

Stärken- / Schwächenanalyse von Prüfmethoden zur Diagnose von Schäden an Windenergieanlagen

Dipl.-Ing. Jürgen Holzmüller
Dipl.-Ing. Dietmar Obst
Dipl.-Ing. Jochen Ziehmann
Sachverständige in der 8.2-Gruppe

1. Einleitung

Dass auch an Windenergieanlagen Schäden auftreten, ist inzwischen hinlänglich bekannt. Um einerseits die Kosten der erforderlichen Instandsetzungen zu reduzieren und andererseits durch sachgerechte Schadensanalysen eine grundsätzliche Senkung der Ausfallraten zu erreichen, müssen die vorhandenen Schäden frühzeitig diagnostiziert, verifiziert und quantifiziert werden.

Wir Sachverständige von der 8.2-Gruppe werden regelmäßig beauftragt, den Zustand der Hauptkomponenten Hauptlager, Getriebe und Generator zu dokumentieren und hinsichtlich des Instandsetzungsbedarfes zu bewerten.

In diesem Vortrag werden wir im ersten Schritt die von uns angewendeten Prüfmethoden beschreiben, im zweiten Schritt einige ausgewählte Prüfergebnisse präsentieren, im dritten Schritt die Schwächen und Stärken der von uns angewendeten Prüfmethoden analysieren und schließlich im letzten Schritt darstellen, welche Möglichkeiten wir für die Zukunft sehen, Schwächen bei der Prüfmethode ‚Schwingungsanalyse‘ zu beseitigen.

Kurz eine Vorstellung der 8.2-Gruppe:

- Die Gruppe wurde gegründet in 1995 und umfasst derzeit 14 Sachverständige mit sehr breit gefächertem Know-How im Bereich Windenergie
- Wir haben inzwischen mehr als 8000 Technische Prüfungen an WEA bzw. Komponenten durchgeführt.
- Wir erstellen unabhängige Expertisen in folgenden Bereichen: technische Prüfungen / Due Dilligence / Wertgutachten / Spezielle Gutachten / Betriebsoptimierung / Schadensbegutachtungen u. Schadensanalysen

2. Beschreibung der Prüfmethoden

Folgende Prüfmethoden kommen zur Zustandserfassung am Antriebsstrang von Windenergieanlagen zur Anwendung:

- 2.1. Sicht- und Funktionsprüfung aller zugänglichen Bauteile, Sichtprüfung Getriebeverzahnung durch vorhandene Inspektionsöffnungen
- 2.2. Abhören des Antriebsstranges mit einem elektronischen Stethoskop während des Leistungsbetriebs der Anlage
- 2.3. Videoendoskopie des Hauptgetriebes (vereinzelt auch Hauptlager und Generatorwicklungen). Verwendet wird ein Videoendoskop mit flexibler Sonde, 2m Sondenlänge, Sondendurchmesser von 3,9mm.

2.4. Schwingungsanalyse einer Offline-Messung (8-Kanal-Messung, zusätzliche Drehzahlmessung). Verwendet werden Messgeräte der Typen Peakstore und OmegaExpert2. Die Auswertung erfolgt mit eigener 8.2-Analyse-Software (dazu mehr in Kapitel 5)

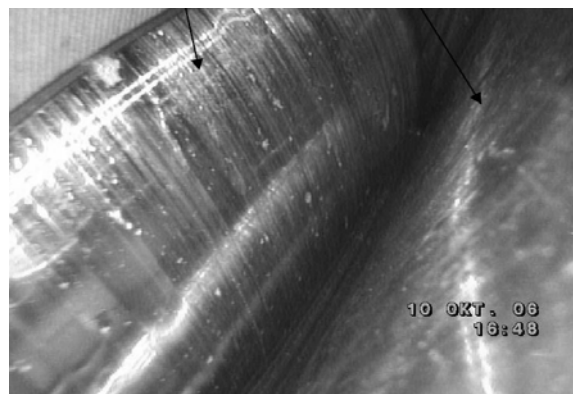
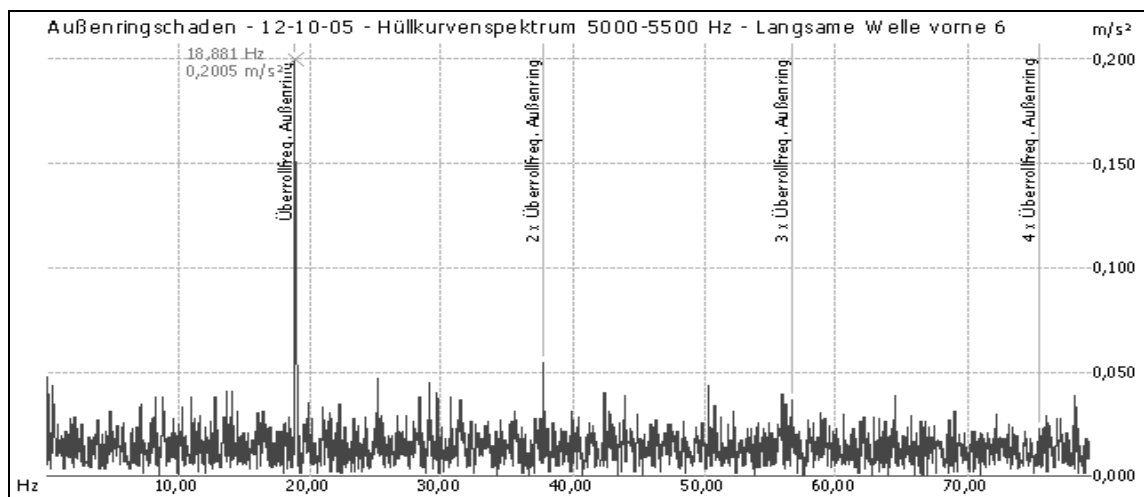
Werden alle Methoden an einem Antriebsstrang angewendet, entstehen hohe Prüfkosten. Über eine Stärken- / Schwächenanalyse soll geklärt werden, ob eventuell auf die Anwendung einer Prüfmethode verzichtet werden könnte, ohne größere Einschränkungen in der Zuverlässigkeit der Aussage hinnehmen zu müssen.

3. Ausgewählte Prüfergebnisse

Welche Prüfergebnisse sind von welcher Prüfmethode zu erwarten? Hier einige Fallbeispiele von tatsächlichen Schäden und den jeweiligen Prüfergebnissen an Hauptgetrieben:

Fallbeispiel 1 / Schaden an einem Lager der langsamen Getriebewelle:

Sichtprüfung und Stethoskop:	keine Anzeichen von Schäden
Videoendoskopie:	Schaden der Kategorie ‚Alarm‘
Schwingungsanalyse:	Außenringschaden der Kategorie ‚Alarm‘

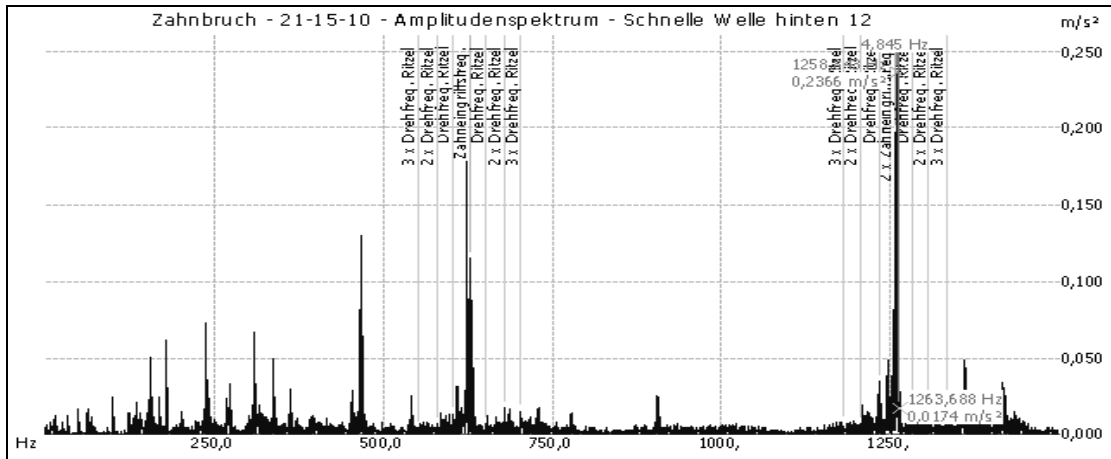


Fallbeispiel 2 / Zahnecke am Ritzel der schnellen Welle abgebrochen:

Sichtprüfung und Stethoskop: Schaden der Kategorie ‚Warnung‘

Videoendoskopie: Schaden der Kategorie ‚Warnung‘

Schwingungsanalyse: keine nennenswerten Auffälligkeiten

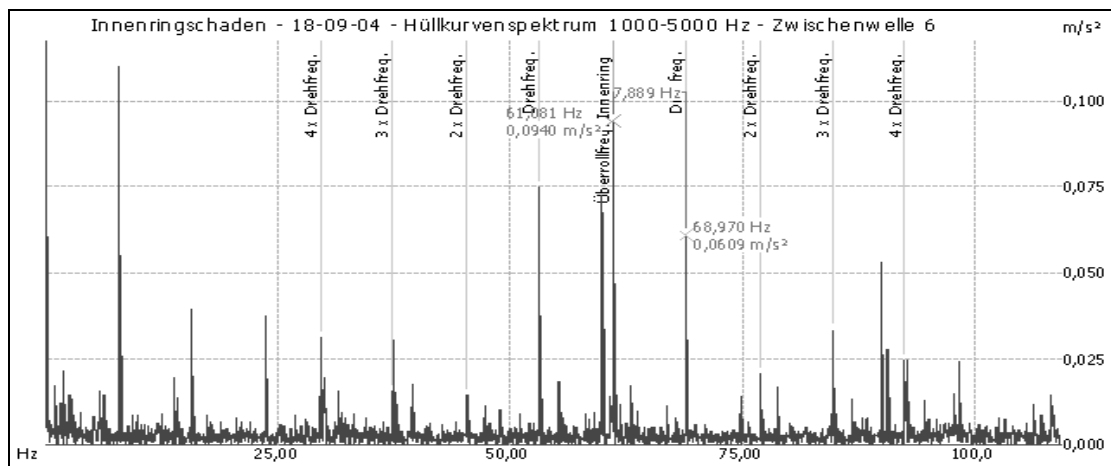


Fallbeispiel 3 / Schaden an einem Lager der Zwischenwelle:

Sichtprüfung und Stethoskop: keine Auffälligkeiten

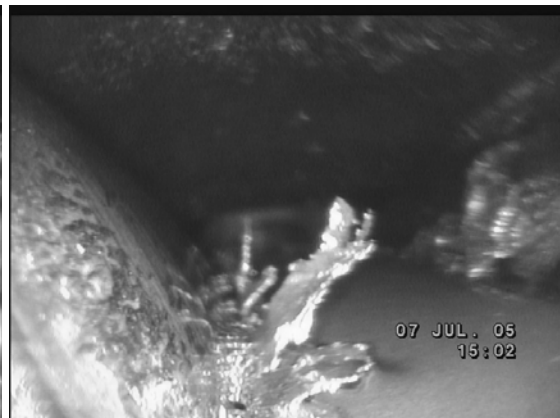
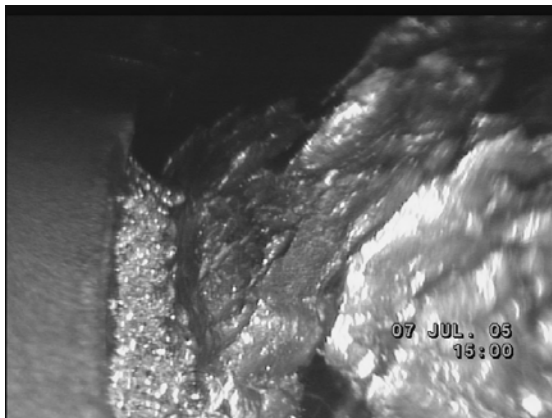
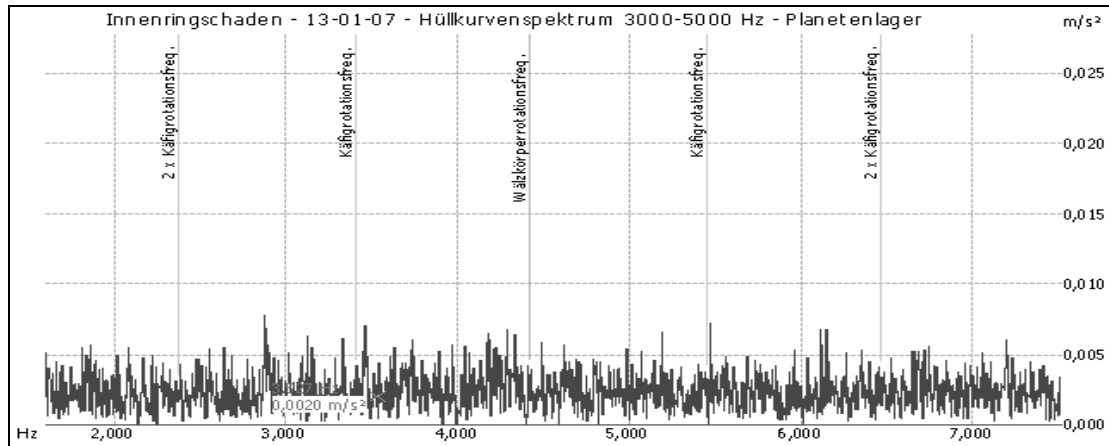
Videoendoskopie: keine Auffälligkeiten (Lager nicht zugänglich)

Schwingungsanalyse: Schadensmerkmale der Kategorie ‚Warnung‘



Fallbeispiel 4 / Schaden an einem Planetenlager:

Stethoskop: keine Anzeichen von Schäden
Videoendoskopie: Schaden der Kategorie ‚Alarm‘
Schwingungsanalyse: keine Anzeichen von Schäden



4. Statistische Auswertung der Prüfmethode

Die in den Fallbeispielen angedeuteten Schwächen und Stärken der jeweiligen Prüfmethode werden durch eine statistische Auswertung von 385 Prüfberichten (Stichtag 31. Juli 2006) bestätigt. Bei den Auswertungen wurden nur Ergebnisse von Windenergieanlagen mit Hauptgetriebe und mit einer Nennleistung ≥ 1000 kW berücksichtigt. Die detektierten Auffälligkeiten und Schäden wurden in 5 Kategorien eingeteilt (O.K. / Beobachten / Warnung / Alarm / Bruch), von denen hier nur die Daten der drei mittleren Kategorien aufgeführt werden.

In der folgenden Tabelle werden die prozentualen Häufigkeiten der detektierten Auffälligkeiten und Schäden (aufgegliedert nach einzelnen Baugruppen des Antriebsstranges) ausgewiesen:

Prüfmethode Datensätze	Sichtprfg. + Stethoskop 76				Endoskopien 95				Schwingungsanalysen 214			
	Beob.	Warn.	Alarm	Ges.	Beob.	Warn.	Alarm	Ges.	Beob.	Warn.	Alarm	Ges.
Kategorien												
Rotorwelle	0%	1%	0%	1%					5%	3%	0%	7%
Hauptlager	1%	0%	0%	1%					3%	0%	0%	4%
Getriebe allg.	9%	5%	0%	14%	1%	1%	3%	5%	1%	0%	0%	1%
Planetenst. allg.	1%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	6%	3%	0%	9%
Planetenst. Lager	0%	0%	0%	0%	31%	9%	7%	47%	6%	2%	1%	9%
Planetenst. Verz.	0%	0%	0%	0%	28%	21%	11%	60%	32%	14%	1%	48%
Stirnradst. allg.	16%	3%	0%	18%	4%	1%	2%	7%	21%	4%	0%	26%
Lgs. Welle Lager	1%	0%	0%	1%	33%	8%	5%	46%	5%	1%	1%	8%
Lgs. Welle Verz.	25%	3%	0%	28%	23%	7%	3%	34%	6%	1%	0%	7%
Zwi-welle Lager	0%	0%	0%	0%	22%	7%	4%	34%	20%	7%	2%	29%
Zwi-welle Verz.	21%	3%	0%	24%	27%	8%	4%	40%	16%	1%	0%	17%
Schn. Welle Lager	8%	7%	0%	14%	38%	9%	13%	60%	30%	12%	8%	51%
Schn. Welle Verz.	29%	3%	0%	32%	22%	3%	4%	29%	23%	5%	1%	29%
Generatorwelle	0%	0%	0%	0%					35%	10%	2%	46%
Generatorlager	14%	5%	0%	20%					28%	23%	20%	71%

Es sind insbesondere folgende Unterschiede in den Prüfergebnissen zu erkennen:

- Etwaige Schädigungen an Hauptwelle und Hauptlager werden derzeit nur durch die Schwingungsanalyse zuverlässig erkannt. Die Videoendoskopie findet hier so gut wie keine Anwendung und das Abhören mit dem Stethoskop bringt keine Ergebnisse.
- Etwaige Schädigungen an den Planetenlagern werden nur durch die Videoendoskopie zuverlässig erkannt (47% der untersuchten Getriebe hatten hier Auffälligkeiten). Die Schwingungsanalyse erkennt Schäden an Planetenlagern nur in deutlich geringerem Maße.
- Je schneller ein Lager dreht, desto besser detektiert die Schwingungsanalyse vorhandenen Schädigungen. Bei den Lagern der schnellen Welle liegt die Zahl der detektierten Schäden durch Videoendoskopie oder Schwingungsanalyse in ähnlicher Größenordnung.
- Kommen nur Sichtprüfung und Stethoskop zum Einsatz, werden erheblich weniger Schäden detektiert. Insbesondere eine Einsortierung der Schäden in die Kategorie Alarm ist mangels objektiver Kriterien nicht möglich.
- Etwaige Schädigungen am Generator werden derzeit nur durch die Schwingungsanalyse zuverlässig erkannt. Die Videoendoskopie findet hier keine Anwendung und das Abhören mit dem Stethoskop bringt keine quantitativen und zuverlässigen Ergebnisse.

Stärken- und Schwächenanalyse der Prüfmethoden im Überblick:

	Sichtprüfung / Stethoskop	Video- endoskopie	Schwingungs- analyse
Visualisierung	+	+	-
Hörprobe als Ergebnis	+	-	+
Quantifizierung möglich	-	0	+
Aussagekraft	-	+	0
100%-Prüfung möglich	0	-	+
Zugänglichkeit der Bauteile	-	0	+
Kostenaufwand	+	-	-
Organisatorischer Aufwand	+	+	0

Fazit:

Soll der gesamte Zustand des Antriebsstranges zuverlässig diagnostiziert werden, sollten sowohl die Videoendoskopie als auch die Schwingungsanalyse als Prüfmethode angewendet werden. Die größten Vorteile der Videoendoskopie liegen im Bereich Planetenstufe und langsam laufende Lager im Getriebe; die größten Vorteile der Schwingungsanalyse bei der Zustandserfassung des gesamten Antriebsstranges (Hauptlager-Getriebe-Generator). Beide Prüfungen in Kombination liefern sowohl visuelle als auch quantifizierbare Prüfergebnisse für das Hauptgetriebe und steigern die Interpretationsmöglichkeiten zum Schädigungsmaß dieses Bauteils.

Die Sicht- und Funktionsprüfung sollte als zusätzliches Prüfmodul zusammen mit einer der o.g. Methoden eingesetzt werden, denn der zusätzliche subjektive Eindruck des Prüfers kann ohne viel Mehraufwand entscheidende Zusatzinformationen für die objektive Bewertung der Bauteilschädigung liefern.

5. Algorithmen der Schwingungsanalyse zur Schadensfrüherkennung an langsam laufenden Getriebeteilen (Vergleich mit Online-CMS)

Wie die statistische Auswertung gezeigt hat, sind die herkömmlichen Methoden der Schwingungsanalyse weniger zuverlässig beim Erkennen von Schäden an den langsam laufenden Bauteilen des Getriebes. Eine besondere Herausforderung ist die Diagnose von Unregelmäßigkeiten an den Lagern der Planetenstufen. Die durch Schäden an diesen Bauteilen hervorgerufenen Schwingungspegel sind gegenüber den natürlich auftretenden Schwingungen z.B. des Zahnengriffs der verschiedenen Getriebestufen und daraus resultierender Anregungen der Gehäusestruktur sehr gering.

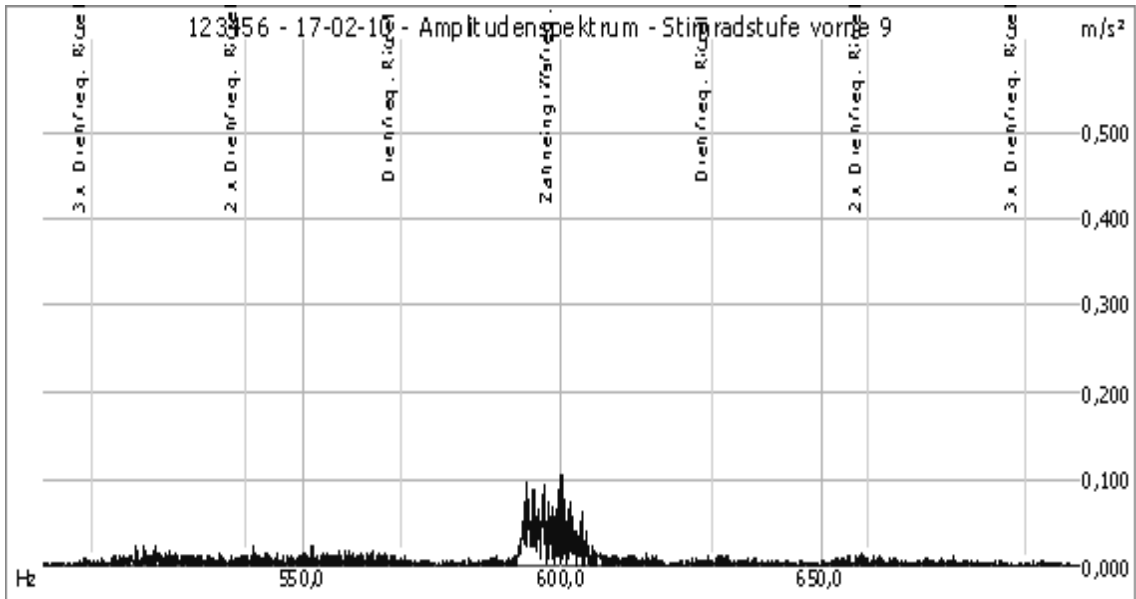
Durch geeignete Analyseverfahren lassen sich diese Schwächen reduzieren. Folgende Ansätze, die bei der 8.2-Analyse-Software bereits umgesetzt sind, versprechen bessere Ergebnisse für die Zukunft:

5.1 Drehzahlnormierung

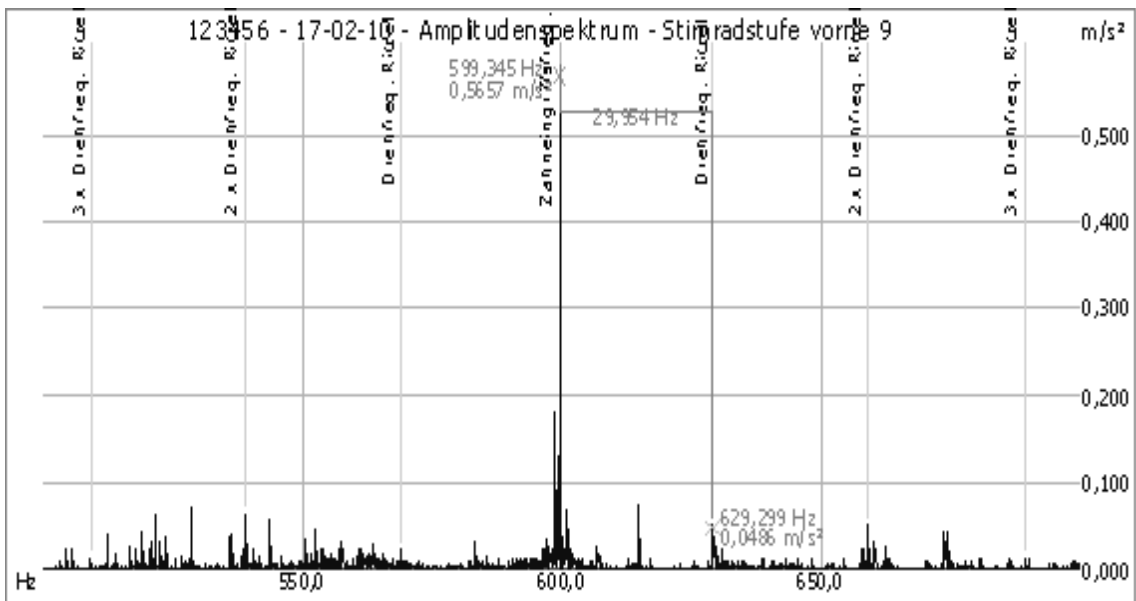
Bei guten Offline-Schwingungsanalysen an Windenergieanlagen ist eine Drehzahlnormierung üblich. Wir möchten sie aufgrund der Wichtigkeit hier dennoch beschreiben, denn ohne sie ist eine sachgerechte Auswertung nicht möglich. Zur Verdeutlichung die folgenden Bilder. Diese zeigen das Drehzahlsignal und zwei Spektren einer drehzahlkonstanten Anlage:



Die Drehzahl schwankte während der Messung kaum. Man könnte also meinen, dass ein einfaches Spektrum zur Auswertung ausreichen würde. Die Praxis zeigt, dass eine Auswertung ohne Normierung auf die Drehzahl nicht sehr aussagekräftig ist.



Dieses Bild zeigt das einfache Spektrum. Die Zahneingriffsfrequenz ist als „diffuser Haufen“ zu sehen. Seitenbänder mit der Ritzelfrequenz fehlen vollkommen.



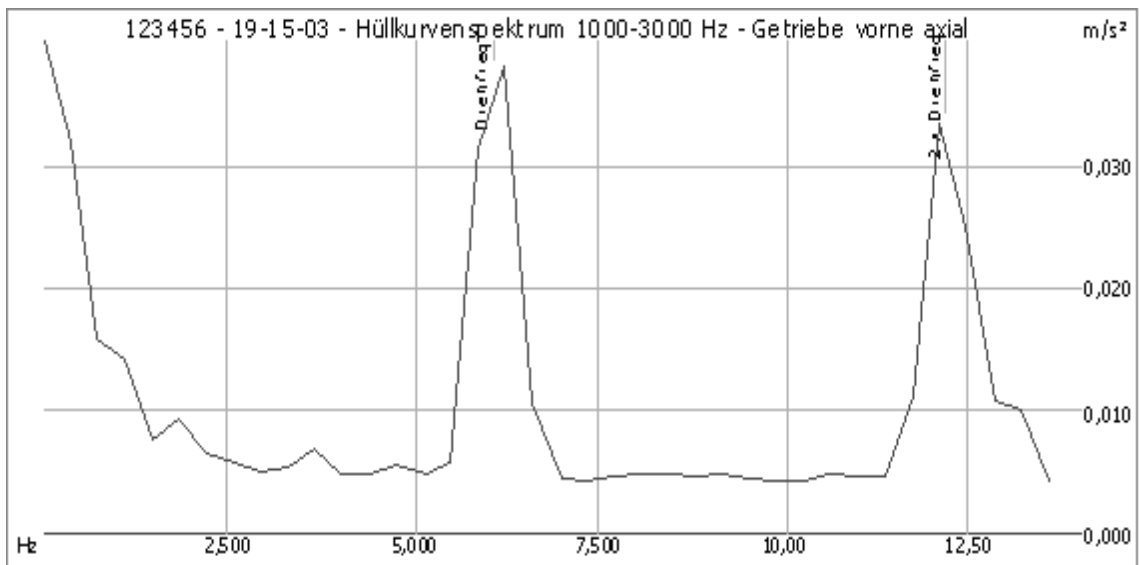
Werden die Messwerte auf die Drehzahl normiert, ist die Zahneingriffsfrequenz als deutliche Spitze mit hohem Pegel zu sehen.

Für die Schadensdiagnose ist es wichtig, auch die Seitenbänder mit der Ritzelfrequenz im Spektrum zu erkennen. Wenn dieser Effekt schon bei drehzahlfesten Anlagen Schwierigkeiten macht, wird er sich bei drehzahlvariablen Anlagen verheerend auswirken. Leider nutzen marktübliche Handgeräte und die meisten Online-CMS diese Technik der Drehzahlnormierung nicht.

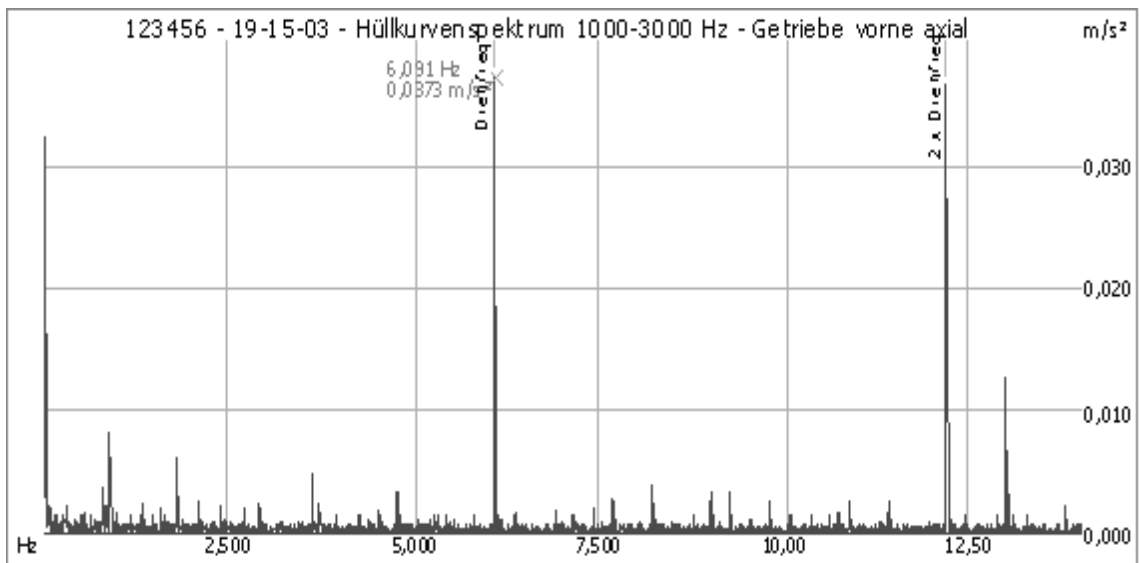
Im Gegensatz zur herkömmlichen Ordnungsanalyse wird bei der 8.2-Analyse-Software auf die Nenndrehzahl der Anlage normiert. So sind die aufgeführten Frequenzen greifbarer als abstrakte Ordnungszahlen.

5.2 Hohe Auflösung

Ein weiterer Vorteil der Offline-Messung gegenüber Online-CMS besteht in der höheren Auflösung im Bereich der Messeinrichtung und insbesondere der 8.2-Analyse-Software. Die Schwingungen an den Bauteilen der langsamen Getriebeseite werden fünf Minuten lang mit hoher Abtastrate direkt auf die Festplatte eines Notebooks aufgezeichnet; bei gleichzeitiger Messung auf 8 Kanälen entstehen dadurch ca. 100 Mbyte Daten. Die Auswertung erfolgt am PC im Labor. Dies ergibt ganz andere Möglichkeiten als mit einem begrenzten Speicher und begrenzten Übertragungskapazitäten an der Anlage. Derzeitige Online-CMS oder auch Handgeräte können Spektren mit max. 16000 Linien darstellen. Das 8.2-Analyse-System arbeitet mit ca. 1,5 Millionen Spektrallinien. Der Unterschied ist signifikant und wird schematisch in den folgenden beiden Bildern dargestellt:



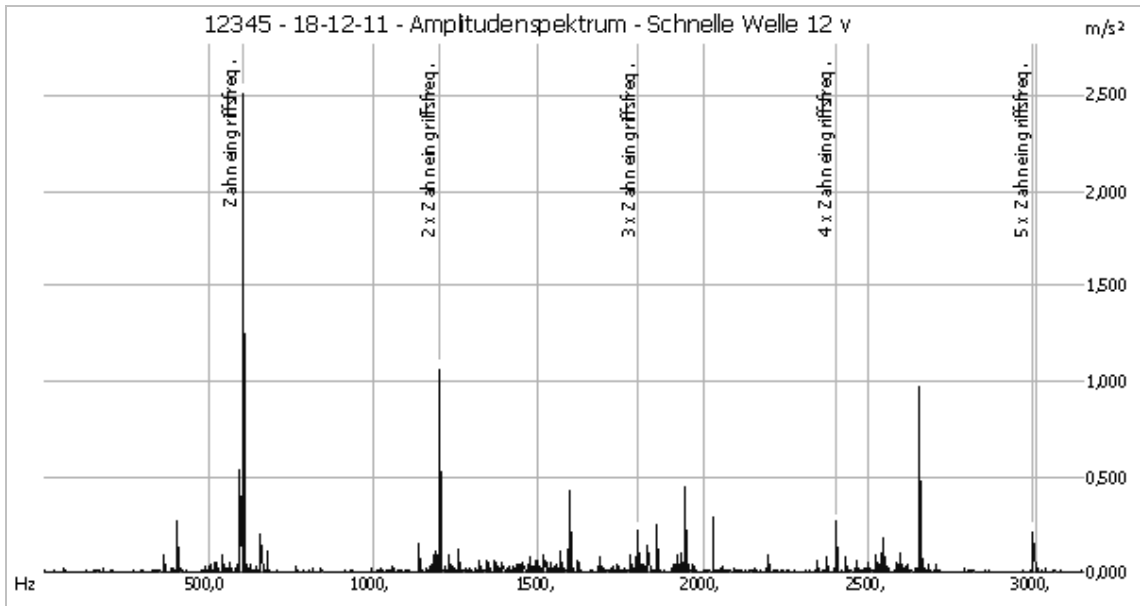
Auflösung eines Online-CMS bzw. Handgerätes (schematisch).



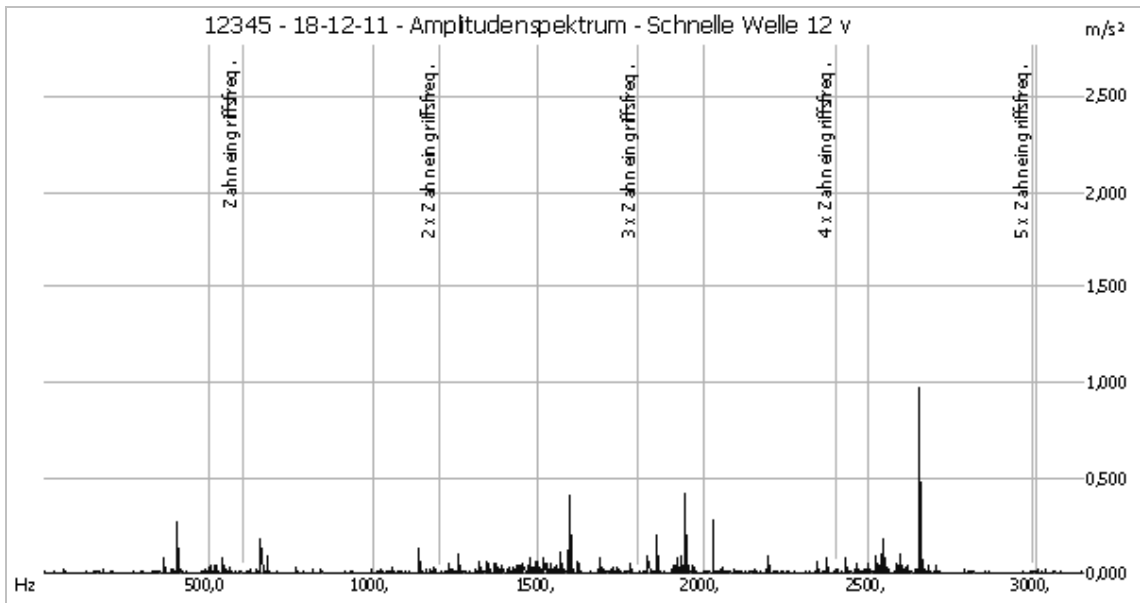
Auflösung des 8.2-Analyse-Systems

5.3 Entfernen von störenden Frequenzen vor der Hüllkurvenbildung

Die Schwingungen, die durch beginnende Lagerschäden hervorgerufen werden, sind erheblich schwächer als die Schwingungen des Zahneingriffs mit vergleichsweise hohem Pegel. Herkömmliche Systeme versuchen daher, vor der Hüllkurvenbildung diese störenden Frequenzen durch breitbandige Hoch- oder Bandpassfilter zu entfernen. Bei den meisten Systemen werden alle Frequenzen unterhalb 2.000 Hz abgeschnitten. Das 8.2-Analyse-System ist in der Lage, ganz gezielt die Zahneingriffsfrequenzen schmalbandig zu entfernen, ohne die übrigen Frequenzen zu verfälschen:



Normales Spektrum



Gleiches Spektrum nach gezielter Entfernung der Zahneingriffsfrequenzen

Aus dem bereinigten Signal wird nun eine Hüllkurve gebildet, die das Auffinden von Schäden an langsam laufenden Lagern erheblich erleichtert.

5.4 Wahl der richtigen Hüllkurvenparameter

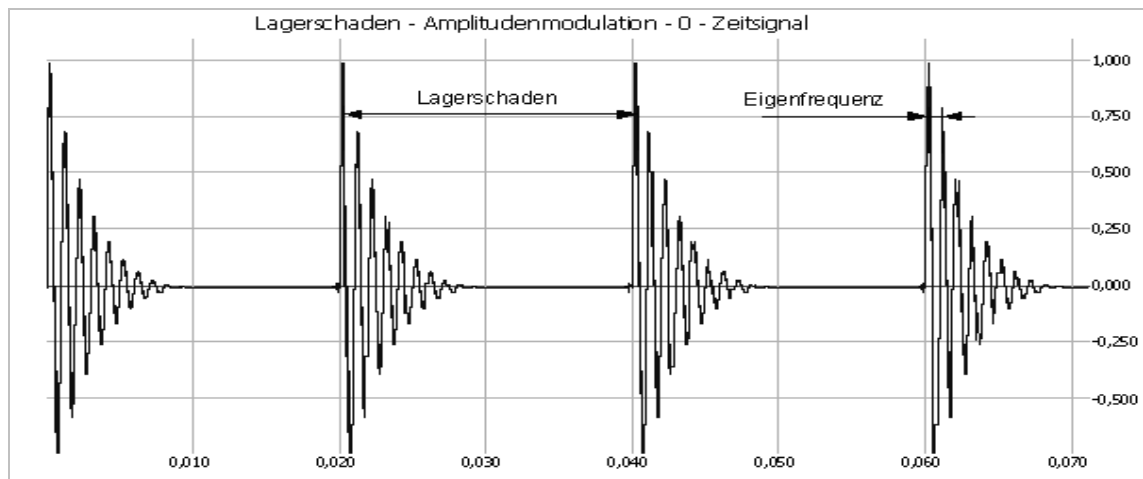
Bei jeder Überrollung eines Lagerschadens wird in der Regel die umgebende Struktur zu Schwingungen angeregt. Um diesen Vorgang besser zu verstehen, sollte man sich das Geräusch vorstellen, das entsteht, wenn man mit einem Löffel regelmäßig gegen ein Weinglas schlägt.

Es entstehen zwei Frequenzen:

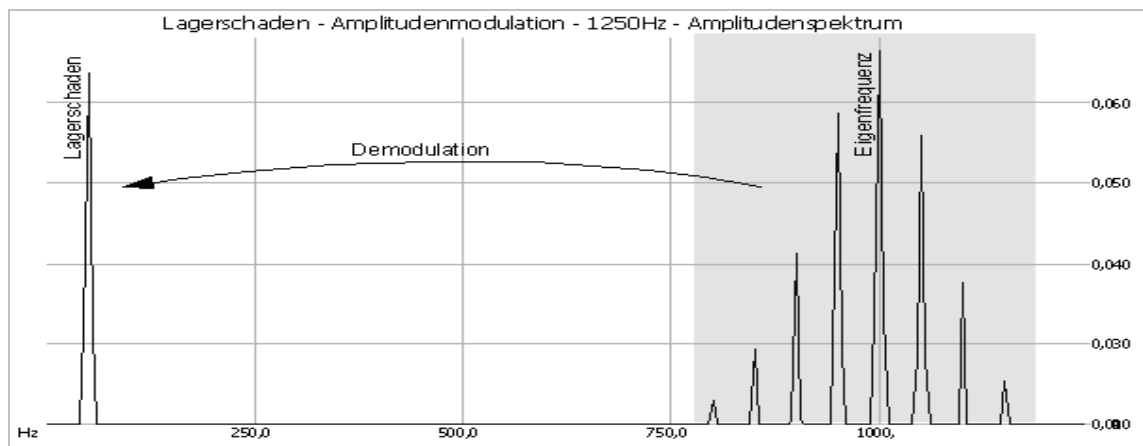
- Das regelmäßige Schlagen (Entspricht der Überrollfrequenz des Schadens). Es handelt sich dabei um eine vergleichsweise tiefe Frequenz
- Das hohe Klingen des Glases (Die Eigenfrequenz der umgebenden Struktur), hohe Frequenzen

Die erwartete Überrollfrequenz des Schadens lässt sich aus den Lager- und Getriebedaten berechnen. Die Eigenfrequenz ist in der Regel nicht bekannt und nur sehr aufwendig zu bestimmen.

Man spricht hier von einer „Amplitudenmodulation“. Die tiefe Frequenz ist dabei der hohen Frequenz aufmoduliert. Die Eigenfrequenz wird bei jedem Anschlagen einmal kurz sehr laut und danach wieder ganz leise.



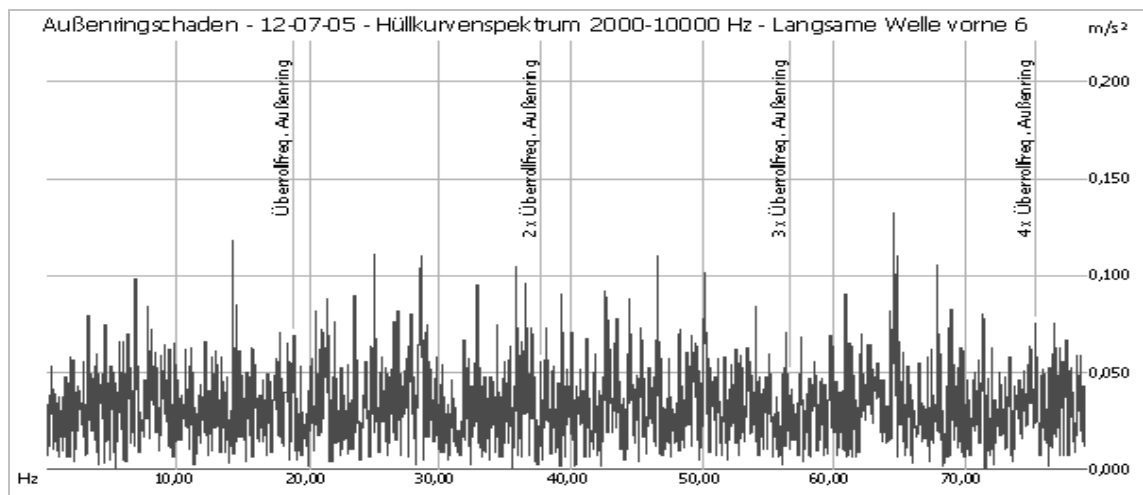
Die Hüllkurvenanalyse versucht durch Demodulation der Eigenfrequenz das regelmäßige Schlagen sichtbar zu machen.



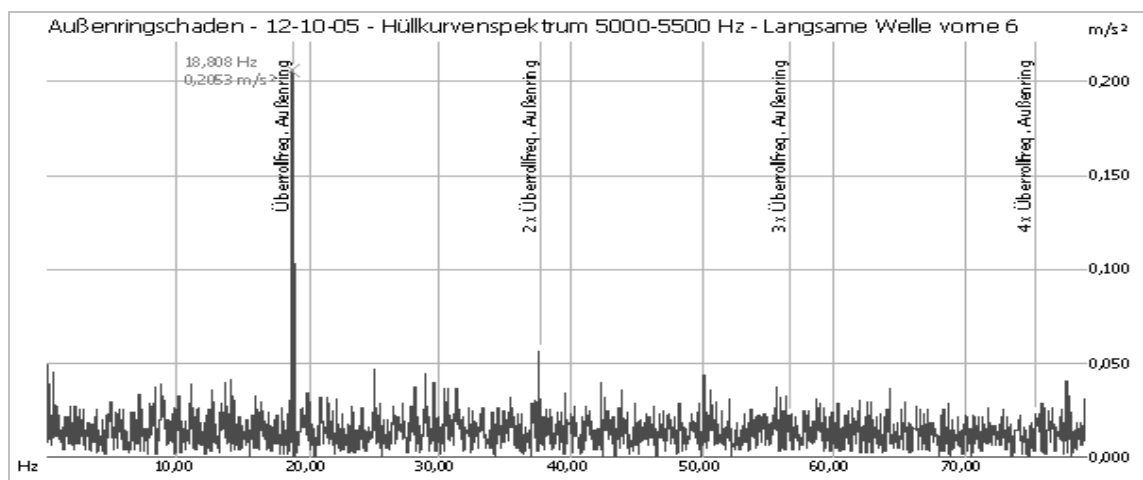
Nach dem gleichen Prinzip arbeiten Radiosender. Hier ist die Musik (niedrige Frequenzen) auf einem Trägersignal (hohe Frequenz) aufmoduliert. Eine falsch gebildete Hüllkurve lässt sich deshalb mit einem schlecht eingestellten Radiosender vergleichen. Entweder man hört mehrere Sender gleichzeitig oder im Extremfall nur ein Rauschen.

Werden also bei der Schwingungsanalyse die Filter für die Hüllkurvenbildung falsch gewählt, ist die Schadensfrequenz im Hüllkurvenspektrum nicht zu sehen. Das häufig verwendete Hochpassfilter von 2 kHz kann man mit einem Radio, das alle Sender gleichzeitig empfängt, vergleichen.

Da die Eigenfrequenz der umgebenden Struktur nicht bekannt ist, führt die 8.2 Analyse-Software für jede mögliche Schadensfrequenz einen automatischen „Sendersuchlauf“ durch. Der gesamte Frequenzbereich wird systematisch durchlaufen und nach dem höchsten Empfangspegel durchsucht. Jeder dieser Durchläufe wird für verschiedene Bandbreiten wiederholt, bis der maximale Pegel gefunden wurde. Die Schadensfrequenzen ragen aus dem Spektrum heraus. Die beiden folgenden Bilder verdeutlichen den Effekt:



Dieses Bild zeigt das Hüllkurvenspektrum eines Außenringsschadens mit einem Hochpassfilter von 2 kHz.



Dieses Bild zeigt das Hüllkurvenspektrum nach Anwendung des „Sendersuchlaufs“.

Der Pegel, verursacht durch den Außenring, ist bei ca. 18,8 Hz im unteren Bild nun deutlich zu sehen. Der allgemeine Rauschpegel ist erheblich abgesenkt worden.

Fazit:

Die bei der 8.2 Schwingungsanalyse umgesetzten Verbesserungen der Analysetechnik versprechen für die Zukunft eine bessere Beurteilung der langsam laufenden Bauteile an Windenergieanlagen. Der Abgleich der Schwingungsanalysen mit den gefundenen Auffälligkeiten von Videoendoskopieuntersuchungen bietet eine gute Möglichkeit der Quantifizierung der in der Schwingungsanalyse festgestellten Unregelmäßigkeiten.

Um die Qualität weiter zu verbessern, werden auch in den kommenden Jahren weitere Algorithmen in die 8.2 Analyse-Software integriert und getestet werden.

Die Messqualität und Analyse bei der Offline-Schwingungsanalyse ist den Online-CMS besonders bei den langsamlaufenden Bauteilen weit überlegen. Die Nachteile des fehlenden Trendverhaltens und der nicht dauerhaften Messung liegen auf Seiten der Offline-CMS. Im Idealfall würde die Qualität der Offline-Messung in ein Online-System integriert werden. Dies ist derzeit aus wirtschaftlichen Gründen nicht darstellbar.

6. Ausblick / Zusammenfassung

Um den aktuellen Zustand der Hauptkomponenten einer Windenergieanlage zuverlässig zu erfassen, sollten möglichst alle möglichen Prüfmethode (Sichtprüfung, Abhören mit dem Stethoskop, Videoendoskopie, Schwingungsanalyse) zur Anwendung kommen, da jede Prüfmethode spezifische „Schwachstellen“ aufweist.

Insbesondere bei der Schwingungsanalyse sind in Zukunft durch Weiterentwicklungen der Analysesoftware Verbesserungen zu erwarten. Die 8.2-Gruppe wird sich auch in den nächsten Jahren aktiv an der Forschung im Bereich der Schwingungsanalysen beteiligen.