

WIND-KRAFT

Journal & Natürliche Energien

Ausgabe 4/2016
36. Jahrgang
Preis : 5 Euro

**Weltpremiere :
Nordex N131/3300
auf dem ersten
164 m Turm !**



Schwingungstilger zur Reduzierung von Turmschwingungen und Schall in Windkraftanlagen

Dr. Lukas Schneider, Dr. Karl-Heinz Hanus, Mathias Dörsam
ESM Energie- und Schwingungstechnik Mitsch GmbH

Zusammenfassung

Die ausgedehnten Strukturen von Windkraftanlagen (WKA) können durch Wind, Wellen oder Kräfte aus der Anlage zu Schwingungen angeregt werden. Besonders starke Schwingungen treten auf, wenn die genannten Anregungsfrequenzen auf Resonanzen der Windradstruktur treffen. Starke niederfrequente Schwingungen sind für Turm oder Blätter lebensdauerkritisch, wohingegen starke hochfrequente Schwingungen zu störendem Luftschall führen.

Schwingungstilger (Tilger) können diese Schwingungen verhindern und erweitern damit die Möglichkeiten des Konstrukteurs, größere und leichtere Strukturen zu planen.

Pendeltilger oder die neuartigen kompakten **Rolltilger** werden in Türmen zum Reduzieren der 1. Turmeigenfrequenz eingesetzt. Weiterhin können Pendeltilger auch gegen Schwingungen der 2. Turmeigenfrequenz oder gegen windinduzierte Schwingungen beim Aufstellen des Turmes eingesetzt werden.

Passive, adaptive oder aktive Tilger ermöglichen die gezielte Reduzierung von Geräuschanteilen des abgestrahlten Schalls von Windkraftanlagen.

Einleitung

Schwingungstilger werden in verschiedenen technischen Bereichen zur Reduzierung von Schwingungen und Körperschall eingesetzt. Im Hochbau werden

diese häufig zur Vermeidung von Schäden bei Erdbeben oder zur Verringerung windinduzierter Bewegungen von Hochhäusern verwendet. Im Automobilbau ist der Schwingungstilger seit vielen Jahren Mittel zur Optimierung des Innengeräusches von Kraftfahrzeugen. In der Windkraftbranche werden zwei Arten von Schwingungstilgern benötigt: Schwingungstilger gegen niederfrequente Schwingungen, um z.B. höhere Stahltürme realisieren zu können, und Tilger gegen störenden Luftschall. Turmtilger werden bei On- und Offshore-Windkraftanlagen während der Errichtung oder im Dauereinsatz verwendet.

Funktionsweise von Tilgern

In Windkraftanlagen kommen passive, adaptive und aktive Schwingungstilger zum Einsatz, wobei aufgrund der niedrigeren Kosten und der geringeren Störanfälligkeit, häufig passive Tilger bevorzugt werden.

Ein passiver Schwingungstilger ist ein gedämpftes Feder-Masse-System, das mit dem zu beruhigenden System (z.B. Turm oder Getriebe der Windkraftanlage) verbunden ist. Der passive Schwingungstilger baut infolge der Anregung des schwingenden Systems eine Gegenbewegung auf. Damit wird die Amplitude eines in seiner Resonanzfrequenz schwingenden Bauteils deutlich reduziert (siehe grüne Linie in Bild 1). Das Funktionsprinzip von passiven Tilgern ist für alle Frequenzbereiche gleich und gilt so-

wohl für Turmtilger, die bei 0,2Hz – 2Hz arbeiten, als auch für Schalltilger, die für Frequenzen größer 20Hz ausgelegt sind.

Bei der Auslegung des Tilgers müssen Steifigkeit (C2), Masse (M2) und Dämpfung (D2) optimal auf die schwingende Struktur abgestimmt werden. Die Feder kann dabei ein Elastomerelement, ein Pendel oder eine Laufbahn mit entsprechenden rückstellenden Eigenschaften sein. Die notwendige Dämpfung kann über Materialdämpfung eines Elastomers, viskose Flüssigkeits- oder Wirbelstromdämpfung erzeugt werden. Die Tilgermasse richtet sich nach der schwingenden Masse des zu beruhigenden Systems und sollte bei etwa 10 % liegen. Aus Gewichts-, Platz- und Kostengründen liegt diese oft deutlich niedriger.

Ein Spezialfall des passiven Tilgers ist der adaptive Tilger. Dieser wird mit möglichst wenig Dämpfung ausgeführt, damit er in seinem Arbeitspunkt eine sehr starke Wirkung hat (siehe blaue Kurve in Bild 1). Um die schlechte Wirkung rechts und links des Arbeitspunktes zu vermeiden wird die Steifigkeit des adaptiven Tilgers mit Hilfe einer elektromechanischen Einheit dem meist schmalbandigen Störsignal der Windkraftanlage nachgeführt. Adaptive Tilger kommen vor allem bei höherfrequenten Schwingungen zum Einsatz (20Hz-300Hz).

Beim aktiven Tilger werden Frequenz, Amplitude und Phase der aufgebrachten Kraft so geregelt, dass sich Stör- und Tilgerkraft gegenseitig aufheben. Dadurch kann ein schwingendes System in einem weiten Frequenzbereich beruhigt werden.

Turmschwingungen

Türme von Windkraftanlagen werden durch Wind und Wellen (Offshore) sehr häufig zu Schwingungen in der 1. Turmeigenfrequenz angeregt. Seltener treten Schwingungen der 2. Turmeigenfrequenz in kritischen Bereichen auf, da diese über die Anlagensteuerung ausgeblendet werden können. Die Türme sind in den letzten Jahren kontinuierlich höher geworden – derzeit wird über Höhen im Bereich von 170m diskutiert. Dadurch verschieben sich die Frequenzen der ersten und zweiten Turmeigenfrequenz weiter nach unten und die Türme werden

anfälliger gegenüber Anregung durch Wind und Wellen. Türme von Windkraftanlagen sind auch während der Errichtung anfällig für Wind- und Wellenanregung, da zu diesem Zeitpunkt die dämpfende Wirkung der Blätter fehlt.

Mögliche Gegenmaßnahmen sind der Einbau von Dämpfungselementen oder von Schwingungstilgern. Schwingungstilger für die erste Turmeigenfrequenz stehen in verschiedenen Bauformen zur Verfügung. In der Literatur werden u.a. pendelnde Metallringe in einem großen Öltank [1] oder Tilger nach dem Prinzip von schwingenden Flüssigkeitssäulen [2] beschrieben. Daneben werden gedämpfte Pendel zur Minimierung der Auslenkungsamplituden der ersten und zweiten Turmeigenfrequenz verwendet. Um eine effektive Wirkung zu erreichen, müssen diese Pendeltilger entsprechend große Massen und Dämpfungen aufweisen. Als guter Kompromiss zwischen Wirkung und Kosten hat sich eine Tilgermasse im Bereich von ca. 2% der schwingenden Masse der ersten Turmschwingung bewährt.

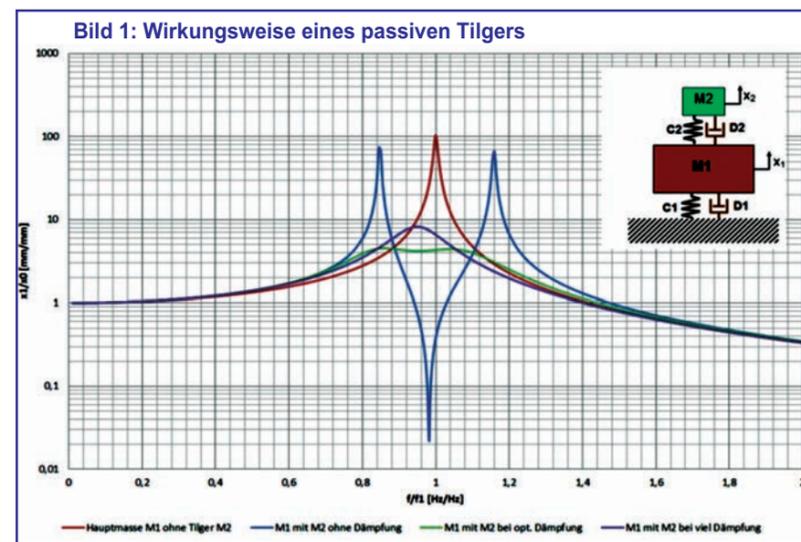
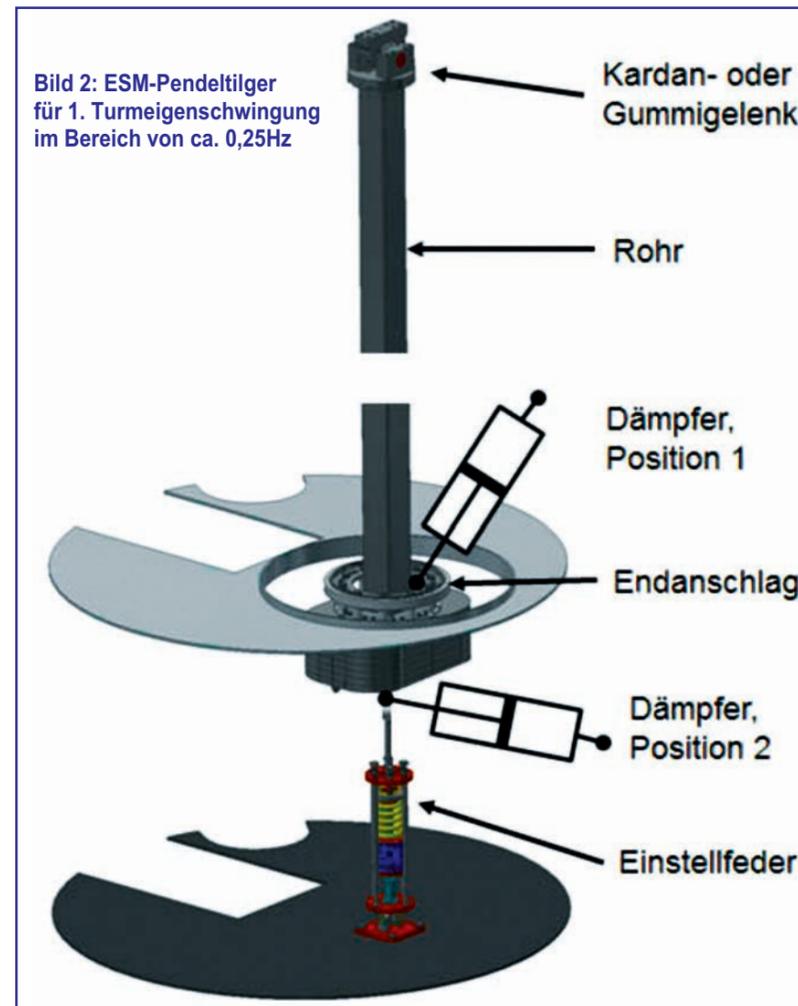
Pendeltilger für die 1. Turmeigenfrequenz

Der ESM-Pendeltilger (siehe Bild 2) ist über ein Kardangelenke am oberen Ende des Turmes befestigt. Über eine Pendelstange ist die Tilgermasse mit dem Turm verbunden. An der Masse greifen außerdem die Dämpfer und die Einstellfeder an. Das Kardangelenke kann auf Gleit- oder Rollenlagern basierend aufgebaut sein. Alternativ kann ein neu entwickeltes Kugelgummigelenke alle Lasten und Bewegungen des Tilgers aufnehmen.

Die Lebensdauer dieses elastomeren Kardangelenkes wurde für einen 10t-Tilger mit 25 Jahren für den Offshore-Einsatz nachgewiesen.

Die geforderte Dämpfung des Tilgers kann mittels temperaturkompensierten und weitgehend wartungsfreien hydraulischen oder magnetischen Dämpfern erreicht werden.

Der elastische Endanschlag verhindert bei extremen Ausschlägen der Tilgermasse einen harten Stoß an der Turmwand. Speziell entwickelte Feder-elemente mit einer besonders weichen Steifigkeitskennlinie sorgen für ein sanftes Anschlagen der Masse bei Extremlastfällen. Aufgrund von Fundamenteinfluss und Fertigungstoleranzen haben Windkraftanlagen unterschiedliche Eigenfrequenzen. Mit Hilfe der zwischen unterem Ende der Tilgermasse und Turm befestigten Feder kann die Frequenz des Tilgers entsprechend nachjustiert werden.



Rolltilger für die 1. Turmeigenfrequenz

Dem gegenüber wirkt der ESM-Rolltilger (siehe Bild 3) bereits mit deutlich kleineren Massenverhältnissen sehr effektiv. Auf einer gebogenen Führungsleiste wird über ein Rollensystem eine Masse (blau in Bild 3) zu periodischen Bewegungen angeregt.

Die Eigenfrequenz des Tilgers wird im Wesentlichen durch den Radius der Laufbahn und die Trägheit der Schwingscheibe (rundes Teil in Bild 3) be-

stimmt. Die mögliche exakte Einstellung der Tilgereigenfrequenz erfolgt durch die einstellbare Massesträgheit der Schwingscheibe. Die Wirbelstrom-Dämpfung des Systems ist ebenfalls einstellbar und kann somit den jeweiligen Anforderungen entsprechend angepasst werden. Weiterhin trägt ein hoher Schwingweg im Bereich von zwei bis vier Metern zur Effizienz des Rolltilgers bei. Aufgrund der kompakten Bauweise kann dieses System sehr einfach im Turm eingebaut, oder besser noch direkt in oder sogar auf der Gondel installiert werden. Damit kann

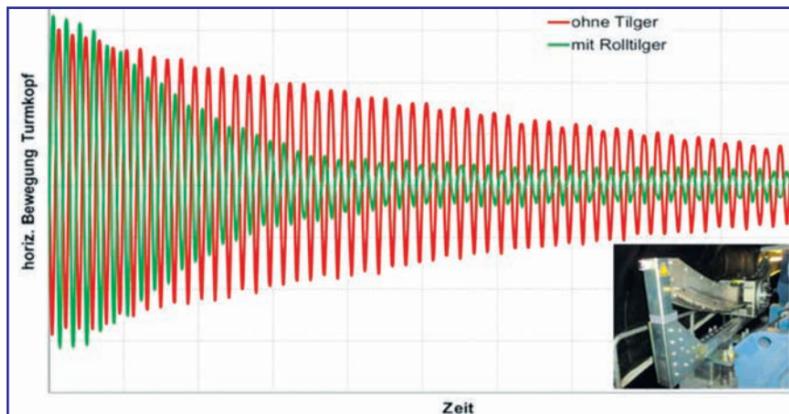


Bild 4: Ausschwingen einer 2MW-Anlage ohne und mit 500kg-Rolltilger

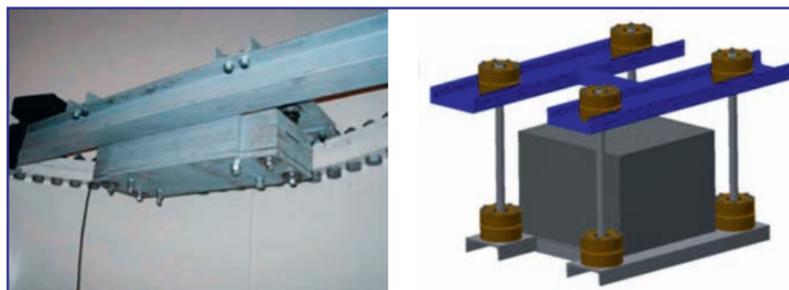


Bild 5: Kompakte ESM-Tilger für die 2. Turmeigenfrequenz



Bild 6: Errichtungstilger von ESM für den Aufbau von WKA-Türmen.

dieser Tilger im Schwingungsbauch der ersten Turmeigenfrequenz platziert und damit sehr wirkungsvoll eingesetzt werden. Messungen mit dem ESM-Rolltilger in einer 2MW-Anlage zeigen, dass mit einem Massenverhältnis im Promillebereich die Dämpfung der ersten Eigenfrequenz des Turms um einen Faktor 3,5 erhöht wird. Bild 4 zeigt den Ausschwingvorgang des

Turmes der 2MW-Anlage ohne und mit Rolltilger. Aufgrund der höheren Dämpfung klingen die Turmschwingungen mit eingebautem ESM-Rolltilger deutlich schneller ab. Dank der kompakten Bauweise können auch zwei dieser Tilgersysteme um 90° verdreht in einer Anlage eingebaut werden. Damit werden durch verschiedene Anregungsmechanismen hervorgerufene Turmschwingungen reduziert.

Tilger für die 2. Turmeigenfrequenz

Um störende Schwingungen mit der 2. Turmeigenfrequenz zu verringern, kann ebenfalls ein ESM-Pendeltilger eingesetzt werden. Allerdings liegen typische Frequenzen der 2. Turmeigenfrequenz im Bereich von ca. 1.0-2.0Hz. Damit wird die Pendellänge sehr klein und der Tilger baut sehr kompakt (siehe Bild 5). Die in den zur Aufhängung verwendeten Elastomerelemente vorhandene Materialdämpfung ist ausreichend, um die geforderte Gesamtdämpfung des Tilgers zu erzielen.

Errichtungstilger

Türme in der Errichtungsphase bzw. während des Transports auf Schiffen sind anfällig für Wind- und Wellenanregung, da die Schwingungsdämpfung durch die Blätter fehlt. Um Schäden an den Türmen bzw. kostspielige Wartezeiten zu vermeiden, können ESM-Errichtungstilger eingesetzt werden. Diese verhindern während der verschiedenen Phasen beim Aufbau einer WKA, dass der Turmstummel zu gefährlichen Schwingungen angeregt wird. Bei dem in Bild 6 dargestellten Errichtungstilger handelt es sich um eine eigenständige, selbsttragende Konstruktion, die auf die Turmflansche geschraubt wird. Der Errichtungstilger kann in einem Frequenzbereich von ca. 0,4Hz bis 1,4Hz einfach, schnell und ohne Werkzeuge eingestellt werden. Die Einstellbarkeit ist erforderlich, weil sich mit dem Errichtungsschritt auch die Turmeigenfrequenzen ändern. Zudem ist der zulässige Schwingweg von +/- 450mm so groß gewählt, dass trotz relativ kleiner Tilgermasse eine sehr gute Wirkung erzielt wird. Das Dämpfungselement des Errichtungstilgers ist unabhängig von Temperatur und Lebensdauer. Ohne diese Eigenschaften wäre entweder die Tilgerwirkung stark eingeschränkt (zu hohe Dämpfung) oder unzulässig große Tilgeramplituden könnten auftreten (zu niedrige Dämpfung). Temperaturschwankungen werden nicht nur durch die Umgebung induziert, sondern auch durch die Eigenerwärmung der Dämpfungselemente während des Betriebs. Das hier beschriebene System kommt gänzlich ohne Spannungsversorgung aus.

Tonale Geräusche in Windkraftanlagen.

Die Anforderungen an das Geräuschverhalten von Windkraftanlagen (WKA) sind durch den Druck der Öffentlichkeit, die Normungen und den Konkurrenzdruck der WKA-Hersteller relativ hoch. Im Nor-



Bild 7: Passive Tilger von ESM gegen Körperschall, links: 3-Achstilger, Mitte: 1-Achstilger, rechts: Torsionstilger.

malbetrieb werden die Geräusche von WKA vor allem durch die Umströmung der Blätter, durch die Zahneingriffe im Getriebe oder durch die magnetischen Kräfte im Generator verursacht. Insbesondere die Kräfte aus Getriebe und Generator können die WKA zu Schwingungen anregen, die sich in der Struktur als Körperschall ausbreiten und über die großen Flächen der Gondelverkleidung, der Blätter oder des Turms als Einzeltöne abgestrahlt werden. Ob und wie stark Einzeltöne von außen wahrgenommen werden können, hängt vom Anregungs-, Resonanz- und Abstrahlverhalten der Anlage ab. Abhängig davon können die folgenden Gegenmaßnahmen gegen Einzeltöne ergriffen werden:

- (i) Anregung reduzieren, (ii) Anregung isolieren, (iii) Abstrahlflächen isolieren, (iv) Abstrahlverhalten ändern, (v) Eigenfrequenzen verstimmen, (vi) Eigenfrequenzen dämpfen oder (vii) Anregung auslöschen durch Einleiten von Gegenkräften.
- Maßnahmen (i)-(v) erfordern meist einen großen Aufwand bis hin zur Änderung der Triebstrangkonzeppts. Maßnahmen (vi) und (vii) können in Form von passiven, adaptiven oder aktiven Tilgern mit relativ einfachen Mitteln nachträglich an bestehenden WKA nachgerüstet werden.

Passive Tilger gegen Körperschall

Passive Tilger sind ein Mittel, um Eigenfrequenzen zu dämpfen und so Einzeltöne zu vermeiden. Sie werden vor allem dann eingesetzt, wenn Anregungskräfte aus Getriebe oder Generator in Frequenz, Ort und Richtung so ungünstig liegen, dass sie Resonanzen der WKA anfachen. Um diese Resonanzen zu bedämpfen müssen Masse (M2), Federsteifigkeit (C2), Dämpfung (D2) und Position des Tilgers auf die Schwingungen der

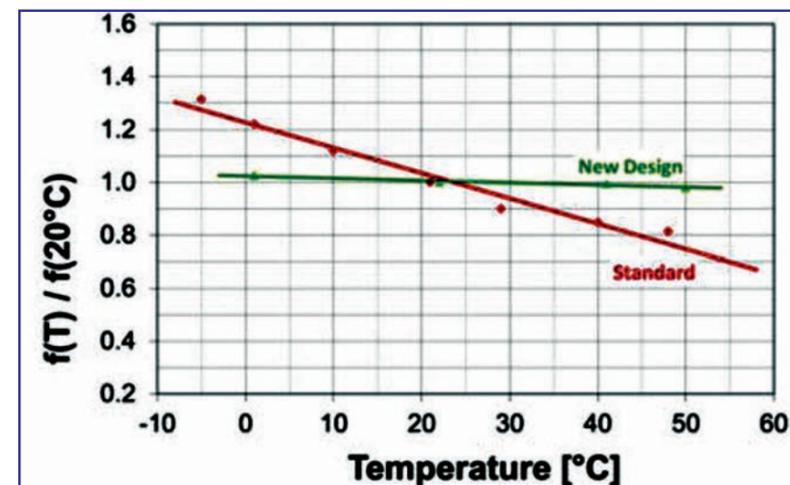


Bild 8: Abhängigkeit der Frequenz von der Temperatur bei verschiedenen Tilgersystemen.

WKA abgestimmt werden. Bei optimaler Auslegung (grüne Kurve in Bild 1) können Reduktionsfaktoren von 10 und mehr erreicht werden. Passive Tilger von ESM (siehe Bild 7) können in einem weiten Bereich in Richtungen, Masse, Steifigkeit und Dämpfung auch auf der WKA eingestellt werden. Außerdem sind die Tilger nachrüstbar und können kurzfristig an Bauräume angepasst werden. Für Anwendungen bei veränderlicher Umgebungstemperatur hat ESM einen passiven Tilger entwickelt, der seine Frequenz mit der Temperatur nicht verändert (siehe Bild 8). Nimmt die Steifigkeit der Gummielemente durch eine höhere Temperatur ab, wird gleichzeitig durch eine passive Vorrichtung zur Temperaturkompensation die Vorspannung erhöht und so der Frequenzabfall ausgeglichen.

Adaptiver Tilger gegen Körperschall

Der Einsatzbereich von passiven Tilgern ist auf schwach gedämpfte Eigenfrequen-

zen oder Anregungen bei einer festen Frequenz beschränkt. Liegen im Anregungsbereich mehrere Eigenfrequenzen oder will man direkt gegen die anregenden Kräfte am Getriebe oder Generator vorgehen, so kann man adaptive (d.h. frequenzveränderliche) Tilger verwenden. Diese bestehen aus einer Masse und einer schwach gedämpften Feder, sodass sich der Tilger in seinem Resonanzpunkt relativ stark bewegt und damit große Gegenkräfte in die Grundstruktur einleitet (siehe blaue Kurve in Bild 1). Diesen Effekt nutzt man, um die Grundstruktur auch abseits von Eigenfrequenzen zu beruhigen (siehe Bild 9). Um der veränderlichen Frequenz der Anregung folgen zu können, wird die Steifigkeit der Feder durch eine Mechanik und einen Regelmechanismus auf die Anregungsfrequenz abgestimmt. Für die Verstellung wird eine geringe Antriebsleistung benötigt. Eine weitere Möglichkeit, Strukturschwingungen direkt am Getriebe oder Genera-

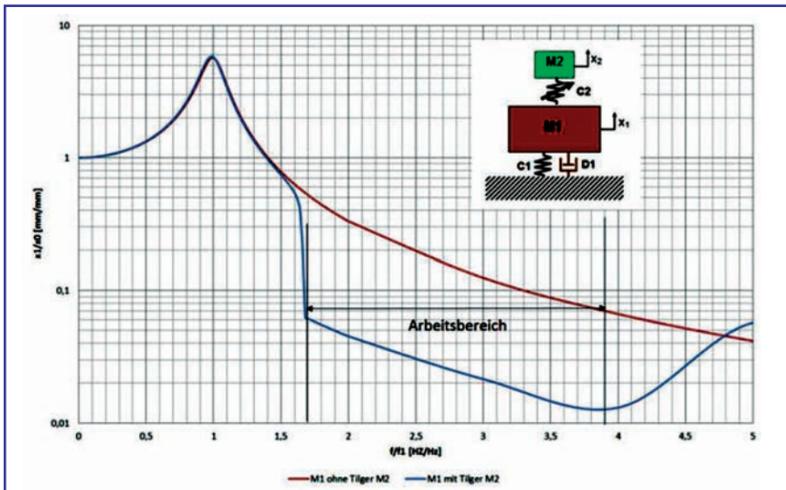


Bild 9 Wirkung des adaptiven Tilgers. Aktiver Tilger gegen Körperschall

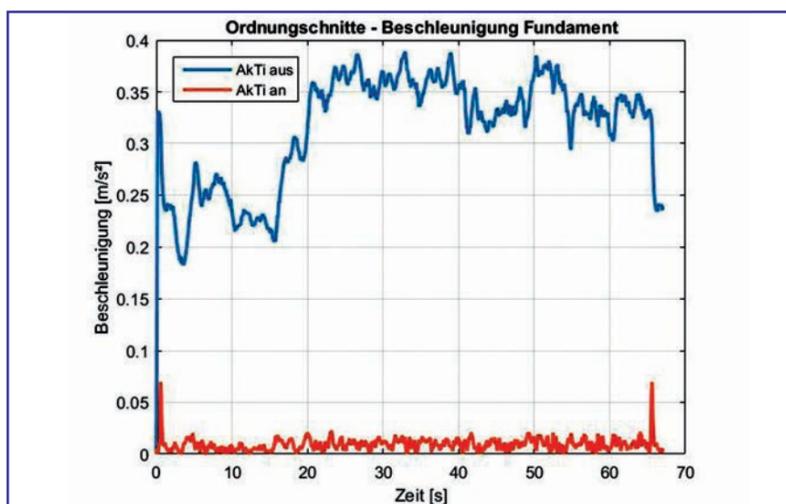


Bild 10 Schwingungen einer Masse ohne (blau) und mit aktivem Tilger (rot)

tor zu bekämpfen, ist die Verwendung von elektrischen Aktoren wie elektrodynamischen Shakern oder mehreren gekoppelten Unwuchtmotoren. Gibt man dem Aktor mit einer Regelung die richtige Frequenz, Phase und Amplitude vor, leitet der aktive Tilger Gegenkräfte in die Struktur ein, die die anregenden Schwingungen reduzieren. Die Effektivität der Tilger hängt von der eingebrachten Leistung und der Tilgerposition ab. Aktive ESM-Tilger können Kräfte bis zu 6kN in einem Frequenzbereich zwischen 50Hz und 150Hz erzeugen. Reale Messungen, wie in Bild 10 dargestellt, zeigen starke Reduzierungen von einzelnen Tönen im Körperschall.

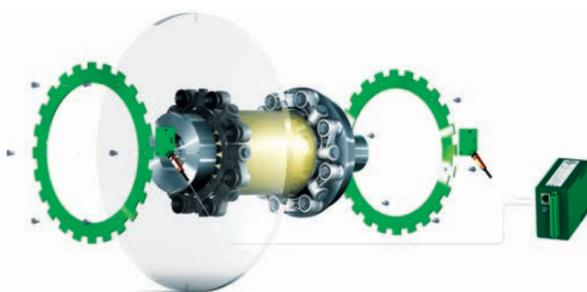
Literatur

- [1] Faber T., Dalhoff P., Dynamic behaviour of oil dampers in wind turbine towers, Proceedings of 2002 Global Windpower Conference & Exhibition, Paris
 [2] Colwell S., Basu B., Tuned liquid column dampers in offshore wind turbines for structural control, Eng Struct 31 (2009), 358-368

Autoren :

Dr. Lukas Schneider
Dr. Karl-Heinz Hanus
Mathias Dörsam
ESM Energie- und Schwingungstechnik Mitsch GmbH
 Energiestraße 1
 D-64646 Heppenheim
 Tel.: +49 (0) 6252 / 68 93 - 0
 email : info@esm-gmbh.de
 www.esm-gmbh.de

Genta Antriebe Kirschey mit neuen Entwicklungen in Hamburg



Condition Monitoring System CENTA-TLMS

Mit dem neuen CENTA-TLMS werden sämtliche Rutschvorgänge einer drehmomentbegrenzenden Rutschkupplung erfasst und übersichtlich hinsichtlich Anzahl, Zeitpunkt, Dauer, Rutschwinkel, Rutschgeschwindigkeit, Drehzahl, Drehmoment und weiteren Größen eines Rutschvorgangs ausgewertet. Die intuitiv bedienbare Steuerung ermöglicht die Einstellung benutzerdefinierter Meldungen z. B. zum Auslösen von E-Mail-Warnungen und/oder dem Schalten von Schaltausgängen. Dies erlaubt die permanente Fernüberwachung per integriertem komfortablem Web-Interface.

Centa ist in iHamburg in Halle B6 an Stand 323.

Leichtbau Antriebswelle CENTADISC-C (Composite)

Neben hohen Versatzwerten in axialer, radialer und winkelliger Richtung erlauben die durchschlagssicher elektrisch isolierenden Membranen auch den Einsatz von Carbonwellen zur weiteren Gewichtsreduktion gegenüber Glasfaserwellen. Die CENTADISC-C ist wartungsfrei und montagefreundlich durch radiale Tauschbarkeit. Bei Bedarf ist die axiale Trennung der formschlüssig über eine Stirnverzahnung verbundenen Flanschaufnahme zum Membrangelenk möglich. Die derzeit verfügbaren Größen sind geeignet für Windkraftanlagen bis 1,5 MW.