

21. Workshop Kolbenverdichter 2017

18. / 19. Oktober

Vortrag 12

„Magic-Tube“ – ein neues variables Tilgerkonzept

Patrick Tetenborg, M.Sc.

KÖTTER Consulting Engineers GmbH & Co. KG

Milena Bavaresco, B.Sc.

Federal University of Paraná (Brazil) / TH Ingolstadt (Germany)

1. Einleitung

Der Einsatz von Kolbenverdichtern hat sich bei unterschiedlichsten industriellen Anlagen und Prozessen bewährt. Durch den gekapselten Arbeitsraum sind diese insbesondere für variable Einsatzbedingungen mit variierenden Anlagendrücken und Fördermassenströmen gut geeignet. Ein zuverlässiger Betrieb von Kolbenverdichtern ist jedoch keine Selbstverständlichkeit. Die durch den Verdichtungsprozess induzierten Fluidkräfte sowie die aus den rotierenden und oszillierenden Massen resultierenden Trägheitskräfte besitzen ein großes Anregungspotential für Maschinen- und Rohrleitungsschwingungen. Dementsprechend aufwendig ist die Konzeption und Realisierung einer gesamten Verdichteranlage.

Die angeschlossenen Rohrleitungssysteme sind dabei besonders schwingungsanfällig. Die unterschiedlichen Nennweiten, Verläufe und Stützabstände einzelner Rohrleitungsabschnitte besitzen häufig eine Vielzahl unterschiedlicher, meist schwach gedämpfte, mechanische Eigenfrequenzen. Diese werden durch Verdichterschwingungen oder Druckpulsationen innerhalb der Rohrleitung angeregt. Um ein erhöhtes Schwingungsniveau an den Rohrleitungssystemen zu unterbinden, werden meist bereits in der Planungsphase von Verdichteranlagen Pulsationsstudien und Struktursimulationen durchgeführt. Treten beim Betrieb der Anlage dennoch erhöhte Rohrleitungsschwingungen auf, sind weitere Maßnahmen zu ergreifen. Dabei wird häufig auf versteifende Elemente zurückgegriffen, welche eine gezielte Verschiebung von Eigenfrequenzen bewirken. Bei veränderlichen Betriebsparametern führt eine Versteifung von Rohrleitungsabschnitten jedoch nur zu einer Verschiebung und keiner Behebung des Schwingungsproblems.

Schwingungstilger bieten hingegen die Möglichkeit, das strukturdynamische Übertragungsverhalten breitbandig über den gesamten Betriebsbereich zu optimieren. Diesen Vorteil hat auch KCE erkannt und eigenständig ein eigenes Tilgersystem (siehe Abbildung 1), entwickelt. Der Schwingungstilger wirkt dreidimensional und hat sich bereits mehrfach im Einsatz bewährt [1].

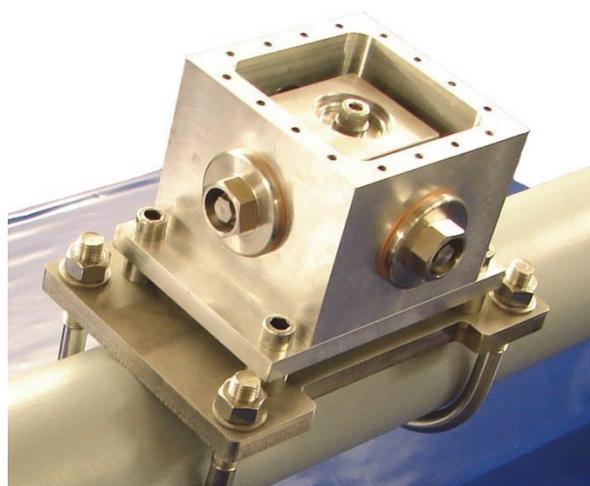


Abbildung 1: KCE-Tilger

Neben dem vorteilhaften Betriebsverhalten besitzt der bisherige Tilger jedoch eine konzeptbedingt begrenzte Flexibilität. Der Tilger muss für die jeweilige Anwendung stets individuell ausgelegt werden und bietet vor Ort nur einen begrenzten Modifikationsspielraum. Daher hat KCE weitere Entwicklungsarbeit geleistet und ein neues 2D-Tilgersystem, das *Magic Tube*, entwickelt und bereits patentieren lassen [2]. Dessen Design zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der schwingungsrelevanten Tilgerparameter – Steifigkeit, Masse und Dämpfung – aus. Die durchgeführten Messreihen im Labor und in der Anwendung an einer Teststruktur haben einen großen Anwendungsbereich und den zuverlässigen Betrieb mit hervorragenden Tilgungseigenschaften bestätigt.

2. Einsatz von Schwingungstilgern

Grundsätzlich bieten sich unterschiedliche Maßnahmen zur Schwingungsverminderung an. Der am besten geeignete Ansatz zur Schwingungsreduktion hängt von der Aufgabenstellung bzw. der konkreten Schwingungsursache ab. Der Einsatz von Schwingungstilgern bietet sich insbesondere bei schwach gedämpften Resonanzproblemen, bspw. an Rohrleitungssystemen, an.

Um den Einfluss eines Schwingungstilgers auf das Schwingungsverhalten einer bestehenden Struktur zu verdeutlichen, sind in Abbildung 2 Übertragungsfunktionen für eine Struktur mit und ohne Schwingungstilger dargestellt. Die dargestellten Übertragungsfunktionen basieren auf analytischen Lösungen für das mit dargestellte Ersatzmodell eines Zwei-Massen-Schwingers.

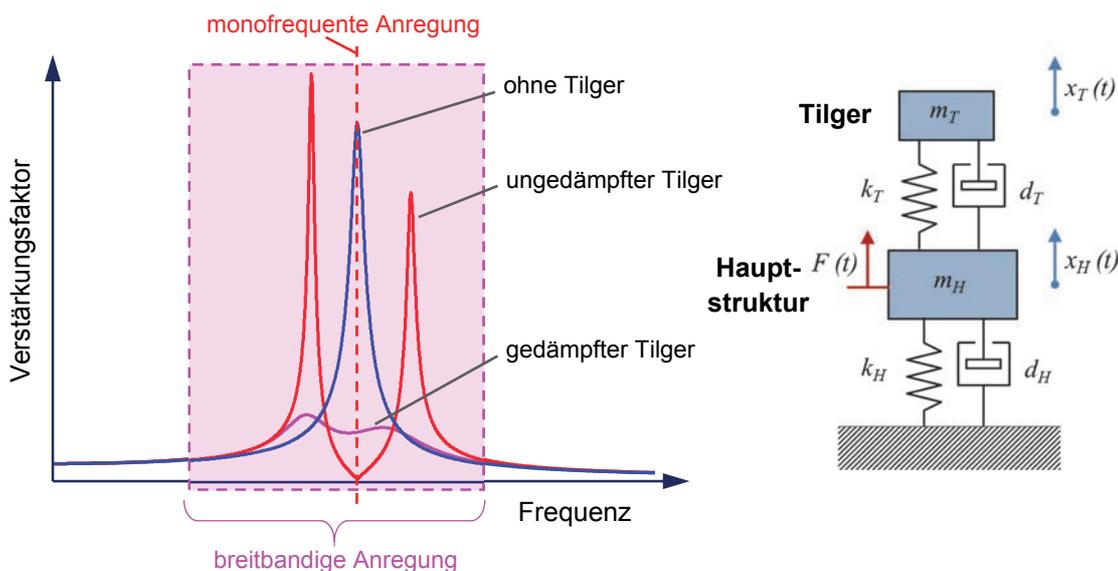


Abbildung 2: Exemplarisches Übertragungsverhalten für eine einfache Hauptstruktur und das verbesserte Übertragungsverhalten mit gedämpftem und ungedämpftem Schwingungstilger

Die Übertragungsfunktionen verdeutlichen, wie ein schwingungsfähiges System auf eine dynamische Anregung reagiert. Die dunkle Kurve stellt das Übertragungsverhalten für eine schwach gedämpfte Hauptstruktur dar. Das markante Maximum der Übertragungsfunktion stellt den Resonanzfall dar, welcher dann eintritt, wenn die Anregungsfrequenz mit der Eigenfrequenz der Struktur übereinstimmt. Für eine monofrequente Anregung bei der Resonanzfrequenz ermöglicht bereits ein ungedämpfter Tilger, welcher ein Feder-Masse-System darstellt, eine sehr gute Schwingungsreduktion.

Für den Fall, dass variierende Betriebsbedingungen jedoch zu unterschiedlichen Anregungsfrequenzen führen, werden zwei neue Resonanzfrequenzen angeregt, welche ebenfalls zu überhöhten Schwingungen führen können. Daher wird für eine breitbandige Anregung idealerweise ein gedämpfter Schwingungstilger eingesetzt. Dieser ermöglicht eine deutliche Verbesserung des Übertragungsverhaltens der Hauptstruktur über einen breiten Frequenzbereich.

3. Design Schwingungstilger

Das Konzept des neuen 2D-Schwingungstilgers wurde so gewählt, dass dieses vor Ort individuell auf die vorzufindende Schwingungssituation angepasst werden kann. Daher werden sämtliche funktionsrelevanten Komponenten in einem gekapselten Gehäuse untergebracht, Abbildung 3.

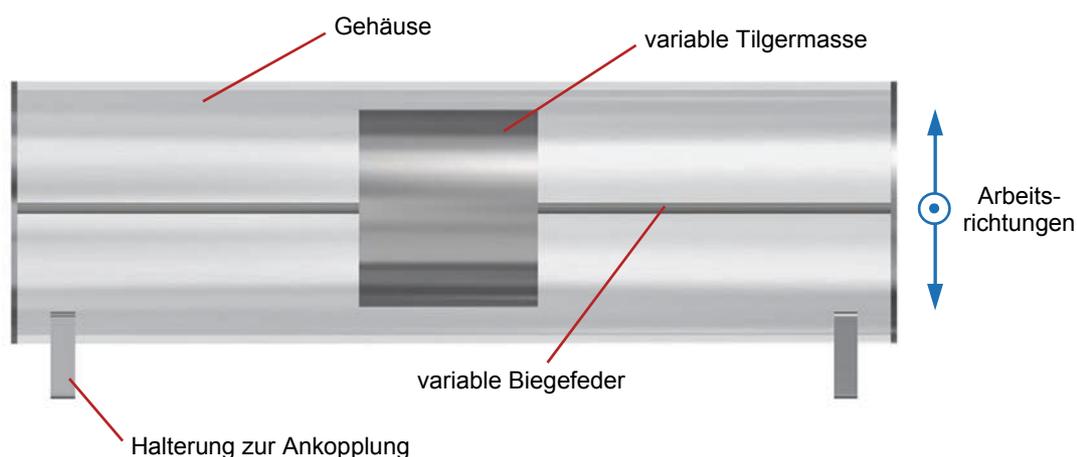


Abbildung 3: Prinzipielle Darstellung des 2D-Schwingungstilgers

Die gewünschte Tilgermasse kann beliebig erweitert werden und wird auf einen für die wesentliche Tilgersteifigkeit verantwortlichen Biegestab geklemmt. Dieser wird wiederum über abgestimmte Befestigungspunkte in dem Gehäuse gelagert. Deren Position innerhalb des Gehäuses kann frei variiert werden, wodurch die Federsteifigkeit angepasst wird. Die Dämpfung wird über ein abgestimmtes Dämpfungöl realisiert. Um die geschwindigkeitsproportionalen und somit dämpfend wirkenden Scherkräfte durch das Dämpfungöl zu erhöhen, werden zusätzliche Lamellenkonturen in das Gehäuse integriert (in Abbildung 3 nicht mit dargestellt).

Die maßgebliche Steifigkeit des Tilgers wird so ausgeführt, dass der Tilger zweidimensional arbeiten kann. Diese Ausführung ist insbesondere für Rohrleitungen vorteilhaft, da diese aufgrund ihrer Symmetrie häufig zwei benachbarte orthogonal zueinander liegende Eigenfrequenzen besitzt. Zudem werden durch die 2D-Ausführung die Anforderungen an die Einbaulage reduziert.

Die Konfiguration des Tilgers wird für den jeweiligen Einsatzfall vor Ort vorgenommen. Zunächst wird eine für die zu tilgende Struktur adäquate Tilgermasse gewählt. Anschließend wird die Steifigkeit des Tilgers gemäß der gewünschten Tilgereigenfrequenz eingestellt. Daraufhin wird abschließend die benötigte Ölmenge eingefüllt und der Tilger ist einsatzfertig montiert. Die Anbindung des Tilgers an eine bestehende Struktur – bspw. eine Rohrleitung – kann abschließend über eine beliebige Halterungskonstruktion erfolgen.

4. Einsatzbereich

Zur Untersuchung der Tilgereigenschaften wurde der in Abbildung 4 dargestellte, freischwingende Versuchsaufbau verwendet. Die Anregung des Tilgers wird über einen elektrodynamischen Schwingerreger realisiert. Dessen harmonische Anregung wird über einen Vierkant symmetrisch auf den Tilger übertragen. Die Ankopplung des Vierkantrohrs an den Tilger entspricht einer auch für den Einsatz an Rohrleitungen geeigneten Halterungsausführung. Es wurden zahlreiche Messpunkte gewählt, um das Schwingungsverhalten an der gesamten Tilgerstruktur detailliert zu untersuchen. Exemplarisch sind hier nur die Messpunkte unmittelbar an der Ankopplung des Tilgers an dem Vierkantrohr und an der Tilgermasse gekennzeichnet, welche später zur Bestimmung des Übertragungsverhaltens verwendet werden.

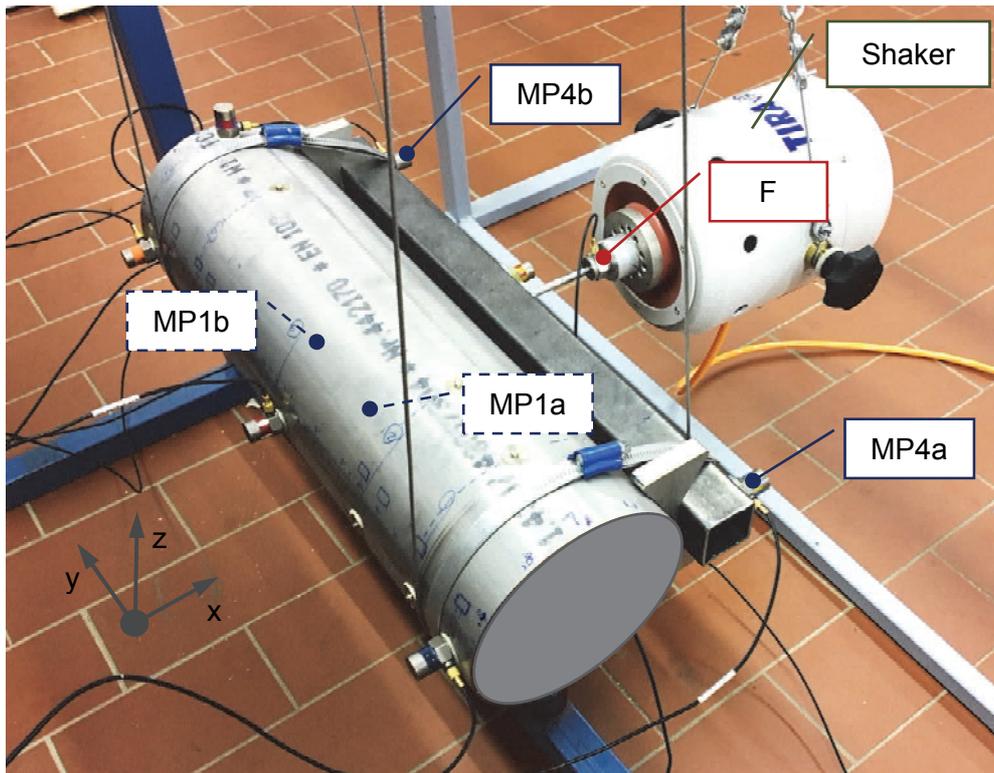


Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Tilgereigenschaften

Im Rahmen der Laboruntersuchungen im Hause KCE wurden diverse Einflussparameter am Tilger untersucht. Für die Bestimmung des strukturdynamischen Übertragungsverhaltens des Tilgers werden Frequenzrampen von 5 bis 250 Hz mit einer Steigung von 0,5 Hz/s genutzt und die Erregeramplitude variiert. In Abbildung 5 ist der zeitliche Verlauf der Erregerkraft und Erregerfrequenz sowie die resultierenden Schwinggeschwindigkeiten an den Messpunkten MP1a und MP4a dargestellt.

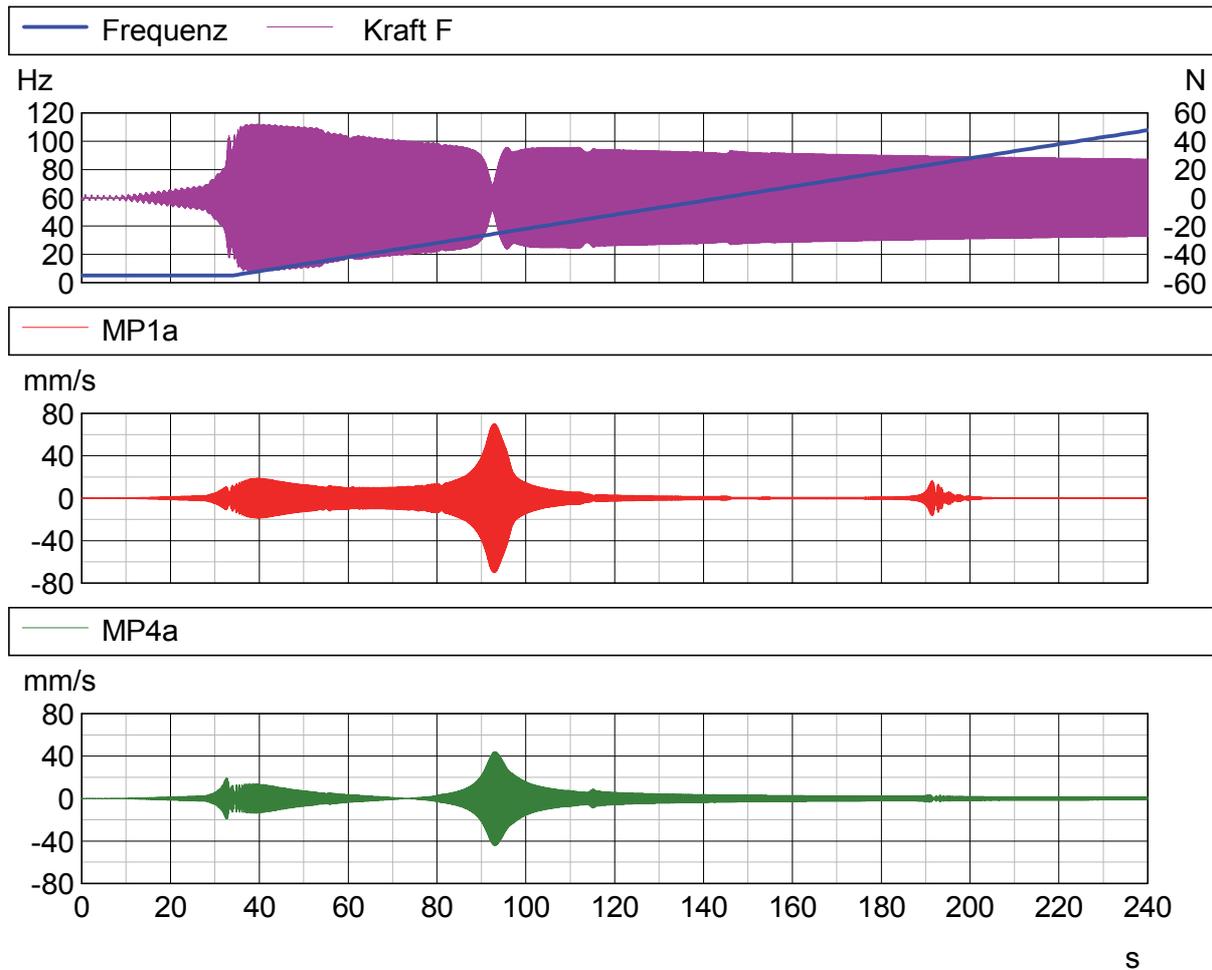


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Erregerfrequenz und der Erregerkraft sowie der Schwinggeschwindigkeiten an den Messpunkten MP1a und MP4a

Die Erregerfrequenz wird zunächst bei 5 Hz konstant gehalten und steigt dann kontinuierlich mit einer Steigung von 0,5 Hz/s an. Die Erregerkraft nimmt zunächst zu und fällt anschließend kontinuierlich ab. Der Einbruch in der Kraft ist auf die Eigenfrequenz des Versuchsaufbaus zurückzuführen. Bei den Schwinggeschwindigkeitsverläufen können zwei Resonanzfrequenzen für das Gesamtsystem bei ca. 92 s und ca. 192 s identifiziert werden. Zudem befindet sich das Vierkantrohr bei ca. 75 s nahezu vollständig in Ruhe, während die Tilgermasse relativ stark schwingt. Dieses Verhalten ist auf die Eigenfrequenz der Tilgermasse zurückzuführen. Um das Tilgerverhalten eindeutig charakterisieren zu können, wird das Übertragungsverhalten von den lokalen Anbindungspunkten an dem Vierkantrohr auf die Tilgermasse bestimmt:

$$H_a(i\omega) = \frac{v_{MP1a}}{v_{MP4a}} \quad \text{bzw.} \quad H_b(i\omega) = \frac{v_{MP1b}}{v_{MP4b}}$$

Da der Versuch symmetrisch aufgebaut ist, ergeben sich für beide Übertragungsfunktionen nahezu identische Verläufe. Im Folgenden wird daher auf das Übertragungsverhalten $H_a(i\omega)$

zurückgegriffen. Abbildung 6 zeigt exemplarisch das Übertragungsverhalten für ungedämpfte Messreihen mit unterschiedlichen freien Biegestablängen.

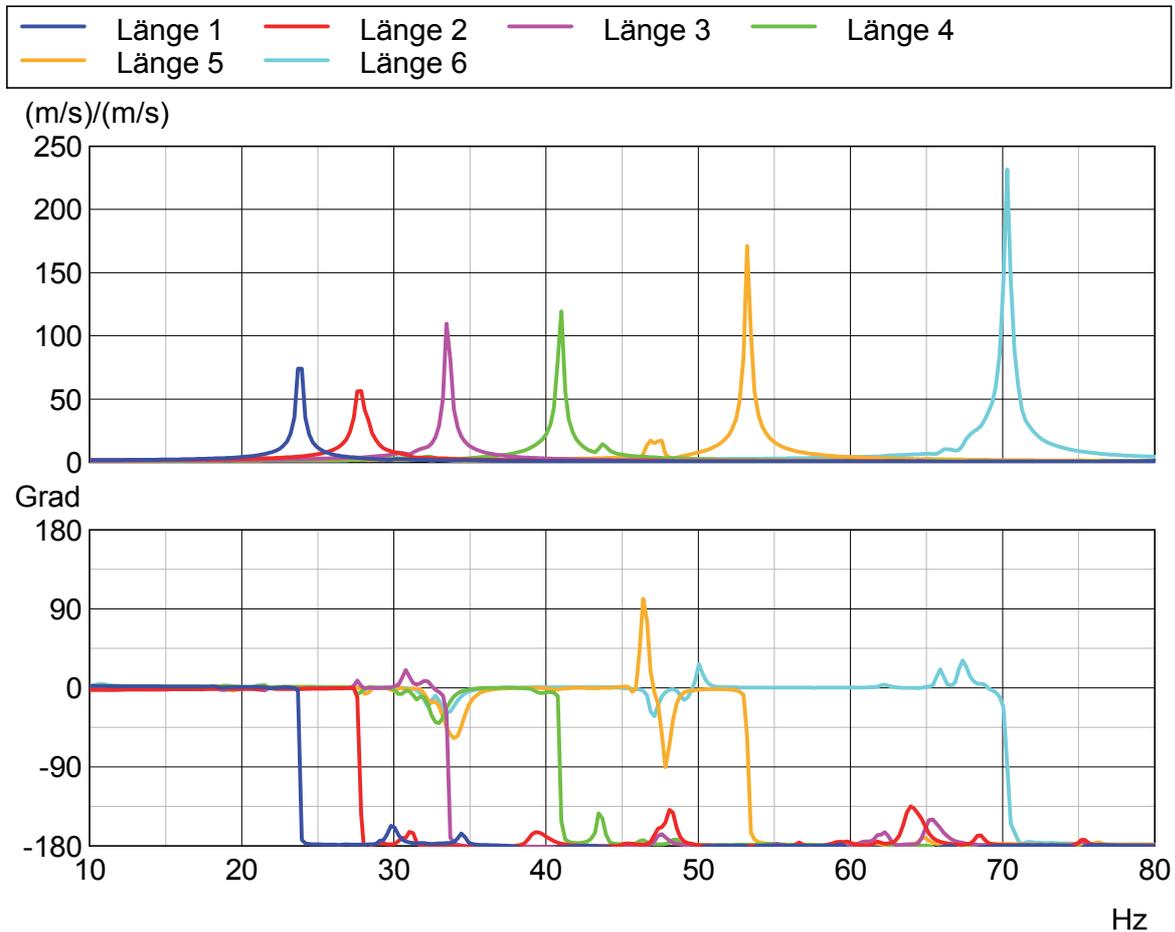


Abbildung 6: Betrags- und phasenmäßige Darstellung der Übertragungsfunktionen $H_a(i\omega)$ für unterschiedliche freie Biegestablängen

Die dargestellten Übertragungsfunktionen entsprechen dem strukturdynamischen Verhalten eines Ein-Massen-Schwingers. Anhand der maximalen Amplituden und den Phasengängen können die jeweiligen Eigenfrequenzen der Tilgerkonfigurationen eindeutig identifiziert werden. Für den untersuchten Biegestab ergibt sich ein nutzbarer Einsatzbereich des Tilgers von 24 bis 71 Hz. Zudem zeigt sich eine sehr geringe Dämpfung mit Dämpfungsgraden unterhalb von 1 % für die ungedämpfte Ausführung der Tilger (ohne Dämpfungsöl).

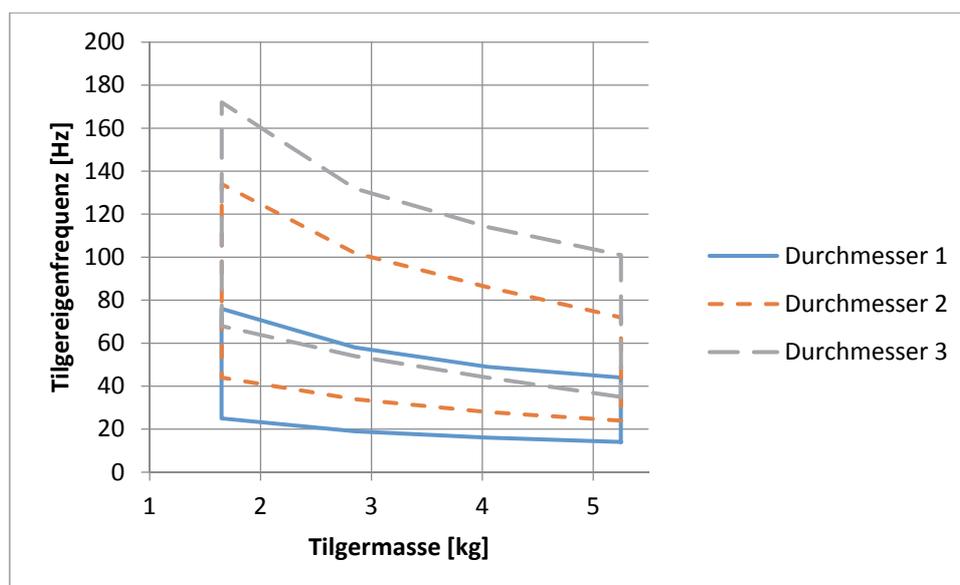


Abbildung 7: Aktuell verfügbarer Einsatzbereich hinsichtlich Tilgermassen und nutzbarer Tilgereigenfrequenzen

Anhand aller durchgeführten Untersuchungsreihen kann abschließend der verfügbare Eigenfrequenzbereich der untersuchten Tilgerbauform ermittelt werden. Abbildung 7 zeigt die gemessenen Eigenfrequenzen der unterschiedlichen Biegefederstäbe für ausgewählte Massenkonfigurationen. Mit den bisherigen Konfigurationen wird ein Frequenzbereich von 15 bis 170 Hz abgedeckt.

Neben den Eigenfrequenzen stellt der einstellbare Dämpfungsgrad einen weiteren wesentlichen Tilgerparameter dar, der das spätere Betriebsverhalten maßgeblich beeinflusst. Hierzu werden die integrierten Lammellenkonturen benötigt. Durch den Einsatz unterschiedlicher Dämpfungöle und die Variation des Dämpfungöl-Füllstands kann eine gezielte Einstellung des Dämpfungsgrades erfolgen. Für die gewählte Ausführung konnte der Dämpfungsgrad problemlos auf bis zu $D = 25\%$ eingestellt werden. Dadurch wird auch für den breitbandigen Einsatz eines Schwingungstilgers eine ausreichende Bandbreite an Dämpfungsgraden abgedeckt.

5. Anwendung

Nachdem die Eigenschaften für die untersuchte Baugröße mit den verfügbaren Tilgerkonfigurationen erfolgreich bestimmt wurden, soll nun der schwingungsdämpfende Einfluss anhand einer Referenz-Teststruktur untersucht werden. Als Teststruktur wird eine vertikal fest eingespannte Rohrleitung mit oben liegender Zusatzmasse betrachtet, Abbildung 8. Um das Schwingungsniveau zu visualisieren, ist zusätzlich ein Wasserglas auf der Masse

platziert worden. Das Übertragungsverhalten der Struktur wird erneut über einen Frequenzsweep mit Hilfe des Schwingerregers bestimmt.

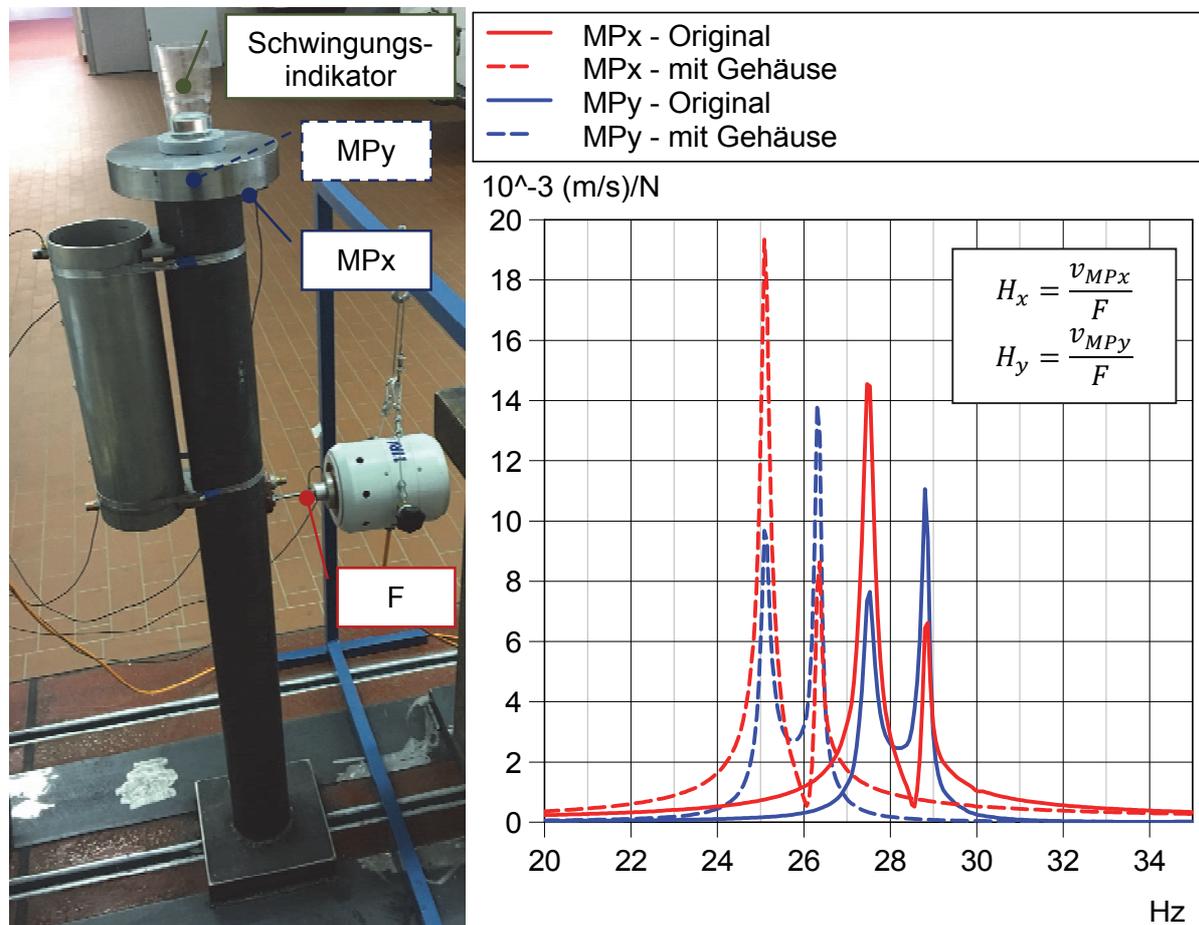


Abbildung 8: Teststruktur mit installiertem Tilgergehäuse und dazugehöriger Versuchsaufbau sowie die gemessenen Übertragungsfunktionen H_x und H_y

Anhand der in Abbildung 8 mit dargestellten Übertragungsfunktionen für die beiden orthogonalen Messpunkte MPx und MPy können zwei dicht benachbarte Eigenfrequenzen der Teststruktur (Original) bei 27,5 Hz und 29 Hz identifiziert werden. Dabei handelt es sich um die beiden ersten orthogonal zueinander befindlichen Biegeeigenformen der Rohrleitung. Die Eigenfrequenzen sind schwach gedämpft und besitzen Dämpfungsgrade von $D < 1 \%$. Das hohe Schwingungsniveau quer zur Schwingungsrichtung ist auf ein bekanntes Phänomen von schwach gekoppelten schwingungsfähigen Systemen zurückzuführen, vgl. [3].

Bevor der Schwingungstilger für die Struktur konfiguriert wird, muss neben der Eigenfrequenz noch die zu tilgende Masse des Hauptsystems ermittelt werden. Dazu wird zunächst das mit der Rohrleitung starr mitschwingende Tilgergehäuse an die Struktur gekoppelt und erneut das Übertragungsverhalten (mit Gehäuse) bestimmt, vgl. Abbildung 8. Anhand der Frequenzverschiebung und der bekannten Zusatzmasse durch das Gehäuse

kann daraufhin die äquivalente, auf die Einbauposition des Tilgers bezogene, schwingende Masse m_H des Hauptsystems bestimmt werden:

$$f_{0,orig.} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m_{Orig.}}} \quad \text{bzw.} \quad f_{0,mG} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m_{Orig.} + m_{Gehäuse}}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m_H}}$$

Die Umformung der beiden Gleichungen liefert einen Ausdruck für die äquivalente Masse des Originalsystems bzw. der zu tilgenden Gesamtmasse:

$$m_{Orig.} = \frac{m_{Gehäuse}}{\left(\frac{f_{0,orig.}}{f_{0,mG}}\right)^2 - 1} = 27,6 \text{ kg} \quad \text{bzw.} \quad m_H = 32,6 \text{ kg}$$

Auf Basis von KCE-Erfahrungswerten und Literaturempfehlungen [4], sollte das Verhältnis der Tilgermasse zur schwingenden Masse des Hauptsystems zwischen 5 und 15 % liegen. Um eine maximale Schwingungsreduktion zu erzielen, wird die aktuell größtmögliche Tilgermasse von 5,25 kg zur Tilgung gewählt. Diese wird in Anlehnung an [5] auf eine Eigenfrequenz leicht unterhalb der bereits massenkorrigierten Resonanzfrequenz bei 25 Hz auf ca. 24 Hz ausgelegt und installiert. In Abbildung 9 ist das resultierende Übertragungsverhalten mit zwei neuen, schwach gedämpften Resonanzfrequenzen in x- und y-Richtung dargestellt. Die weiterhin ebenfalls starke Ausprägung der Schwingungen quer zur Anregungsrichtung resultiert erneut aus der schwachen Kopplung der Eigenformen dicht benachbarter Eigenfrequenzen. Für eine monofrequente Systemanregung kann diese Tilgerkonfiguration bereits schwingungsdämpfend eingesetzt werden. In einem Frequenzbereich von ca. 22 bis 28 Hz bewirkt der Tilger bereits eine deutliche Verbesserung des Schwingungsverhaltens.

Für einen breitbandigen Einsatz bei bspw. drehzahlvariablen Maschinen stellen die neuen Eigenfrequenzen kritische Betriebsbereiche dar. Damit es hier zu keiner resonanzförmigen Anregung kommt, wird der Tilger zusätzlich gedämpft. Über den Füllstand des Dämpfungsoils wird ein Dämpfungsgrad des Tilgers von ca. $D = 18 \%$ eingestellt. Das resultierende Übertragungsverhalten ist ebenfalls in Abbildung 9 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Reduktion der Schwingungen um den Faktor 20 (!) von fast 20 (mm/s)/N auf unter 1 (mm/s)/N erzielt wurde. Orthogonal zur Anregungsrichtung liegen zudem nahezu gar keine Schwingungen mehr vor. Aufgrund der erhöhten Dämpfung kann keine Übertragung der Schwingungsenergie mehr für dicht benachbarte Eigenfrequenzen erfolgen und die orthogonale Schwingungsrichtung wird nicht mehr angeregt. Der Einsatz des gedämpften Tilgers hat somit zu einer signifikanten Verbesserung des Übertragungsverhaltens geführt. Der dauerhafte breitbandige Anlagenbetrieb einer entsprechend getilgten Rohrleitungsstruktur kann als unkritisch eingestuft werden.

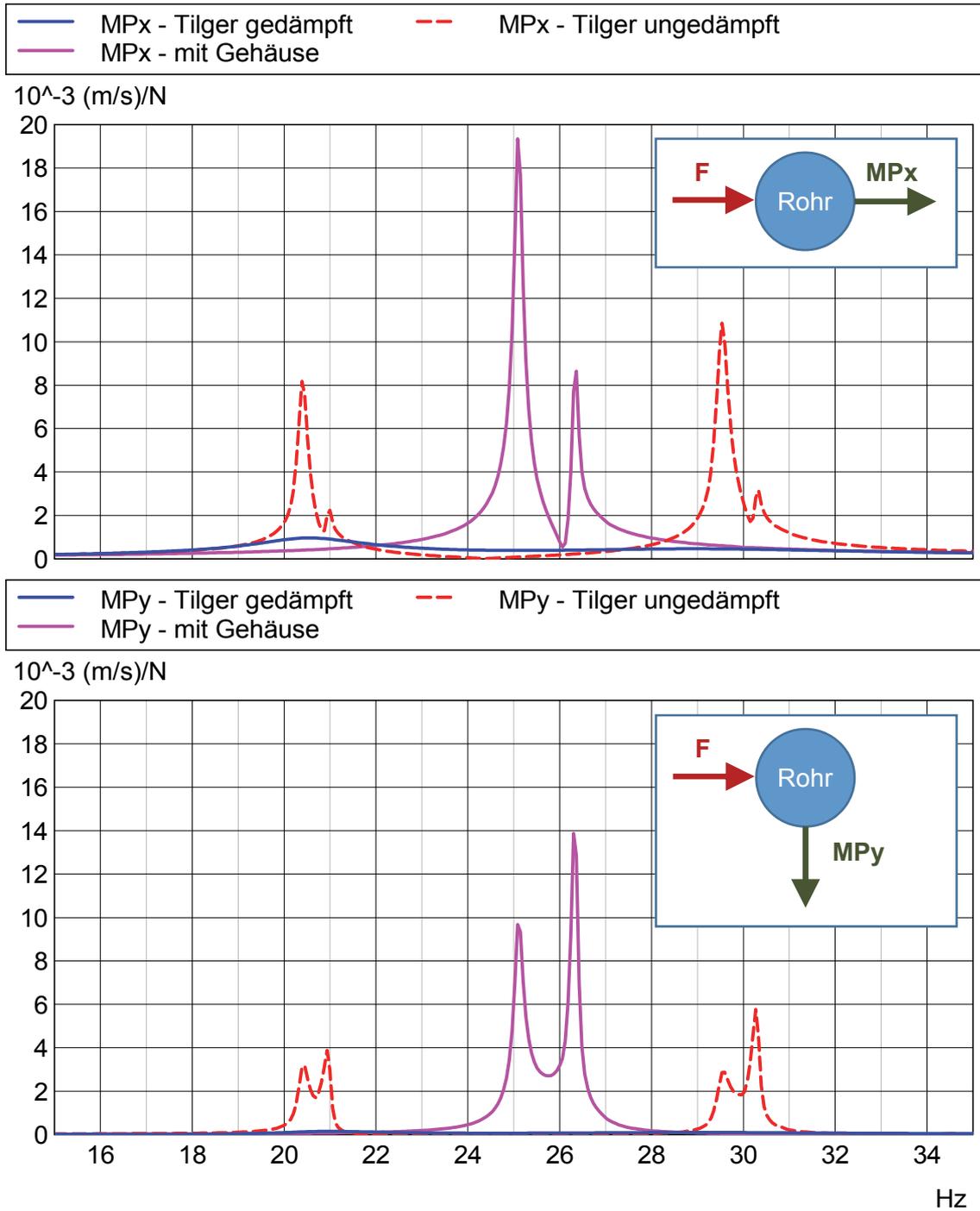


Abbildung 9: Vergleich der Rohrleitungsschwingungen ohne Tilger (mit installiertem Gehäuse), mit ungedämpftem Tilger und mit gedämpftem Tilger in x- und y-Richtung

6. Zusammenfassung

Im Hause KCE wurde ein neuer, einstellbarer, zweidimensionaler Schwingungstilger, das *Magic Tube*, entwickelt. Dieser basiert auf einer zentralen Tilgermasse, die über Biegefedern an das Gehäuse des Tilgers gekoppelt wird. Der zusätzliche Einsatz eines abgestimmten Dämpfungsoils ermöglicht eine Dämpfung mit Dämpfungsgraden von bis zu $D = 25\%$.

Das vorgestellte Design ermöglicht einen sehr großen Betriebs- und Einsatzbereich des Schwingungstilgers. Anhand von messtechnischen Untersuchungen konnten die betriebsrelevanten Tilgerparameter bestimmt werden. Die gewählte Bauform kann für Eigenfrequenzen von 15 bis 170 Hz ausgelegt werden. Anhand von Untersuchungen an einer Teststruktur konnte durch den Einsatz des Schwingungstilgers eine Schwingungsreduktion um den Faktor 20 realisiert werden. Die Erstinstallation in einer industriellen Anlage ist für Ende 2017 geplant.

Von der hohen Flexibilität des *Magic Tube* werden insbesondere unsere Kunden bei zukünftigen Messeinsätzen profitieren. Der *Magic Tube* kann während einer messtechnischen Untersuchung vor Ort für die vorgefundene Schwingungssituation konfiguriert und direkt eingesetzt werden. Schwingungsprobleme können somit ohne die sonst üblichen Verzögerungen für die detaillierte Erarbeitung von Minderungsmaßnahmen quasi in Echtzeit gelöst werden.

Literatur

- [1] Lenz, J.: The Magic Cube: A New Three Dimensional Vibration Absorber. In: Vibrations. Vol. 27, No 4, Dec. 2010.
- [2] KÖTTER Consulting Engineers GmbH & Co. KG, 2014. Schwingungstilger oder Schwingungsdämpfer. Erfinder: Patrick Tetenborg und Johann Lenz. DE, Patentschrift: DE102014006193B4.
- [3] Dresig, H.: Schwingungen und mechanische Antriebssysteme. Modelbildung, Berechnung, Analyse, Synthese. Springer Verlag. Berlin Heidelberg. 2006.
- [4] Petersen, C.: Dynamik der Baukonstruktionen. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft. Braunschweig / Wiesbaden. 1996.
- [5] Den Hartog, J. P.: Mechanische Schwingungen. 2. Auflage. Springer Verlag. Berlin. 1952.