

# Schwingungs- und Schallreduzierung durch den Einsatz einstellbarer Schwingungsdämpfer

Franz Mitsch, Dr. Karl-Heinz Hanus, Rimbach

## Kurzfassung

Schwingungsdämpfer werden in vielen technischen Anwendungen zur Reduzierung von Einzeltönen in Maschinengeräuschen und niederfrequenten Schwingungen eingesetzt. Die von ESM entwickelten Schwingungsdämpfer zur Körperschallreduktion können in ihrer Frequenz beliebig eingestellt werden. Für besondere Anwendungen wurde ein in allen drei Raumachsen bzgl. seiner Frequenz einstellbarer Tilger entwickelt. Ebenso können die verwendeten Massen im Bereich von 30 bis 500 kg nahezu beliebig variiert und somit den technischen Erfordernissen angepasst werden. Die Wirkungsweise der beschriebenen Schwingungsdämpfer wird anhand von verschiedenen Beispielen beschrieben.

## Abstract

Vibration absorbers are used in many technical applications for the reduction of tones in noise emitted from different machines as well as for the reduction of low frequency vibrations. The vibration absorbers for reduction of structure-borne noise developed by ESM are tuneable to every frequency required by the system. For special applications a vibration damper which is tuneable in all three co-ordinates was developed. The masses in the range from 30 to 500 kg can be varied nearly arbitrary. The effect of some vibration absorbers used in various applications is shown.

## 1. Einleitung

ESM entwickelt, produziert und liefert Gummi-Metall-Elemente zur Schwingungsisolierung und -dämpfung für Windkraftanlagen und den allgemeinen Maschinenbau. In fast allen gängigen Windrädern werden die bis zu 60t schweren Getriebe und die bis zu 20t schweren Generatoren auf Elastomerbauteilen von ESM elastisch gelagert. Diese Lager haben die Aufgabe, zum einen die auftretenden statischen und dynamischen Kräfte über eine geforderte Lebensdauer von 20 Jahren aufzunehmen und zum anderen den in Getriebe und Generator entstehenden Körperschall von den Maschinenträgern möglichst optimal zu isolieren. Dazu muss immer ein Kompromiss bezüglich der eingesetzten Federsteifigkeit der

verwendeten Elastomerlager gefunden werden. Typische Störfrequenzen aus den Zahneingriffen der Getriebe liegen zwischen 100 und 600 Hz.

Die Maschinenträger sind gewichtsoptimierte Stahl- oder Gusskonstruktionen, die oft in dem oben erwähnten Frequenzbereich Strukturresonanzen aufweisen. Liegen diese Resonanzen nahe den Getriebefrequenzen so taucht ein störender Einzelton im abgestrahlten Geräuschspektrum der Windkraftanlage auf. Um solche Einzeltöne zu vermeiden, hat ESM einstellbare Schwingungstilger entwickelt. Natürlich ist der Einsatz nicht nur auf Windräder beschränkt, sondern kann an allen technischen Anlagen erfolgen, bei denen Schwingungen oder Töne bei bestimmten Frequenzen reduziert werden sollen.

## 2. Grundlagen Schwingungstilger

Unter Tilger versteht man in der Mechanik einen Zusatzschwinger, der die Amplitude eines bei seiner Resonanzfrequenz schwingenden Systems deutlich reduzieren kann. Ein Tilger im eigentlichen Sinn ist ein ungedämpftes Feder-Masse-System, d.h. eine Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme findet nicht statt. Bei technischen Anwendungen werden allerdings zum größten Teil gedämpfte Feder-Masse-Systeme eingesetzt. Man spricht dann von einem Schwingungsdämpfer.

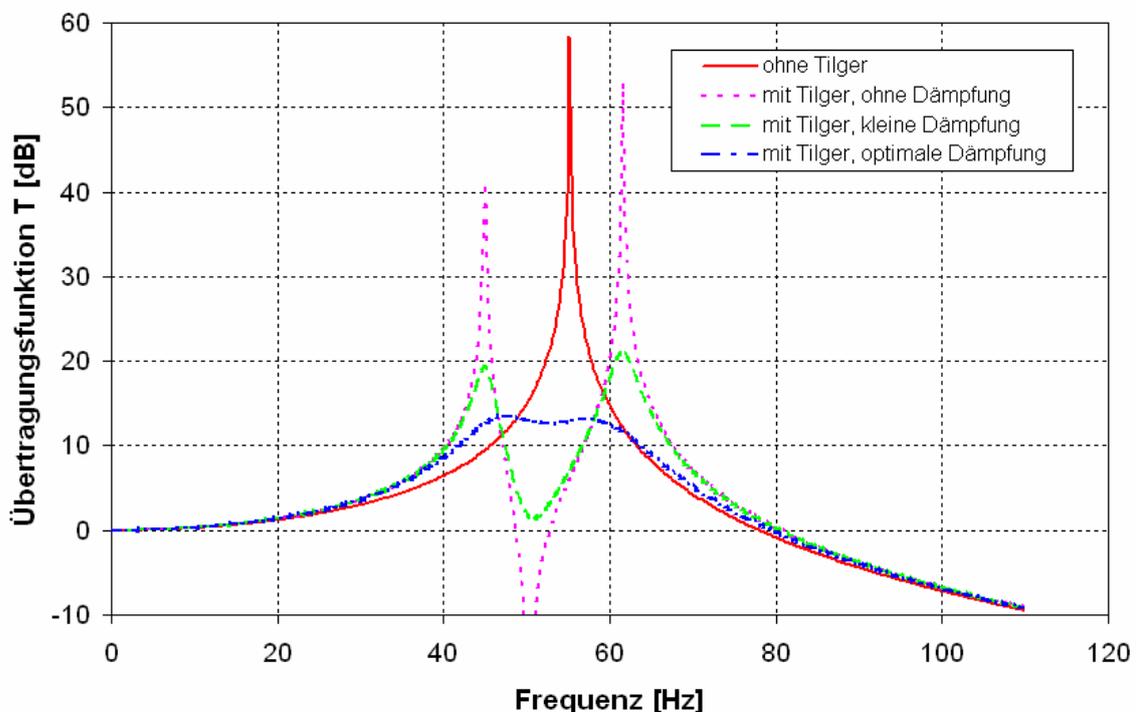


Bild 1: Prinzipielle Wirkungsweise eines Schwingungstilgers

Die Feder kann dabei ein Elastomerelement mit entsprechender Steifigkeit und Dämpfung sein. Die Masse richtet sich nach der Masse des zu beruhigenden Systems und sollte im optimalen Fall bei etwa 10 % der Systemmasse sein, muss aber aus Gewichts- und Platzgründen oft niedriger werden. Bei der Auslegung des Dämpfers müssen Frequenz, Masse und Dämpfung optimal aufeinander abgestimmt werden.

Schwingungsdämpfer werden in weiten Bereichen der Technik zur Reduzierung von Schwingungen und Geräuschen eingesetzt. So haben diese Bauteile schon seit langer Zeit im Fahrzeug und Maschinenbau eine breite Anwendung erfahren.

### **3. Einsatz von Tilgern zur Reduzierung von Schwingungen und Schall**

#### **3.1 Tilger für störende Schwingungen mit niedrigen Frequenzen**

Mit Hilfe von Schwingungstilgern können sowohl niederfrequente Schwingungen im Frequenzbereich von 0,5 bis 20 Hz als auch höherfrequente Schwingungen im Frequenzbereich von 20 bis 1000 Hz verringert werden. Im ersten Fall werden diese häufig zur kostengünstigen schwingungstechnischen Optimierung von Maschinen und Anlagen eingesetzt. So werden z.B. im Fahrzeugbau häufig Cabrios mit Tilgern zur Reduzierung von Karoserieschwingungen im Frequenzbereich von 10 bis 20 Hz ausgestattet. Mit Hilfe dieser Tilger kann der Fahrkomfort von diesen Fahrzeugen kosten- und gewichtsgünstig optimiert werden.

Türme von Windkraftanlagen schwingen im Wesentlichen in ihrer ersten und zweiten Eigenmode, wobei die erste im Frequenzbereich von 0,3 bis 0,4 Hz liegt, die zweite zwischen 2 und 3 Hz. Der Ort der größten Bewegung – hier sollte üblicherweise ein Tilger angebracht werden – ist bei der ersten Mode am oberen Ende des Turmes, bei der zweiten in der Mitte bis 2/3 Turmhöhe. Um beide Schwingungsmoden zu beeinflussen, müssen also zwei Tilger eingesetzt werden. Allerdings muss der Tilger für die erste Turmeigenschwingung eine relativ hohe Masse haben (im Bereich von 1 bis 10 Tonnen) die i. Allg. pendelnd aufgehängt ist. Tilger für die zweite Turmfrequenz werden in etwa der Turmmitte angebracht und können kleinere Massen haben.

#### **3.2 Tilger für höherfrequenten Körperschall**

Im zweiten Fall werden Tilger zur Verbesserung des akustischen Verhaltens von Fahrzeugen oder Maschinen eingesetzt. So sind in vielen Fahrzeugen - vom Kleinwagen bis zur

Oberklasse - Tilger an verschiedenen Stellen wie Motor oder Fahrgestell eingebaut, um das Innengeräusch für Fahrer und Beifahrer angenehmer zu gestalten.

Bei Windrädern können mit Hilfe von Tilgern Töne aus dem von der Anlage emittierten Geräusch gefiltert werden, was oft erst einen kontinuierlichen Betrieb erlaubt. Das Frequenzspektrum des von Windkraftanlagen emittierten Geräusches setzt sich zusammen aus einem bestimmten Grundpegel dem verschiedene, mehr oder weniger starke Töne überlagert sind.

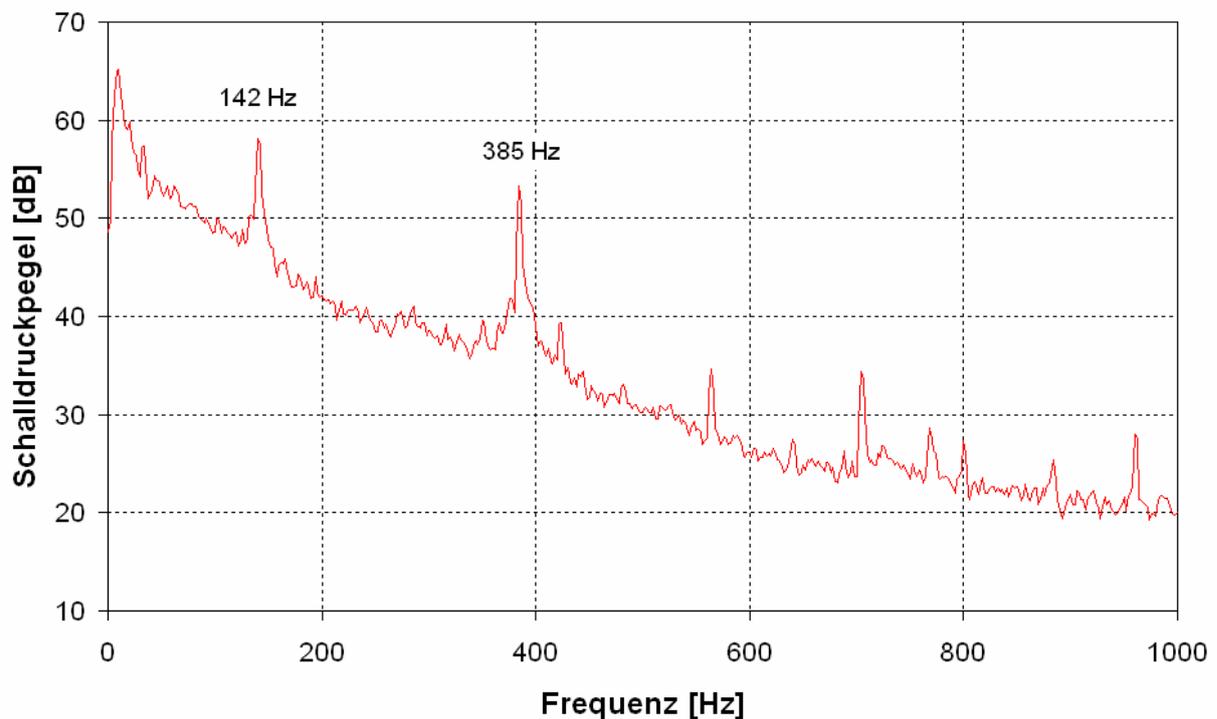


Bild 2: Beispiel für Geräuschspektrum einer Windkraftanlage

Diese tonalen Anteile können verschiedene Ursachen haben. Bei Anlagen mit Getrieben sind dies i. Allg. die Zahneingriffsfrequenzen der entsprechenden Planetenstufen. Liegen diese benachbart zu Resonanzen von Komponenten in der Gondel (z.B. Teile des Maschinenrahmens) oder des Turmes, so ergibt dies einen deutlich wahrnehmbaren Ton im von der Windkraftanlage abgestrahlten Geräusch. Diese Töne können mit Hilfe von einstellbaren Tilgern von ESM reduziert werden.

#### 4. Neue Möglichkeiten zur Schallreduzierung durch den Einsatz einstellbarer Tilger-Baureihen

Da der bisherige Aufwand zur Entwicklung und Anpassung von passiven Tilgern an die Gegebenheiten relativ groß ist, werden Tilger besonders in Massenartikeln (z.B. Automobil) und großen Einzelprojekten (z.B. Hochhäuser, Schornsteine) eingesetzt. Um Tilger verstärkt im allgemeinen Maschinenbau einsetzen zu können, sind kostengünstige Systeme mit kurzen Entwicklungszeiten erforderlich. Diesen Anforderungen entsprechend wurde eine neue Generation von passiven Tilgern entwickelt.

Tabelle 1: Entwicklungsziele für lineare Tilger und Torsionstilger

	Bisher	Anforderungen an neue Tilgergeneration
Entwicklungszeitraum	Monate	Tage
Einsatzgebiete	Massenbauteile und große Einzelprojekte für die sich der Entwicklungsaufwand und die Entwicklungszeit lohnt	Für alle Einsatzgebiete vorgesehen
An Änderungen der Maschine anpassbar	Grundsätzliche Veränderung erforderlich oder Änderung in Stufen möglich	Kann individuell angepasst werden. Einstellung kann während dem Betrieb der Maschine/Anlage justiert werden.
Anpassungsfähigkeit	Masse ist in Stufen einstellbar, bei Inkaufnahme der daraus resultierenden Frequenzveränderung. Frequenz kann nur mit entsprechendem Aufwand verändert werden	Die Masse ist in Stufen einstellbar. Die Frequenz kann stufenlos eingestellt werden
Betrieb in mehreren Achsen	Bisher nur mit aufwändigen Konstruktionen möglich	Die neuen Tilger sind in drei Achsen einstellbar
Betrieb mit mehreren Frequenzen	Bisher nur mit aufwändigen Konstruktionen möglich	Die Tilgerfrequenz in einer Ebene und in einer senkrecht zur Ebene stehenden Achse ist mit der gleichen Frequenz oder einer beliebig abweichenden Frequenz einstellbar
Einfache Montage und Transport an schwer zugängliche Stellen	Bisher in der Regel schwere, nicht einfach zu transportierende Massen	Der Tilger ist aus leichten Einzelbauteilen aufgebaut und kann aus den Einzelteilen einfach zusammengesetzt werden.

Mit den im Folgenden beschriebenen Tilgersystemen konnten diese Entwicklungsziele erreicht werden.

#### 4.1 Einstellbarer einachsiger Lineartilger

Dieser Tilger wird mit einer zentralen Schraube an der zu beruhigenden Maschine befestigt. Bisherige Ausführungen wurden für den Frequenzbereich zwischen 50Hz und 1000Hz mit Massen zwischen 30kg und 500kg eingesetzt.

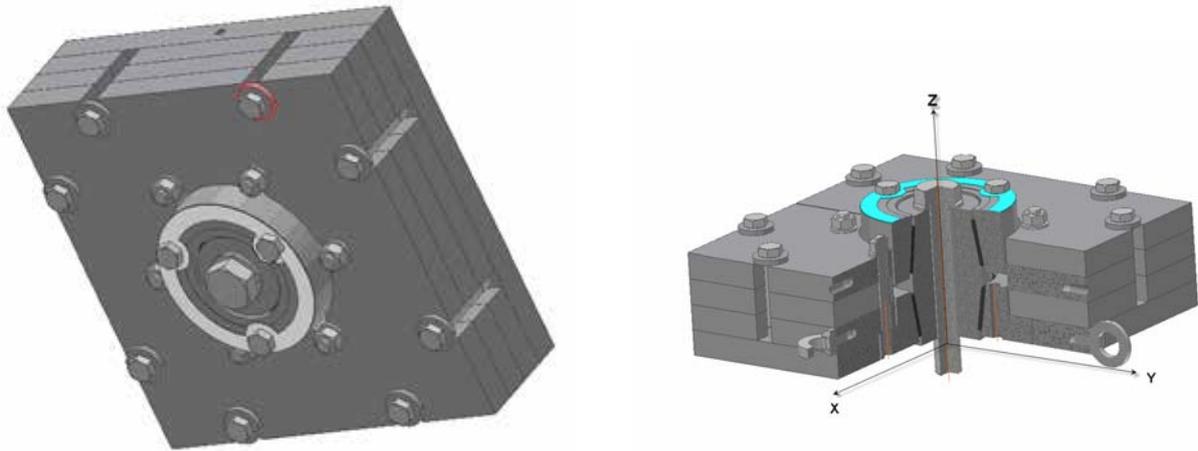


Bild 3: Einstellbarer Lineartilger

#### 4.2 Einstellbarer dreiachsiger Lineartilger

Dieser Dreiachstilger ist ähnlich aufgebaut wie der oben beschriebene einachsige Lineartilger, jedoch ist er in drei Achsen einstellbar. Dabei kann die Z Achse mit einer beliebigen Frequenz eingestellt werden. Gleichzeitig kann die X-Y Ebene mit der gleichen oder einer beliebig abweichenden Frequenz eingestellt werden.

Der Frequenzbereich ist auch hier beliebig wählbar.

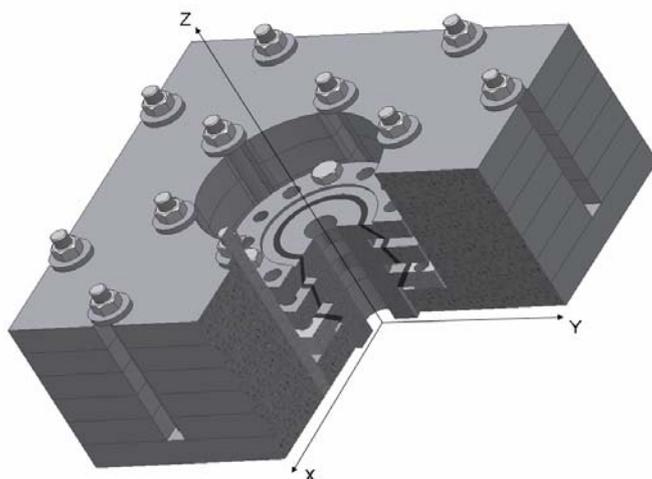


Bild 4: Dreiachsig einstellbarer Tilger

Beide Tilger (einachsig und dreiachsig) sind modular aufgebaut und somit in allen Ausführungen sofort verfügbar. Das Einstellen der Tilgerfrequenz und Masse erfolgt in der Regel bei ESM, kann aber auch vor Ort erfolgen. Der Tilger ist in beliebigen Formen ausführbar. Vorrätig und deshalb schnell verfügbar ist in der Regel die abgebildete quadratische Form mit den Abmessungen 400\*400mm oder auch eine runde Ausführung.

#### **4.3 Einstellbarer Torsionstilger**

Zur Abrundung des Programms der einstellbaren Tilger soll hier noch der einstellbare Torsionstilger vorgestellt werden.

Auch dieser ist wie die oben beschriebenen Tilger in seiner Torsions-Eigenfrequenz stufenlos einstellbar.

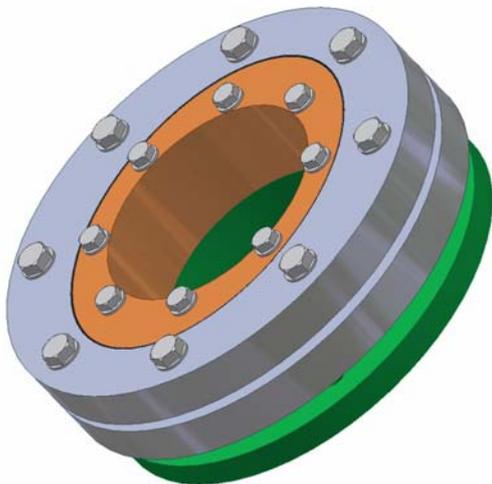


Bild 5: Einstellbarer Torsionstilger



Bild 6: Einstellung des Torsionstilgers

### 5. Vorgehensweise zur Schwingungs- und Schallreduzierung an Maschinen

Als erstes werden die Daten Störfrequenz(en) und erforderliche Tilgermasse benötigt. In der Regel sind diese Daten nicht verfügbar, so dass diese durch Messungen an der Maschine ermittelt werden. Anschließend wird die Bauart, linear einachsig, linear dreiachsig oder Torsionstilger festgelegt. Der Tilger wird auf dem Prüfstand montiert und eingestellt. Sofern an der Baustelle entsprechendes Hebezeug vorhanden ist, wird der Tilger komplett montiert. Falls der Tilger an schlecht zugänglichen Stellen montiert werden soll, wird er wieder in seine Einzelteile zerlegt und vor Ort montiert. Die Montage ist einfach und die vorher getätigten Einstellungen werden durch die Demontage und anschließende Montage vor Ort nicht beeinflusst.

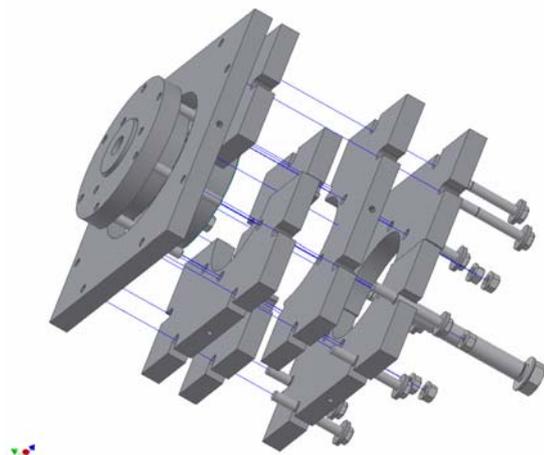


Bild 7: Durch die Zusammenstellung kleiner Einzelbauteile mit geringem Gewicht, lassen sich die Tilger auch an schwer zugänglichen Orten ohne Hebezeug montieren

Nach der Montage erfolgt der Test. Gegebenenfalls kann der eingebaute Tilger während des Betriebes justiert werden. In der Regel erfolgt eine Körperschall- und Schallmessung vor und nach dem Einbau des Tilgers um die Wirkung zu ermitteln.

## 6. Anwendungsbeispiele und Ergebnisse

### 6.1 Tilger zur Reduzierung von störenden Schwingungen

Bei der in Bild 8 dargestellten Prüfmaschine traten nach Inbetriebnahme sehr hohe Schwingungen bei ca. 150 Hz auf. Durch Installation eines ca. 35 kg schweren Schwingungstilgers konnte die Amplitude dieser Schwingung etwa um einen Faktor 10 reduziert werden. Dadurch konnte ein störungsfreier Prüfbetrieb gewährleistet werden.



Bild 8: Tilger zur Schwingungsreduzierung in Prüfmaschinen



Bild 9: Ausschnitt aus Bild 8: Einbau in Prüfmaschine

Bei einer freitragenden Treppe mit sehr geringer Eigendämpfung traten beim Begehen sehr starke Schwingungen um ca. 3,5 Hz auf. Durch Einbau eines Schwingungsdämpfers mit knapp 10% Masse (bezogen auf die Treppenmasse) in einem Podest auf etwa halber Höhe konnten die Schwingungen deutlich reduziert werden. Damit ist jetzt ein gefahrloses Begehen der Treppe möglich.



Bild 10: Treppe mit eingebautem Schwingungsdämpfer

Schwingungsdämpfer für die erste Turmfrequenz (ca. 0,4 Hz) einer Windkraftanlage



Bild 11: Montage Gondel mit Prototyp-Schwingungsdämpfer in Windkraftanlage



Bild 12: Hydraulischer Dämpfer (Prototyp) für Schwingungsdämpfer erste Turmfrequenz

Tilger zur Reduzierung von Rotorblattschwingungen



Bild 13: Tilger zur Reduzierung von Rotorblattschwingungen - Prüfaufbau

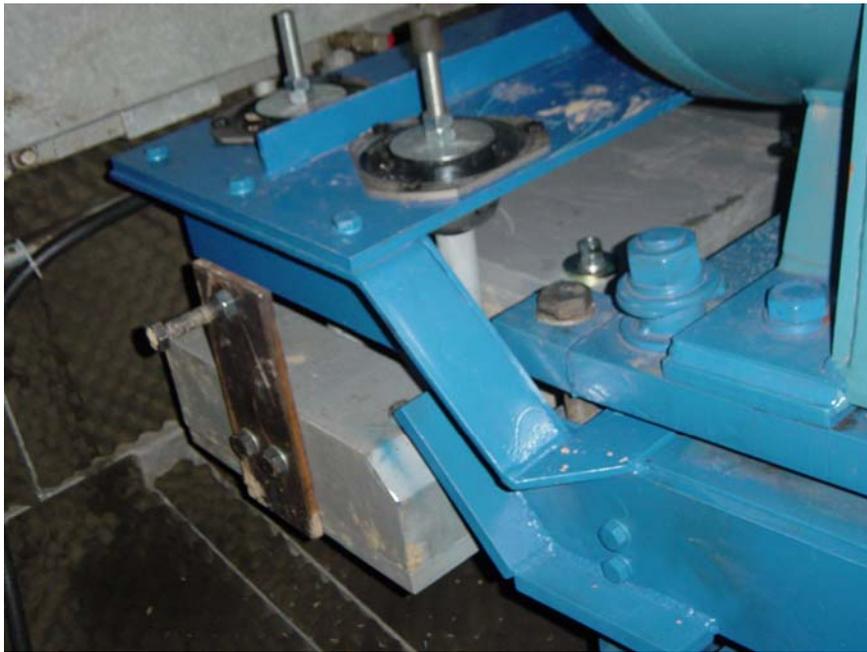


Bild 14: Tilger zur Reduzierung von Rotorblattschwingungen - Betrieb in Windkraftanlage

## 6.2. Tilger zur Reduzierung von Körperschall

In dem hier vorgestellten Beispiel ist es mit Hilfe von zwei Tilgern von je ca. 150 kg Gesamtgewicht – montiert auf dem Maschinenträger einer Windkraftanlage - gelungen, die Vibrationen bei 160 Hz an allen Einzelkomponenten bis hin zu Turm und Rotor um bis zu einem Faktor 10 abzusenken. Als Beispiel ist in Bild 15 die Wirkung der Tilger auf den Generatorträger dargestellt. Die Reduzierung des Körperschallpegels in der gesamten Anlage hat zu einer hörbaren Verbesserung des abgestrahlten Geräusches geführt. Der im Spektrum auftretende Ton von 160 Hz konnte damit auf ein akzeptables Niveau gesenkt werden, so dass die Geräuschemessung ohne Strafzuschlag bestanden wurde.

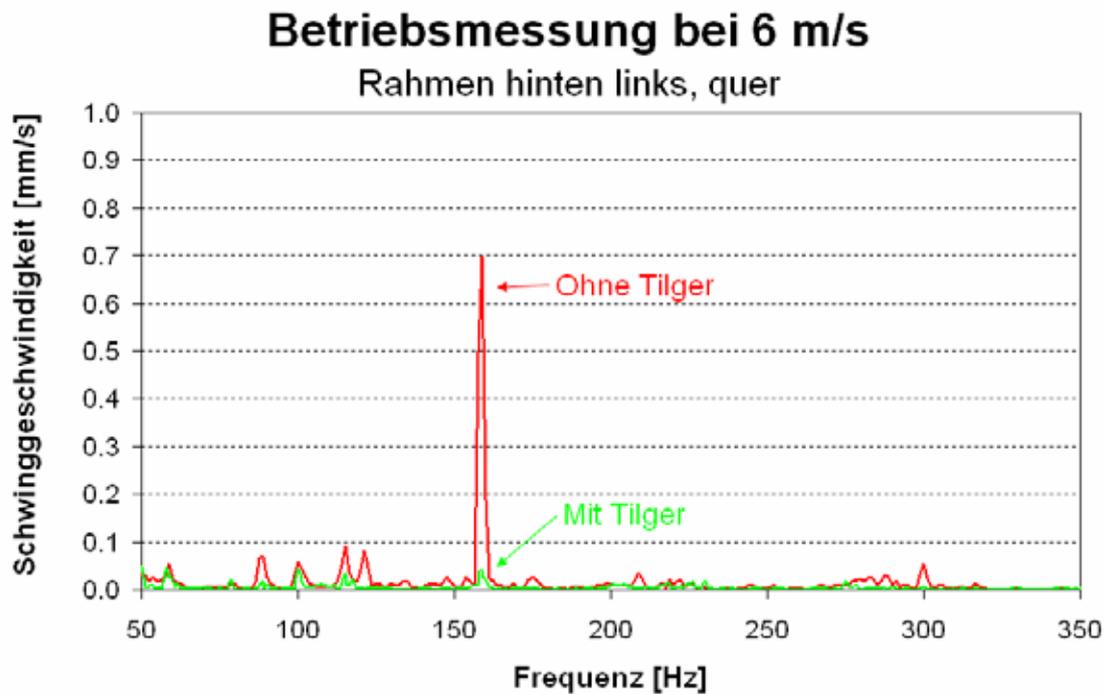


Bild 15: Körperschall am Generatorrahmen ohne und mit Tilger

Schwingungsmessungen in einer anderen Windkraftanlage ergaben, dass ein Teil des Getriebegehäuses im Bereich der beanstandeten Frequenz von ca. 440 Hz eine Resonanz aufweist. Mit Hilfe eines Tilgers konnte die verantwortliche Platte des Gehäuses soweit beruhigt werden, dass die Tonhaltigkeit bei 440 Hz komplett eliminiert wurde.



Bild 16: Tilger zur Körperschalloptimierung an einem Getriebegehäuse

Ein Beispiel für den Einsatz eines Torsionsschwingungstilgers ist in Bild 17 dargestellt. Bei einem akustischen Rollenprüfstand für die Automobilindustrie wurde ein Störgeräusch bei 300 Hz abgestrahlt. Dieser Ton wird durch eine Torsionsresonanz des Prüfstandes verursacht. Der eingesetzte Torsionstilger konnte diesen Ton deutlich reduzieren (Bild 17).

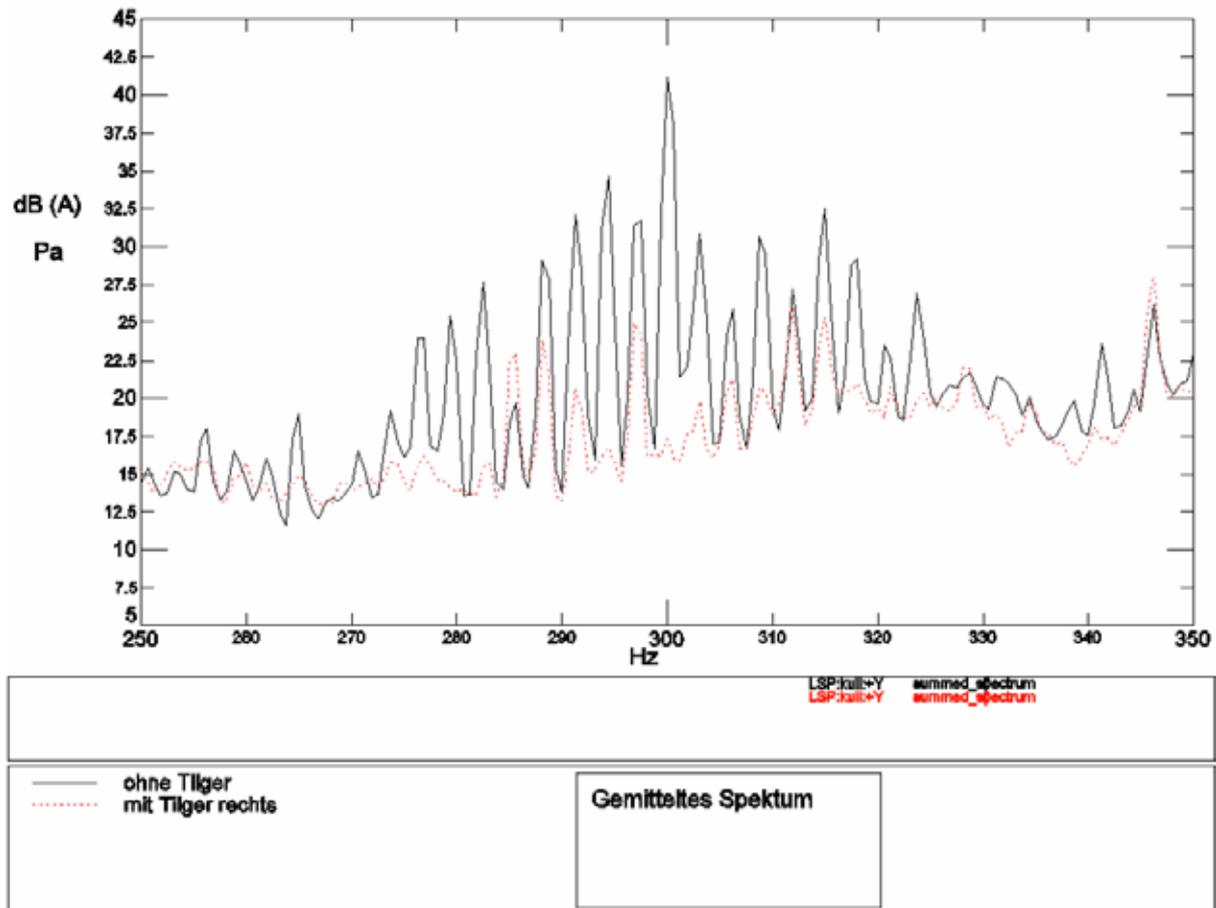


Bild 17: Geräuschreduzierung mit Hilfe eines Torsionsschwingungstilgers.