für die flächendeckende Anwendung eher ungeeignet.

Zusammenfassung

Die Grenzdrehzahl, bei deren Unterschreitung die Hüllkurvenanalyse als Werkzeug für die Wälzlagerdiagnose versagt, kann momentan nicht allgemeingültig angegeben werden. Als sicher muss aber angenommen werden, dass es eine Grenzdrehzahl gibt und die Möglichkeit besteht, dass perspektivische Baureihen von

WEA diese auch erreichen. Sollte dies eintreten, müssen rechtzeitig alternative Diagnosemethoden zur Verfügung stehen. Die hier dargestellte Wellenschwingungsdiagnose bietet sich dafür an. An derzeit im Einsatz befindlichen WEA ist das Problem der „Langsamläufer“ mit den genannten Einschränkungen für die Wälzlagerdiagnose bislang nicht aufgetreten.



Dr.-Ing. Rainer Wirth

Anschrift des Autors:
Köpenicker Straße 325, Haus 40,
12555 Berlin
Tel. 030/6576 2565
Fax 030/65762564
mobil: 0173/2700708
mailbox@maschinendiagnose.de
www.maschinendiagnose.de

Dr. Rainer Wirth ist geschäftsführender
Gesellschafter der GfM Gesellschaft für
Maschinendiagnose mbH.

Literatur:

- [1] Straub, G.: Zustandsdiagnose an langsamlaufenden Getriebewellen. Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum, 1998
- [2] Halm, G.: Resonanzfrequenzen bei der Untersuchung von Lagerschwingungen. Maschinenbautechnik 22(1973)1, S. 19 - 22