

Anmerkungen zum internationalen Standard ISO 14694: Industrial fans – Specifications for balance quality and vibration levels

Frank Weissbuch

Abstract

Comments on the international Standard ISO 14694: Industrial fans – Specifications for balance quality and vibration levels

First this article summarises basics of vibration technology. Based on examples and measurements, the complex vibration behaviour of axial fans in air-cooled condensers – frequently used in power plants – is described. The emerging problems are explained when assessing and monitoring the vibrations of axial fans resulting from the application of the international standard ISO 14694, Industrial fans – Specifications for balance quality and vibration levels, 2003.

Comparison with the VDI-Standard 3834 "Measurement and evaluation of the mechanical vibration of wind energy turbines and their components" (2009) shows possible alternatives and solutions to realise a customised and differentiated assessment and monitoring of axial fan vibrations. The presentation of the vibration behaviour of axial fans, the discussed problems based on the application of ISO 14694 and the comparison with VDI-Standard 3834 show the urgent need for modifications of ISO 14694 regarding the assessment and monitoring of the vibration behaviour of axial fans.

Einleitung

Als Schwingungen oder Oszillationen werden wiederholte zeitliche Abweichung der Zustandsgrößen eines Systems von einem Mittelwert bezeichnet. Beispiele für Schwingungen sind in der Mechanik, in der Elektrotechnik, der Biologie und in vielen anderen Bereichen anzutreffen. Während wir uns einerseits Schwingungen in vielfältiger Weise zu Nutzen machen wie z.B. bei Schwingrinnen, Saiteninstrumente, Schlagbohrmaschinen, etc. sind Schwingungen in anderen Bereichen wie der Mikroskopie, Fußgängerbrücken, Gebäuden, etc. unerwünscht und können bei Überschreitung entsprechender Schwingungsamplituden zu Beschädigungen und Bauteilversagen führen. Des Weiteren werden Maschinenschwingungen dazu benutzt um Schäden an Maschinenkomponenten wie z.B. Wälz- und Gleitlagern, Getriebeverzahnungen, Wellen etc. frühzeitig zu erkennen und rechtzeitig zu beheben. Kennzeichen einer harmonischen Schwingung sind neben der Schwingfrequenz in Hertz [Hz], die die Anzahl der zeitlichen Abweichungen pro Sekunde angibt, die Schwingungsamplitude die in den Einheiten Schwingweg, Schwinggeschwindigkeit oder Schwingbeschleunigung angegeben wird. Alle drei Größen stehen in einer konstanten Phasenbeziehung zueinander und ihre Amplituden lassen sich im Falle einer harmonischen Schwingung, wie nachfolgend dargestellt, voneinander ableiten:

$$V_{\text{Peak}} = 2\pi f X_{\text{Peak}} \quad (1)$$

$$A_{\text{Peak}} = 2\pi f V_{\text{Peak}} \quad (2)$$

mit

f: Frequenz der harmonischen Schwingung in [1/s]

X_{Peak} : Amplitude des Schwingweges in [mm]

V_{Peak} : Amplitude der Schwinggeschwindigkeit in [mm/s]

A_{Peak} : Amplitude der Schwingbeschleunigung in [m/s²]

Von diesen drei Parametern hat sich die Schwinggeschwindigkeit als Einheit für die Maschinenüberwachung etabliert, da sie den geringsten Dynamikbereich erfordert, das beste Signal/Rausch-Verhältnis liefert und eine frühzeitige Fehlererkennung ermöglicht, wenn einfache Geräte mit einer Breitbandanzeige verwendet werden. Ein wesentlicher Nachteil des Parameters Schwinggeschwindigkeit ist, dass von dessen Amplitude nicht direkt auf Bauteilbelastungen oder auf Kräfte, die auf ein Bauteil einwirken, geschlossen werden kann. Eine hohe Schwinggeschwindigkeitsamplitude kann gemäß Gleichung 1 aus einer hohen Frequenz und kleiner Wegamplitude resultieren oder umgekehrt. Ebenso resultiert aus einer hohen Schwinggeschwindigkeitsamplitude bei niedriger Frequenz eine geringe Beschleunigung und umgekehrt.

Dies bedeutet, dass hohe Schwinggeschwindigkeitsamplituden nicht zwangsläufig zu starken Auslenkungen mit hohen Bauteil deformierungen sowie zu großen Bauteilbeschleunigungen mit großen eingepprägten Kräften führen. Am nachfolgend dargestellten einfachen Beispiel eines einseitig eingespannten Biegebalkens sei dieser Zusammenhang verdeutlicht.

Beispiel: Einseitig eingespannter Biegebalken (Bild 1):

a) Schwinggeschwindigkeit V bei $f = 1,5$ Hz
Auslenkung $X_a = V / (2\pi \cdot 1,5 \text{ Hz})$

b) Schwinggeschwindigkeit V bei $f = 9,0$ Hz
Auslenkung $X_b = V / (2\pi \cdot 9,0 \text{ Hz})$

Biegespannung Q_B an der Einspannung:

$$Q_{Ba} = 6,0 \times Q_{Bb}$$

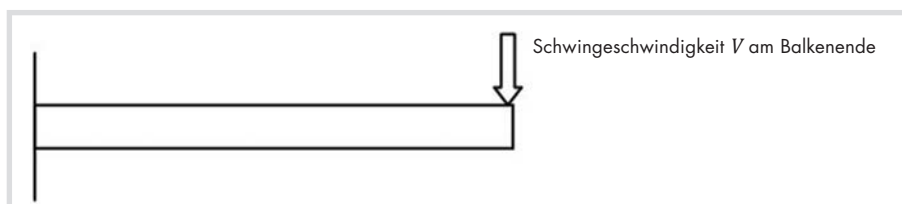


Bild 1. Einseitig eingespannter Biegebalken.

Autor

Dr.-Ing. Frank Weissbuch
Geschäftsführer
WMT
Dinslaken, Deutschland

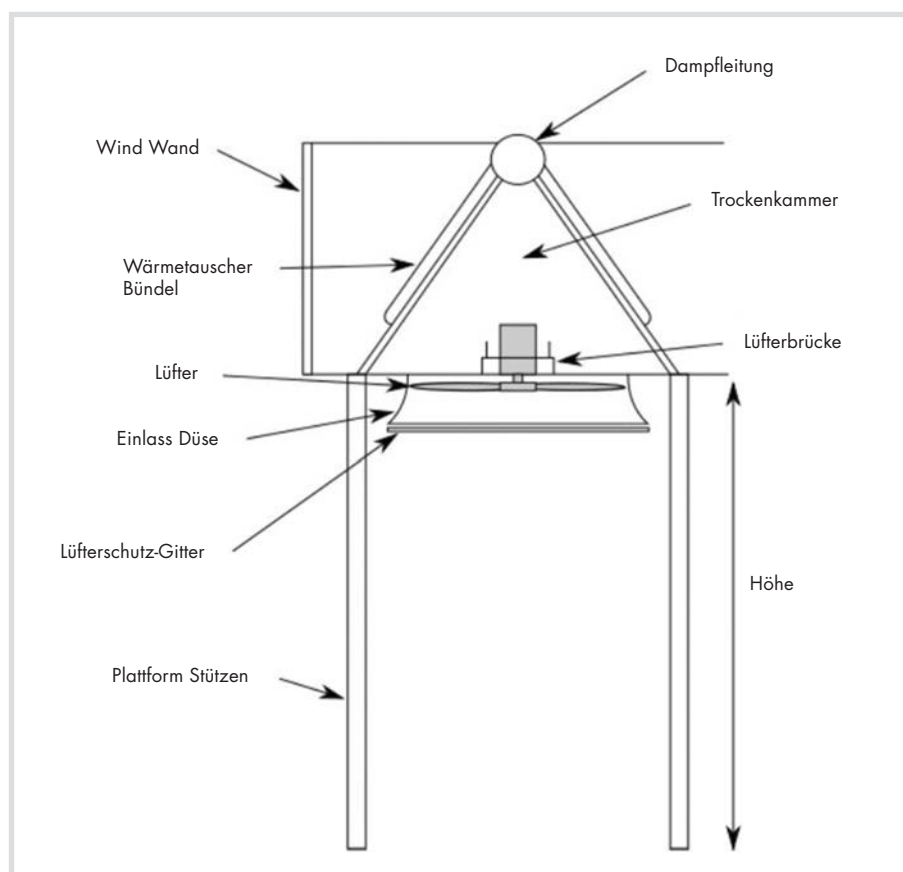


Bild 2. Prinzipieller Aufbau eines luftgekühlten Kondensators [2].

Dies bedeutet, dass bei gleicher Schwinggeschwindigkeitsamplitude V die Biegespannungen und damit Belastungen an der Einspannung des Balkens im Verhältnis der Frequenzen variieren. In ähnlicher Art und Weise variieren auch bei gleicher Schwinggeschwindigkeitsamplitude die Beschleunigungen und damit die Kräfte die auf ein Bauteil wirken bei unterschiedlichen Frequenzen. Durch diese simple Betrachtung werden die Schwierigkeiten bei der Festlegung von allgemein gültigen und zulässigen breitbandigen Schwinggeschwindigkeitsgrenzwerten deutlich. Die Angabe der breitbandigen Schwinggeschwindigkeit erfolgt als Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit auch bekannt als RMS (Root Mean Square) Wert und wird wie folgt definiert:

Funktion $V(t)$ über ein Zeitintervall zwischen t_1 und t_2

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt}{t_2 - t_1}} \quad (3)$$

Hierbei wird je nach Anwendung und Norm der Frequenzbereich innerhalb dessen der Effektivwert ermittelt wird, definiert. Beispielsweise unterscheidet die DIN ISO 10816-3, *Mechanische Schwingungen – Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht rotierenden Teilen*, abhängig von den Maschinendrehzahlen zwischen den Frequenzbereichen

10 Hz bis 1.000 Hz für Maschinendrehzahlen oberhalb von 600 min^{-1} und 2 Hz bis 1.000 Hz für Drehzahlen unterhalb von 600 min^{-1} . Damit wird deutlich, dass sowohl niederfrequente Anteile, die z.B. aus Bauwerks- und Strukturschwingungen herrühren, und hochfrequente Schwingungen, die durch den Maschinensatz selbst generiert werden, in einem Kennwert – dem Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit – zusammengefasst werden. Anders ausgedrückt werden höherfrequente kritische Schwingungen mit geringen Amplituden, wie sie ein defekter Maschinensatz emittiert, durch unkritische niederfrequente Schwingungen mit relativ hohen Amplitudenwerten überlagert.

Axiallüfter in luftgekühlten Dampf-Kondensatoren

Im sogenannten Rankine-Kreisprozess, der einen Vergleichsprozess für das Dampfkraftwerk in seiner einfachsten Form darstellt, ist der Kondensator ein wesentliches Element, welches das bei hohem Druck verdampfte Arbeitsmittel anschließend bei niedrigem Druck kondensiert. Im Kraftwerksbereich wird zwischen Trocken- und Nasskühlung unterschieden. Luftgekühlte Kondensatoren, die zu den Trockenkühlungssystemen gehören, werden häufig in Regionen eingesetzt in denen nur wenig oder kein Kühlwasser zur Verfügung steht. Bild 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau

eines luftgekühlten Kondensators, der im wesentlichen aus den Elementen Dampfleitung, Wärmetauscher - Bündel, sowie Lüfter mit Antriebsmotor und Getriebe besteht.

Die Lüfter erreichen mittlerweile Durchmesser von bis zu $42 \text{ ft} = 12,8 \text{ m}$. Die Flügelanzahl liegt zwischen 5 und 9 Flügeln. Als Antriebsmotoren kommen einstufige sowie polumschaltbare zweistufige Asynchronmotoren zum Einsatz. Vermehrt werden auch Umrichter geführte Antriebe verwendet, die variable Antriebsdrehzahlen ermöglichen. Die Getriebe sind überwiegend zweistufige schrägverzahnte Stirnradgetriebe. Lüfterwelle, Antriebsmotor und Getriebe befinden sich in der Mitte der Lüftertragbrücke. Das Getriebe ist starr oder elastisch mit der Lüfterbrücke verbunden. Die Lüftertragbrücke ist eine Stahlkonstruktion bestehend aus zwei miteinander verbredeten Hauptträgern sowie begehbaren Gittern (s. Bild 3).

Schwingungsverhalten der Lüfter

Bei der Lüfterbrücke handelt es sich strukturell um ein Kontinuum mit mehreren Freiheitsgraden und einer unendlichen Anzahl von Eigenfrequenzen und dazugehörigen Eigenmoden. Bedingt durch die Systemanregung haben sich folgende Eigenfrequenzen und Eigenmoden als relevant für das Schwingungsverhalten der Lüfterbrücke herausgestellt: 1. Biegeigenfrequenz der Brücke in vertikaler und horizontaler Richtung sowie die erste Torsionseigenfrequenz um die Längsachse der Brücke. Speziell bei elastisch gelagerten Getrieben kommen lokale Eigenfrequenzen der Antriebseinheit hinzu. Bild 4 oben zeigt beispielsweise die Systemantwort einer Lüfterbrücke in vertikaler Richtung auf einen sog. Bump Test – eine Auslenkung der Brücke mit anschließendem gedämpften Ausschwingvorgang. Bild 4 unten zeigt das dazugehörige Spektrum mit der ersten vertikalen Biegeeigenfrequenz bei 9,25 Hz.

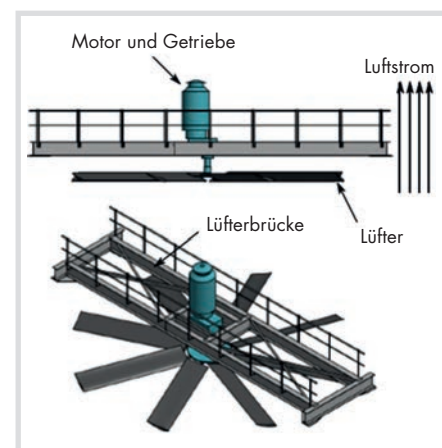


Bild 3. Prinzipieller Aufbau einer Lüfterbrücke mit Antrieb [3].

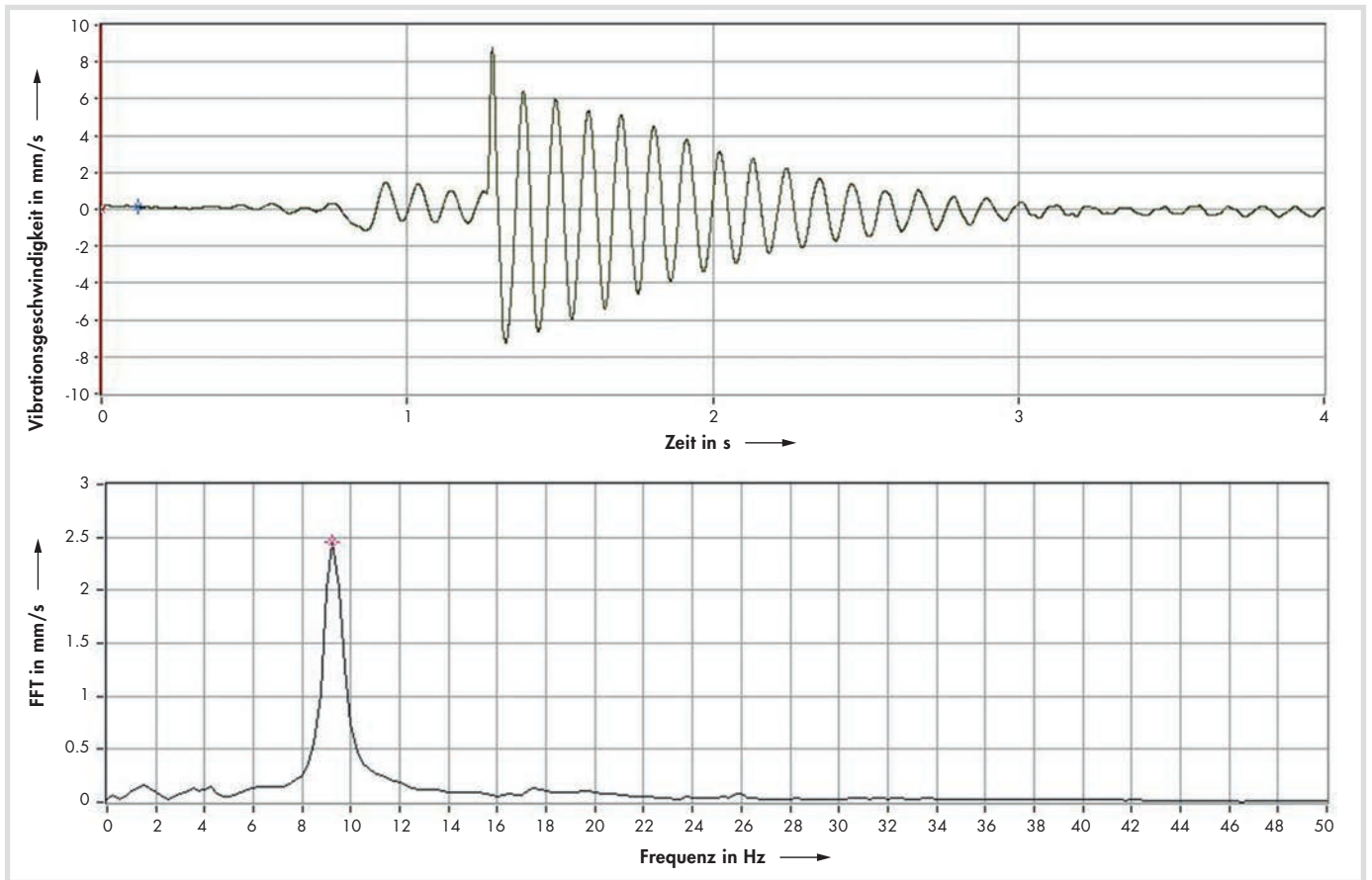


Bild 4. Systemantwort einer Lüfterbrücke auf einen Bump Test.

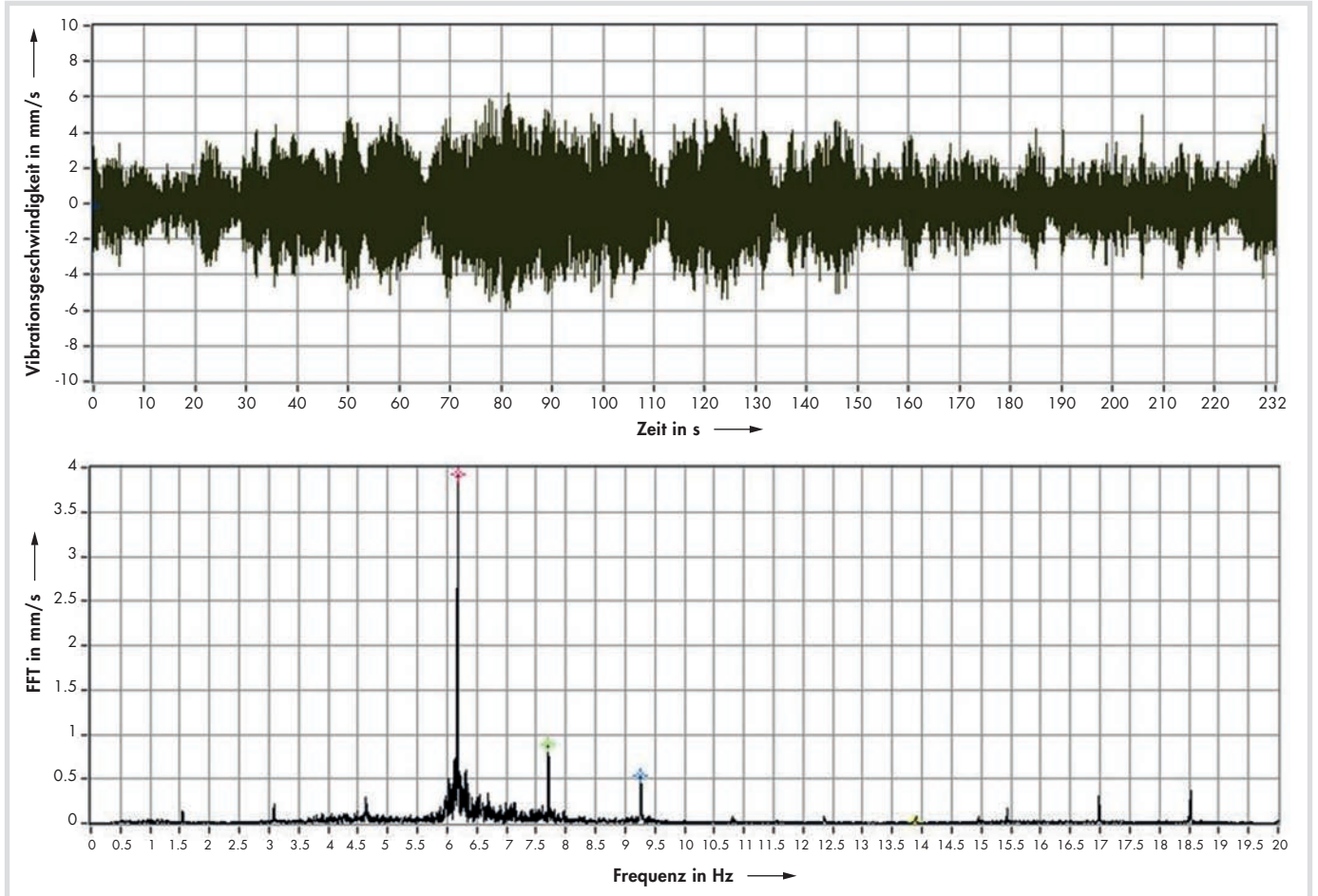


Bild 5. Zeitsignal der Schwinggeschwindigkeit (oben) und Spektrum (unten) gemessen an einer Lüfterbrücke in vertikaler Richtung.

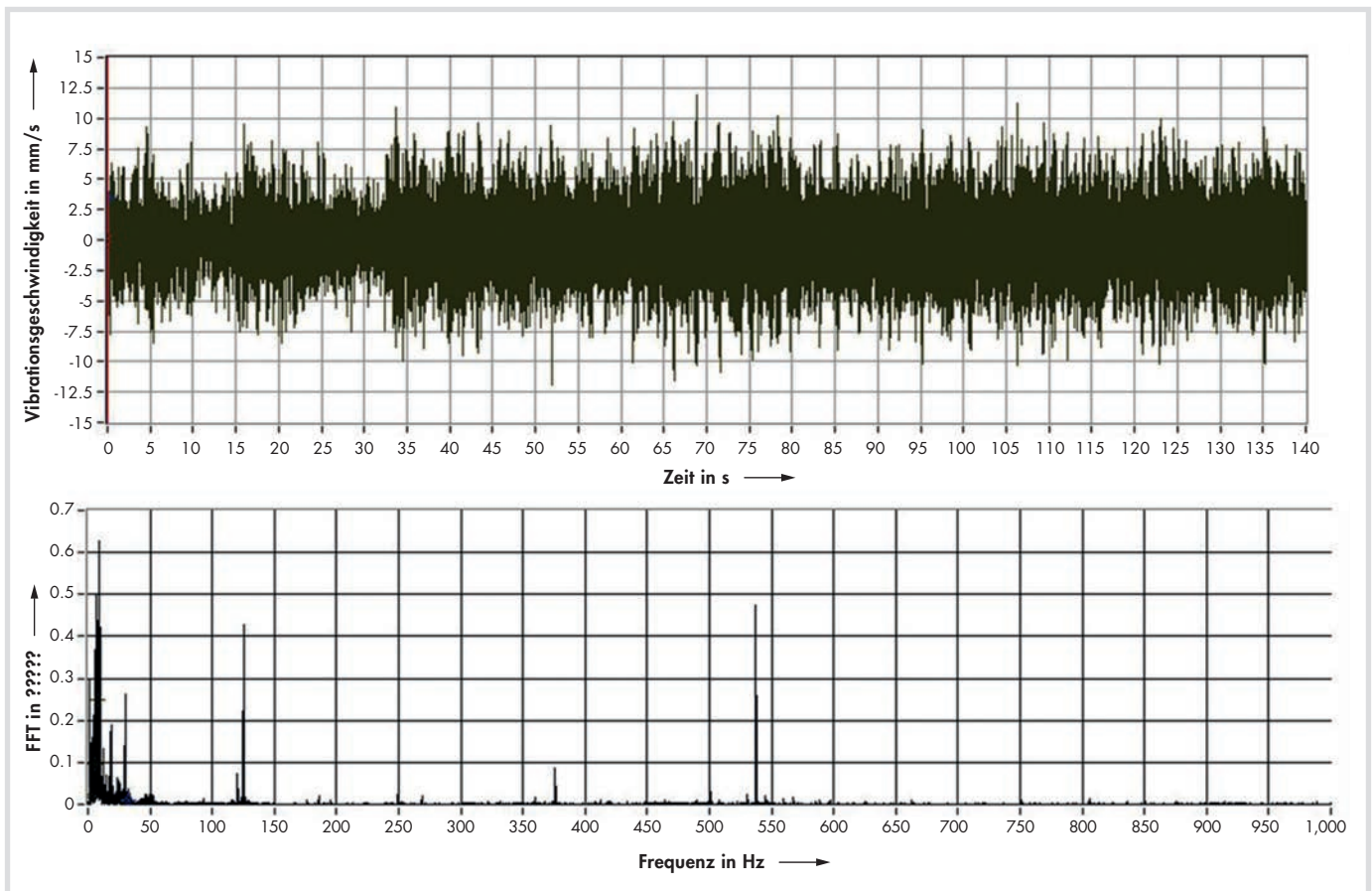


Bild 6. Zeitsignal der Schwinggeschwindigkeit (oben) und Spektrum (unten) gemessen an einem zweistufigen Lüftergetriebe in horizontaler Richtung.

Die Eigenfrequenzen der Lüfterbrücke in horizontaler Richtung, der Torsion und der Antriebseinheit werden in gleicher Weise ermittelt. Die Eigenmoden werden mittels Modalanalyse bestimmt.

Die Systemanregung erfolgt primär durch die Lüfterflügel, die die Lüfterbrücke passieren und dabei eine aerodynamische Reaktionskraft erfahren, die wiederum durch die Lüfterwelle auf die Lüfterbrücke übertragen wird. Diese Anregung ist mit der sog. Flügelpassierfrequenz dem Produkt aus Lüfterdrehzahl und Anzahl der Flügel an der Lüfterbrücke messbar. Das Verhältnis der Flügelpassierfrequenz zu den Eigenfrequenzen der Lüfterbrücke entscheidet hierbei mit über die Amplitude der Brückenschwingungen. Da es sich bei der Anregung durch die Flügel um eine impulsförmige Anregung handelt, werden auch immer die Eigenfrequenzen der Lüfterbrücke angeregt. Während sich die Anregung der Brücke durch das Passieren der Flügel überwiegend in der vertikalen Richtung auswirkt, macht sich eine Unwucht des Lüfters in der horizontalen Ebene bemerkbar. Durch die horizontale Steifigkeit der Brücke und die geringe Drehfrequenz großer Axiallüfter ist eine Unwucht nur mit entsprechend sensibler Sensorik und nachgeschalteter Signalanalyse sicher zu detektieren.

Bild 5 (oben) zeigt die Schwinggeschwindigkeit gemessen an einer Lüfterbrücke in vertikaler Richtung. Die Schwankung der

Schwingungsamplitude resultiert aus instationären Strömungsbedingungen am Lüftereinlass bzw. aus instationären umgebenden Windgeschwindigkeiten und -richtungen. Das Spektrum in Bild 5 (unten) zeigt die Lüfterdrehfrequenz bei 1,54 Hz und deren Harmonische. Die Ausprägung der 4. Harmonischen bei 6,15 Hz resultiert aus der 1. Biegeeigenfrequenz der Lüfterbrücke bei ca. 6,2 Hz. Desweiteren ist die Flügelpassierfrequenz bei 9,2 Hz (6 Flügel x 1,54 Hz) zu erkennen.

Das in Bild 6 (unten) dargestellte Spektrum der Schwingungen gemessen an einem zweistufigen Lüftergetriebe (Bild 7) zeigt die Zahneingriffskomponenten der ersten und zweiten Getriebestufe bei ca. 540 und 124 Hz sowie deren Harmonische. Die Zahneingriffskomponenten ergeben sich aus dem Produkt der Drehzahlen der Getriebewellen und der Anzahl der Zähne des jeweiligen Zahnrades und sind auch im Neuzustand des Getriebes detektierbar.

Aufgrund der vorhergehend beschriebenen Schwingungscharakteristik der Lüfterbrücken und Getriebe wird deutlich, dass der RMS Wert der Schwinggeschwindigkeit, der in der Regel einen Frequenzbereich von 1 bis 1.000 Hz umfasst, nieder- und hochfrequente Frequenzkomponenten umfasst und gleich gewichtet.

Bild 8 (oben) zeigt das Zeitsignal der Schwinggeschwindigkeit und den RMS Wert (Mittelungszeit 1 sec.) der Schwing-

geschwindigkeit (unten) gemessen an einem zweistufigen Lüftergetriebe in horizontaler Richtung. Die Schwankung der Schwingungsamplitude resultiert aus der instationären Anströmung der Flügel und verursachen Schwankungen des RMS Wertes zwischen 3 und 17 mm/s. Die Fluktuation der RMS Werte während des fehlerfreien Anlagenbetriebes erschwert eine sinnvolle Grenzwertfestlegung bei der Überwachung von Axiallüftern mittels Summschwingungspegel.

Beurteilung des Schwingungsverhaltens von Axiallüftern nach ISO 14694

Gemäß ISO 14694 werden Axiallüfter mit einem Durchmesser zwischen 2.800 und

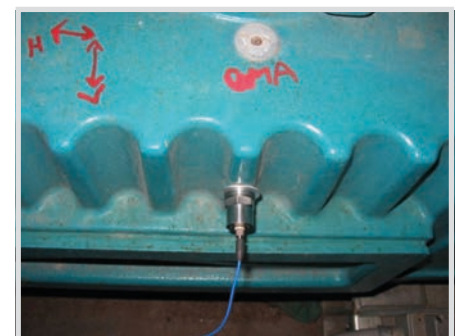


Bild 7. Schwingungsmessung an zweistufigem Lüftergetriebe.

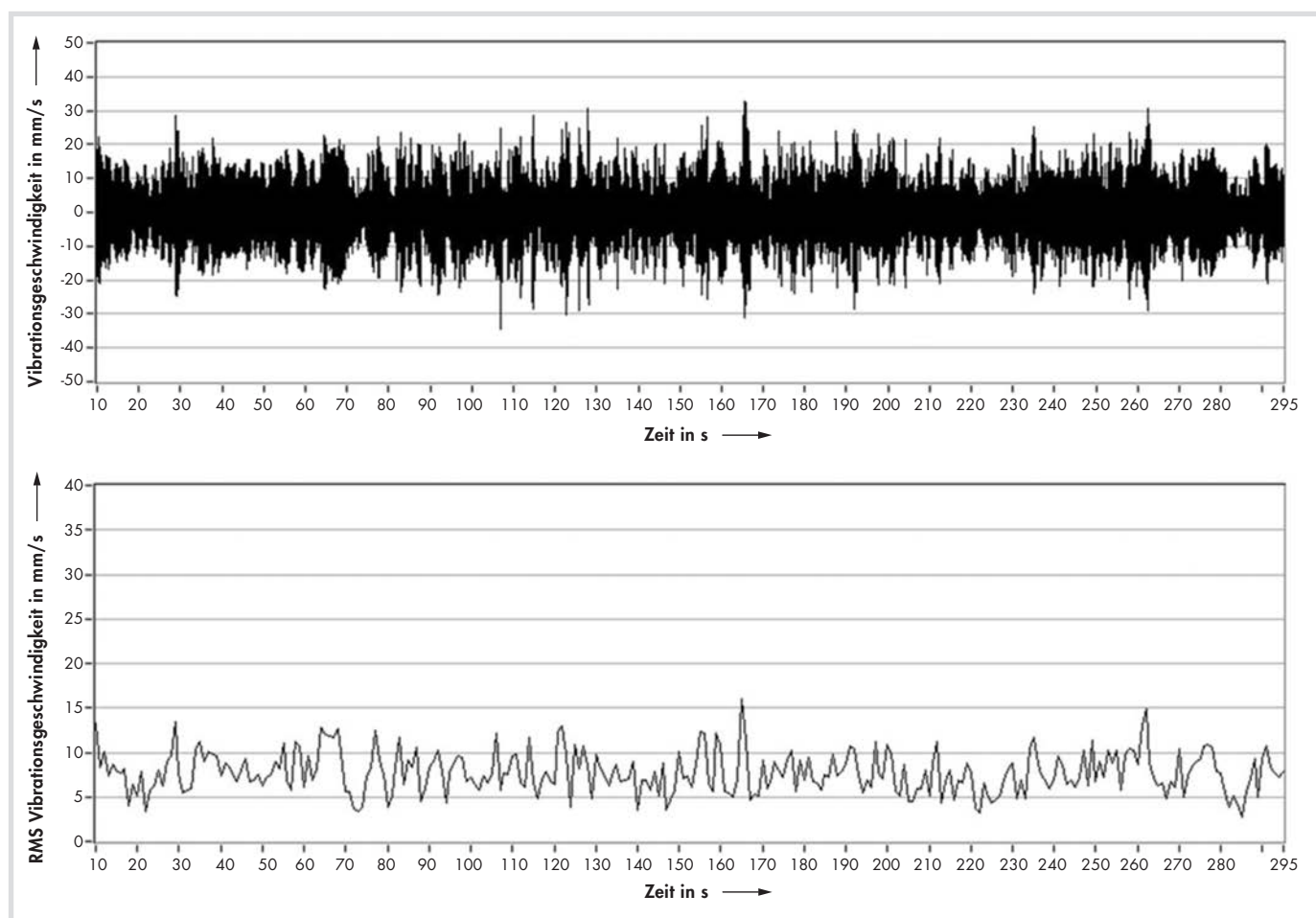


Bild 8. Zeitsignal der Schwinggeschwindigkeit (oben) und RMS Wert¹ (unten) gemessen an einem zweistufigen Lüftergetriebe in horizontaler Richtung.

12.500 mm sowie einer Leistung unter 300 kW der Lüfter Applikations Kategorie BV 3 zugeordnet. Aus der Kategorie BV 3 ergeben sich in Abhängigkeit von der Aufhängung des Lüfters folgende in situ Schwingungsgrenzwerte nach ISO 14694 gemäß Tabelle 1.

Die Art der Aufhängung wird wie folgt definiert:

Starre Aufhängung: Die niedrigste Eigenfrequenz von Lüfter und Aufhängung in der betrachteten Messrichtung liegt oberhalb der Drehfrequenz des Lüfters. Ein Lüfter auf einem Betonfundament wird generell als starr aufgehängt klassifiziert.

Flexible Aufhängung: Die niedrigste Eigenfrequenz von Lüfter und Aufhängung in der betrachteten Messrichtung liegt unterhalb der Drehfrequenz des Lüfters. Ein auf Schwingungsisolatoren aufgestellter Lüfter wird generell als flexibel aufgehängt klassifiziert.

Da typische Eigenfrequenzen von Lüfterbrücken mit Lüfterdurchmessern von ca. 10 m zwischen 6 und 12 Hz in vertikaler und horizontaler Richtung liegen und die Drehzahlen dieser Lüfter meist zwischen 1,4 Hz bis 2,4 Hz liegen, werden die meisten Aufhängungen als starr klassifiziert.

Der Bezug auf die Drehfrequenz des Lüfters zur Klassifikation der Aufhängung er-

scheint hier nicht sinnvoll, da die primäre Anregung der Lüfterbrücke durch die Flügelpassierkomponente (Lüfterdrehzahl x Anzahl der Flügel) erfolgt und diese meist oberhalb der niedrigsten Eigenfrequenz von Lüfter und Aufhängung liegt.

Die angegebenen in situ Grenzwerte gelten für sog. "Filter-Aus"-Messungen, die in der Norm als Breitband oder Overall Messungen definiert werden ohne konkrete Frequenzbereiche zu nennen. Da in Annex C der ISO 14694 die Unwucht des Lüfters als eine mögliche Schwingungsursache genannt wird, ist davon auszugehen, dass der Frequenzbereich, der zur Berechnung des RMS Wertes genutzt werden soll, die Drehfrequenz des Lüfters umfasst. Als obere Frequenz ist die in den Normen übliche Grenze von 1.000 Hz zu wählen.

Da der RMS Wert der Schwinggeschwindigkeit über einen Frequenzbereich von der Lüfterdrehfrequenz bis zu 1.000 Hz berechnet wird, kann sich folgendes, an

einem realen Beispiel dargestelltes, Problem ergeben:

Nach der Inbetriebnahme von starr aufgehängten Axiallüftern der Kategorie BV-3 wurde ein RMS Wert von über 9 mm/s an den Getrieben ermittelt. Hierdurch wurde eine Lüfterabschaltung ausgelöst und weitere Untersuchungen eingeleitet. Eine Spektralanalyse der Messdaten zeigte, dass der RMS Wert primär durch die dominante Schwingungskomponente bei der Flügelpassierfrequenz von 9,2 Hz mit einer Amplitude von über 12,7 mm/s erzeugt wurde. Mit diesen Informationen ließen sich folgende weitere Größen berechnen und messtechnisch validieren:

Schwingweg

$$\hat{x} = \frac{\hat{v}}{2\pi \cdot f} = \frac{12,7 \text{ mm/s}}{2\pi \cdot 9,2 \text{ s}^{-1}} = 0,22 \text{ mm}$$

Schwingbeschleunigung

$$\hat{a} = 2\pi \cdot f \cdot \hat{v} = 2\pi \cdot 9,2 \text{ s}^{-1} \cdot 12,7 \text{ mm/s} = 0,73 \text{ m/s}^2 = 0,075 \text{ g}$$

Tab. 1. In situ Grenzwerte nach ISO 14694.

Zustand	Starre Aufhängung		Flexible Aufhängung	
	Peak Wert [mm/s]	RMS Wert [mm/s]	Peak Wert [mm/s]	RMS Wert [mm/s]
Inbetriebnahme	6,4	4,5	8,8	6,3
Alarm	10,2	7,1	16,5	11,8
Abschaltung	12,7	9,0	17,8	12,5

Das Beispiel zeigt, dass die Struktur-schwingungen der Lüfterbrücken mit einer Wegamplitude von 0,22 mm bzw. einer Beschleunigungsamplitude von 0,075 g zu einer Abschaltung der Lüfter führte. Auch ohne weiteren Nachweis ist zweifelsfrei ersichtlich, dass die geringe Auslenkung einer 10 m langen Stahlkonstruktion mit einer Amplitude von 0,22 mm keinen Einfluß auf deren Lebensdauer haben kann. Ebenso ist ersichtlich, dass eine auf den Antrieb wirkende Beschleunigung von 0,075 g einen zu vernachlässigenden Einfluß auf die Antriebskomponenten ausübt.

Ungeachtet der oben beschriebenen Sachverhalte bestand der Betreiber der Lüfter auf die Einhaltung der ISO 14694 wodurch ein erheblicher konstruktiver, zeitlicher und monetärer Aufwand durch die zusätzliche und offensichtlich unnötige Versteifung der Brückenkonstruktion von insgesamt 60 Lüftern entstand.

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass die Erhöhung der Biegesteifigkeit der Lüfterbrücke zu einer Reduktion der Schwingungsamplitude bei einer Unwucht des Lüfters führt und damit noch schwieriger zu detektieren ist.

Ein weiteres Problem bei der Anwendung der ISO 14694 ist die nicht spezifizierte Mittelungszeit bei der Berechnung der RMS Werte der Schwinggeschwindigkeit. Wie in Bild 8 dargestellt, schwankt der RMS Wert zwischen ca. 3 und 17 mm/s in einem Messzeitraum von ca. 5 Minuten aufgrund instationärer Strömungsbedingungen. Die Mittelungsdauer beträgt hierbei $t_m = 1$ sec. und entspricht der Mittelungszeit handelsüblicher Schwingungstransmitter mit integrierter RMS Wert Berechnung. Dies bedeutet, dass der so ermittelte RMS Wert in diesem Fall eher die Umgebungsbedingungen des Lüfters repräsentiert als den Zustand des Lüfters.

Alternativen und Lösungen

Mögliche alternative Vorgehensweisen bei der Beurteilungen des Schwingungsverhaltens von Axiallüftern zeigt die VDI – Richtlinie 3834, *Messung und Beurteilung der mechanischen Schwingungen von Windenergieanlagen und deren Komponenten*, [4] deren Empfehlungen auf der Analyse der Schwingungsmessungen von mehr als 450 Windenergieanlagen beruht. Das Heranziehen der VDI 3834 ist durch die prinzipielle Übereinstimmung zwischen Axiallüftern und Windenergieanlagen in den folgenden Bereichen gerechtfertigt:

- Beide Systeme unterliegen äusseren Einflüssen wie unsymmetrische Anströmverhältnisse sowie stochastische Windgeschwindigkeitsfluktuationen
- Es erfolgt eine aerodynamische Interaktion zwischen Flügeln und Tragstruktur
- Drehzahlen und Struktureigenfrequenzen liegen in niederfrequenten Bereichen

- Die Antriebsstränge bestehen aus Rotorlager, Getriebe, Motor bzw. Generator

Im Folgenden werden die wesentlichen Unterschiede zwischen der ISO 14694 und der VDI 3834 hinsichtlich der Erfassung und Beurteilung von Schwingungen dargestellt.

Mittelungsverfahren und Beurteilungsgrößen

Gemäß VDI 3834 soll als Mittelungsverfahren, ebenso wie in der ISO 14694, die energieäquivalente Mittelung, also der RMS Wert, gewählt werden. Allerdings werden in der VDI 3834 die speziellen Betriebsbedingungen von Windenergieanlagen, wie die Änderung der Windgeschwindigkeit und Anströmrichtung des Windes, berücksichtigt, die zu ständig wechselnden Schwingungsanregungen und damit zu kurzzeitigen Änderungen der Messwerte mit häufigen starken Amplitudensprüngen führen. Nur selten gibt es längerfristige stabile Betriebsbedingungen wie sie in anderen Schwingungsnormen wie z.B. der ISO 10816 zur Beurteilung des Maschinenzustandes gefordert werden. Daher ist es unbedingt notwendig die gemessenen Kenngrößen über vorgegebene Zeiträume zu mitteln um diese Schwankungen auszugleichen.

Beurteilungsdauer

Die Beurteilungsdauer hängt gemäß VDI 3834 von der Art und dem Zeitverlauf der Einwirkungen durch Wind auf die Gesamtanlage und ihre Komponenten sowie von der Beurteilungsgröße ab. Für aerodynamisch angeregte Schwingungen der Gondel, Türme und Komponenten mit Frequenzen zwischen 0,1 Hz und 10 Hz und relativ großen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten soll die Beurteilungsdauer 10 Minuten betragen. An den Getrieben und Generatoren können zusätzlich die charakteristischen, bauartbedingten Schwingungen mit Frequenzen zwischen 10 Hz und größer als 1.000 Hz auftreten. Sollen hier nur diese höherfrequenten Anteile beurteilt werden, genügen Beurteilungszeiträume von 1 Minute.

Hinweise zur Messung und Auswertung

Für die Windenergieanlagen müssen unterschiedliche Kenngrößen festgelegt werden, wobei in allen Fällen sowohl die Schwingbeschleunigung als auch die Schwinggeschwindigkeit zu messen sind. Für die einzelnen Komponenten einer WEA gelten:

Gondel und Turm

- Beurteilungsbeschleunigung in m/s^2
- Beurteilungsgeschwindigkeit in mm/s
- Beurteilungsdauer: 10 min zwischen 0,1 Hz und 10 Hz
- Untere Grenzfrequenz unterhalb der Rotordrehfrequenz

Rotorlager mit Wälzlagern

- Beurteilungsdauer der Beurteilungsbeschleunigung: 10 min zwischen 0,1 Hz und 10 Hz
- Untere Grenzfrequenz unterhalb der Rotordrehfrequenz
- Beurteilungsdauer der Beurteilungsgeschwindigkeit: 1 min zwischen 10 Hz und 1.000 Hz

Getriebe

- Beurteilungsdauer der Beurteilungsbeschleunigung: 10 min zwischen 0,1 Hz und 10 Hz und 1 min zwischen 10 Hz und 2000 Hz
- Die untere Grenzfrequenz sollte im niederfrequenten Beurteilungsbereich unterhalb der Rotordrehfrequenz liegen
- Beurteilungsdauer der Beurteilungsgeschwindigkeit: 1 min zwischen 10 Hz und 1.000 Hz

Generator

- Beurteilungsdauer der Beurteilungsbeschleunigung: 1 min zwischen 10 Hz und 5.000 Hz
- Beurteilungsdauer der Beurteilungsgeschwindigkeit: 1 min zwischen 10 Hz und 1.000 Hz

Schwingungsgrenzwerte für den Betrieb

Die Richtwerte zur Festlegung der Schwingungsgrenzwerte für Warnung und Alarm werden nach VDI 3834 ebenfalls in Abhängigkeit von den Anlagenkomponenten definiert. Als Beurteilungsgrößen werden die Schwingbeschleunigung und Schwinggeschwindigkeit herangezogen (Tabelle 2).

Üblicherweise werden die Grenzwerte für die Warnmeldung auf Basiswerte der beiden Beurteilungsgrößen bezogen, die sich aus den Erfahrungen für die Messorte und Messrichtungen der jeweiligen Komponente ergeben. Liegen keine Basiswerte vor, z.B. bei Neuanlagen, soll auf die Erfahrung mit anderen Anlagen zurück gegriffen werden. Es wird jedoch empfohlen die Warnung -Grenzen nicht höher als das 1,25-fache der Zonengrenze I/II einzustellen. Aufgrund der Unterschiede der WEA ist es nicht möglich eine Anleitung zur Festlegung der Alarmgrenzwerte zu geben. Im Allgemeinen liegen die Alarm Grenzwerte innerhalb der Zonen II und III. Es wird aber empfohlen die Alarmgrenzen nicht höher als das 1,25-fache der Zonengrenze II/III einzustellen.

Empfehlungen für die Schwingungsüberwachung

Mittels einer Summenschwingungsüberwachung in Kombination mit den genannten Kennwerten läßt sich eine einfache Langzeitüberwachung einer WEA realisieren. Aufgrund der relativ langen Mit-

telungszeiten eignet sich diese Methodik nicht für die sicherheitsrelevante Anlagenüberwachung im Sinne des Maschinen- und Anlagenschutzes. Zu diesem Zweck ist eine permanente Schwingungsüberwachung erforderlich, die keine oder nur geringe Mittelungszeiten aufweist.

Die zur Fehlerföherkennung an Windenergieanlagen installierten schwingungsbasierten Zustandsüberwachungssysteme erfordern weiterführende Analysen mit individuell angepassten Grenzwerten. Die in der VDI 3834 empfohlenen Schwingungsrichtwerte sind als Grenzwerte in Zustandsüberwachungssystemen nicht geeignet. In der Regel müssen die Grenzwerte anlagenspezifisch auf Basis von Referenzmessungen unter Berücksichtigung von schwingungsbeeinflussenden Betriebsparametern definiert werden. Wesentlicher Bestandteil ist zudem die frequenzselektive Überwachung bauteilabhängiger Erreger- und Defektfrequenzen wie z.B. die Zahneingriffs- und Wälzlagerüberrollfrequenzen.

Wie dargestellt, existieren bzgl. der Schwingungsmessung und -beurteilung folgende wesentliche Unterschiede zwischen der ISO 14694 und der VDI 3834:

- Als Beurteilungsgröße wird neben der Schwinggeschwindigkeit die Schwingbeschleunigung eingeföhrt
- Die Beurteilungsdauer der Beurteilungsgrößen ist komponentenabhängig
- Die Frequenzbereiche der effektiven Beurteilungsgrößen sind komponentenabhängig
- Die VDI 3834 Richtwerte der Schwinggeschwindigkeit entsprechen einem Vielfachen der Richtwerte der ISO 14694 für die Strukturschwingungen

- Die VDI 3834 Richtwerte der Schwinggeschwindigkeit der Antriebskomponenten sind wesentlich geringer als die Richtwerte der ISO 14694
- Es wird dargestellt, dass eine Summenschwingungsüberwachung nur mit relativ langen Mittelungszeiten sinnvoll ist. Diese langen Mittelungszeiten stehen jedoch einer sicherheitsrelevanten Anlagenüberwachung entgegen
- Die in der VDI 3834 empfohlenen Schwingungsrichtwerte sind als Grenzwerte in Zustandsüberwachungssystemen nicht geeignet
- Installierte schwingungsbasierte Zustandsüberwachungssysteme erfordern weiterführende Analysen mit individuell angepassten Grenzwerten

Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel beschreibt das komplexe Schwingungsverhalten von Axiallüftern in luftgekühlten Kondensatoren, das sich aus niederfrequenten Schwingungen der Tragstruktur und höherfrequenten Schwingungen des Lüfterantriebs zusammensetzt und stellt die Anregungsmechanismen wie stochastische Windgeschwindigkeitsfluktuationen und Anströmrichtung, aerodynamische Interaktion zwischen Flügeln und Tragstruktur, sowie charakteristische kinematische Schwingungen des Antriebs dar. Anhand eines realen Beispiels werden die aus der Anwendung der ISO 14694, *Industrial fans – Specifications for balance quality and vibration levels*, entstehenden Probleme bei der Beurteilung und Überwachung von Axiallüftern dargestellt, die zu aufwändigen und unnötigen Modifikationen der Tragstruktur und/oder der Aufhängung

sowie zu Änderungen des Lüfterbetriebes führen können. Durch einen Vergleich mit der VDI – Richtlinie 3834, *Messung und Beurteilung der mechanischen Schwingungen von Windenergieanlagen und deren Komponenten*, werden mögliche Alternativen und Lösungen aufgezeigt, um eine angepasste und differenzierte Beurteilung und Überwachung von Axiallüftern zu realisieren.

Aufgrund der Darstellung der Beurteilung und Überwachung der Schwingungen von Industrielüftern gemäß ISO 14694, den daraus entstehenden Problemen und dem Vergleich mit der VDI – Richtlinie 3834 für Windenergieanlagen wurde der dringende Modifikationsbedarf des ISO 14694 Standards hinsichtlich der Beurteilung der Schwingungslevel von Industrielüftern verdeutlicht.

Referenzen

- [1] Jacques Muiyser, Danie N.J. Els, Sybrand J. van der Spuy and Albert Zapke: *Simultaneous measurement of air flow and blade loading conditions at large-scale cooling system fans*, R & D Journal, of the South African Institution of Mechanical Engineering, 2014.
- [2] Jacques Muiyser, Danie N.J. Els, Sybrand J. van der Spuy and Albert Zapke: *The Determination of Fan Blade Aerodynamic Loading From a Measured Response*, Proceedings of the ASME 2015 Turbine Technical Conference and Exposition TE2015 June 15-19, 2015, Montreal, Canada.
- [3] International Standard ISO 14694: *Industrial fans – Specifications for balance quality and vibration levels*, 2003.
- [4] VDI-Richtlinie 3834: *Messung und Beurteilung der mechanischen Schwingungen von Windenergieanlagen und deren Komponenten*, 2009, VDI – Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb.

Tab. 2. Richtwerte für Onshore-Windenergieanlagen mit Wälzlager ≤ 3 MW.

Komponente	Effektive Beurteilungsbeschleunigung [m/s ²]		Effektive Beurteilungsgeschwindigkeit [mm/s]	
	Zonengrenze I/II	Zonengrenze II/III	Zonengrenze I/II	Zonengrenze II/III
Gondel und Turm	Frequenzbereich $\leq 0,1$ bis 10 Hz		Frequenzbereich $\leq 0,1$ bis 10 Hz	
	0,3	0,5	60	100
Rotor mit Wälzlagerung	Frequenzbereich $\leq 0,1$ bis 10 Hz		Frequenzbereich 10 bis 1.000 Hz	
	0,3	0,5	2,0	3,2
Getriebe	Frequenzbereich $\leq 0,1$ bis 10 Hz		Frequenzbereich 10 bis 1.000 Hz	
	0,3	0,5	3,5	5,6
	Frequenzbereich 10 bis 2.000 Hz			
	7,5	12,0		
Generator mit Wälzlagerung	Frequenzbereich 10 bis 5.000 Hz		Frequenzbereich 10 bis 1.000 Hz	
	10	16	6,0	10

VGB | P O W E R T E C H

International Journal for Electricity and Heat Generation



Please copy >>> fill in and return by mail or fax

Yes, I would like order a subscription of VGB PowerTech.

The current price is Euro 275.- plus postage and VAT.

Unless terminated with a notice period of one month to the end of the year, this subscription will be extended for a further year in each case.

Return by fax to

VGB PowerTech Service GmbH
Fax No. +49 201 8128-302

or access our on-line shop at www.vgb.org | MEDIA | SHOP.

Name, First Name

Street

Postal Code

City

Country

Phone/Fax

Date 1st Signature

Cancellation: This order may be cancelled within 14 days. A notice must be sent to VGB PowerTech Service GmbH within this period. The deadline will be observed by due mailing. I agree to the terms with my 2nd signature.

Date 2nd Signature

VGB | P O W E R T E C H

**VGB PowerTech DVD 1990 bis 2014:
25 Jahrgänge geballtes Wissen rund um
die Strom- und Wärmeerzeugung
Mehr als 25.000 Seiten
Daten, Fakten und Kompetenz**

Bestellen Sie unter www.vgb.org > shop



**Jetzt auch als
Jahres-CD 2014
mit allen Ausgaben
der VGB PowerTech
des Jahres: nur 98,- €**

© Sergey Nivens - Fotolia



PowerTech-CD/DVD!

Kontakt: Gregaro Scharpey
Tel: +49 201 8128-200
mark@vgb.org | www.vgb.org

**Ausgabe 2014: Mehr als 1.100 Seiten Daten, Fakten und Kompetenz
aus der internationalen Fachzeitschrift VGB PowerTech**

(einschließlich Recherchefunktion über alle Dokumente)

Bruttopreis 98,- Euro incl. 19 % MWSt. + 5,90 Euro Versand (Deutschland) / 19,90 Euro (Europa)