

Dynamische Wirkung externer viskoser Schwingungsdämpfer in ebenen Rahmenstrukturen unter harmonischer und stochastischer Anregung

Arno Seltenhammer & Rudolf Heuer

Zentrum für Allgemeine Mechanik und Baudynamik, TU Wien

Michael Leitner

ISP Ziviltechniker GmbH, Wien

ZUSAMMENFASSUNG: In der vorliegenden Arbeit wird die Wirkungsweise von in Rahmenkonstruktionen eingebauten externen viskosen Dämpfern untersucht. Diese können eine wartungsgeringe und kostengünstige Alternative zu anderen Schwingungsreduktionsmaßnahmen darstellen. Besonders gilt dies für Strukturen in erdbebengefährdeten Gebieten, welche starken Anregungen ausgesetzt sind.

In einer Versuchsanordnung wird ein Dämpfungselement mit Hilfe verschiedener Übersetzungsstrukturen in einen einstöckigen Modellrahmen eingebaut, welche eine Vergrößerung des relativen Dämpferweges bewirken. Diese Rahmenkonstruktion wird einer zeitlich harmonischen Fußpunktanregung unterzogen. Eine weitere Versuchsanordnung ist ein zweistöckiger Rahmen bei dem der Dämpfer mit Übersetzungsstruktur einerseits in der ersten und andererseits in der zweiten Rahmenebene eingebaut wird. Diese Konstruktion wird stochastisch angeregt. Zur Verifizierung der Versuchsergebnisse werden die Versuchsrahmen durch äquivalente Ein- bzw. Mehrmassenschwinger mechanisch modelliert und einer numerischen Simulation unterzogen.

1. EINLEITUNG

Der viskose Schwingungsdämpfer (VDD für Viscous Damping Device) stellt eine von vielen möglichen Maßnahmen dar, mit denen man versucht die negativen Auswirkungen von Bauwerksschwingungen zu vermeiden beziehungsweise zu minimieren. Der VDD ist nahezu wartungsfrei und eignet sich besonders für Strukturen in erdbebengefährdeten Gebieten, die starken Anregungen ausgesetzt sind. Mit der Methode der Kapazitätsbemessung legt man die Bereiche, in denen ein Tragwerk plastifizieren darf, genau fest, indem man vorwiegend die Steifigkeits- und Duktilitätsverhältnisse variiert. Für diese Bereiche eignen sich VDDs, da diese in der Lage sind Energie zu dissipieren und nicht nach der Beanspruchung ausgewechselt werden müssen. Das Tragwerk selbst muss somit nicht durch plastische Verformung Energie absorbieren. Ein optimal eingebauter VDD erzeugt eine Kraft zum richtigen Zeitpunkt mit der richtigen Größe, sodass die Spannungen während einer externen Einwirkung nicht, oder nur gering, erhöht werden und die Verformung somit sehr gering bleiben.

Für die vorgestellten Versuche werden aus dem Modellautobau kommende VDDs verwendet, wobei die Dichtungen adaptiert werden um die Reibungsverluste zu minimieren.

2. DER VISKOSE DÄMPFER (VDD)

VDDs sind Elemente welche in Tragwerke eingebaut werden können und der Bewegung entgegenwirkende Rückstellkräfte bewirken, indem sie Energie dissipieren. Die Dämpfung entsteht durch die Strömung eines viskosen Silikonöls durch die Düsenöffnungen des Kolbenkopfes des VDDs und die daraus resultierende Dämpferrückstellkraft unterliegt folgender Gesetzmäßigkeit:

$$F_D = -r|\dot{x}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{x}), \quad (1)$$

mit r als Dämpferkonstante, \dot{x} als relative Geschwindigkeit und α als Dämpfungsexponent, welcher Werte zwischen 0,3 und 2,0 annehmen kann und durch über- oder unterlineares Verhalten charakterisiert wird. Überlineare Dämpfer haben den Vorteil, dass sie schon für geringe Geschwindigkeiten hohe Dämpferkräfte aufweisen, während unterlineare Dämpfer dann eingesetzt werden, wenn die Differenz der Dämpferkraft zwischen hohen und niedrigen Geschwindigkeiten maximiert werden soll. Für den ideal linearen Dämpfer unter zeitlich harmonischer Anregung stellt dessen Arbeitslinie eine Ellipse dar, deren Flächeninhalt gleich der dissipierten Energie je Schwingungsperiode ist.

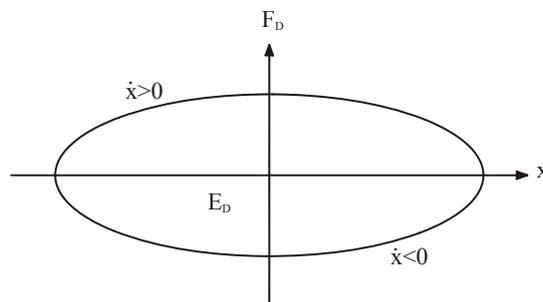


Abbildung 1: Arbeitslinie eines idealen linearen VDDs

Anhand der Ellipse in Abb.1 sieht man, dass ein VDD durch ein phasenverschobenes Antwortverhalten Spannungen und auch Verschiebungen in Konstruktionen reduziert. Die Dämpferkraft ist Null im Moment der größten Verschiebung und sie erreicht ihren Maximalwert zum Zeitpunkt, zu dem die relative Verschiebung des Dämpfers Null ist. Dieses Verhalten lässt sich dadurch begründen, dass die Rückstellkraft des Dämpfers nur von der Geschwindigkeit abhängig ist. Treten elastische Komponenten auf, indem beispielsweise ein Federelement dem VDD parallel dazugeschaltet wird, rotiert die Hysteresekurve ohne dabei die dissipierte Energie zu verändern, da die elastische Komponente keinen Beitrag zur Energiedissipation leistet. Für verschiedene Dämpfungsexponenten α verändert sich die Form der Ellipse. Die mögliche Energieumwandlung nimmt mit kleiner werdendem α zu und somit vergrößert sich der Flächeninhalt der Hysterese.

3. EINSTÖCKIGER RAHMEN UNTER HARMONISCHER ANREGUNG

Die erste Versuchsanordnung untersucht einen einstöckigen Modellrahmen in welchen ein VDD mittels einer Übersetzungsstruktur, welche eine Vergrößerung des relativen Dämpferweges bewirkt, eingebaut wird. Um eine zeitlich harmonische Fußpunktanregung des Modellrahmens im Labor zu simulieren wird ein zweistöckiger Rahmen untersucht, der in Höhe des unteren Riegels mit einer harmonischen Kraft angeregt wird. Beide Riegel sind mit Beschleunigungsaufnehmern ausgestattet, wobei die tatsächliche Beschleunigung des unteren Riegels die Weganregung des äquivalenten einstöckigen Rahmens darstellt (siehe Abb.2).

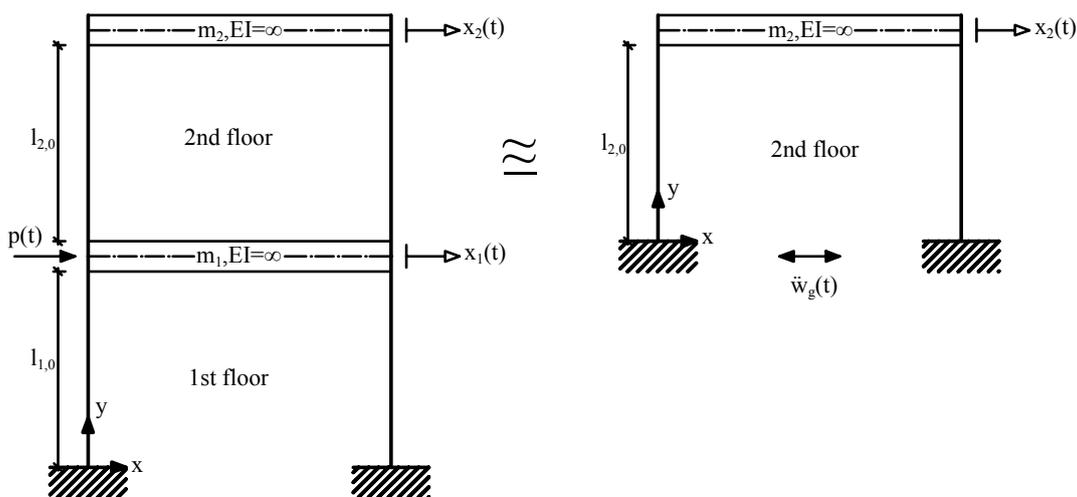


Abbildung 2: Zusammenhang kraftherregter 2-stöckiger und wegerregter 1-stöckiger Rahmen

Die Bewegungsgleichung des Einfreiheitsgrad-Systems lautet:

$$m_2 \ddot{x}(t) + r_s \dot{x}(t) + k_s x = -m_2 \ddot{w}_g(t), \quad (2)$$

mit $x \triangleq x_2$, k_s als Struktursteifigkeit des zweiten Geschosses und r_s als Strukturdämpfungskonstante, ausgedrückt durch das Lehr'sche Dämpfungsmaß ζ .

Zur Ermittlung der Beschleunigungsübertragungsfunktion wird die Amplitude der Beschleunigung des oberen Riegels, bezogen auf jene des unteren, in Abhängigkeit der Erregerfrequenz dargestellt. Die Übersetzungsstruktur besteht aus einem starren Hebel zwischen den beiden Riegeln, dessen mittlerer Rotationspunkt in seiner Höhe variiert werden kann. Der VDD ist am unteren Ende mit dem Riegel verbunden, siehe Abbildung 3.

Mit einem eingliedrigem Ritz'schen Deformationsansatz und dem Vergleich der kinetischen Energie von Original und Ersatzsystem ermittelt sich die äquivalente Masse der beiden Stiele des Rahmens. Unter Berücksichtigung eines starr rotierenden Hebels lässt sich die kinetische Energie und somit die Ersatzmasse desselben ermitteln. Die Ersatzmasse m^* des gesamten einstöckigen Rahmens setzt sich schließlich aus den äquivalenten Massen der Stiele, des Hebelarms and der Riegelmasse zusammen.

Die effektive Steifigkeit k^* des Systems lässt sich mit Hilfe der Verzerrungsenergie der Stiele ableiten. Durch die verhältnismäßig große Gewichtskraft des Riegels sind die Stiele auf Druck vorgespannt; dies bewirkt eine Verringerung der Biegesteifigkeit derselben (P-Delta Effekt). Um dies zu berücksichtigen wird die Verzerrungsenergie unter Berücksichtigung Theorie 2. Ordnung angesetzt.

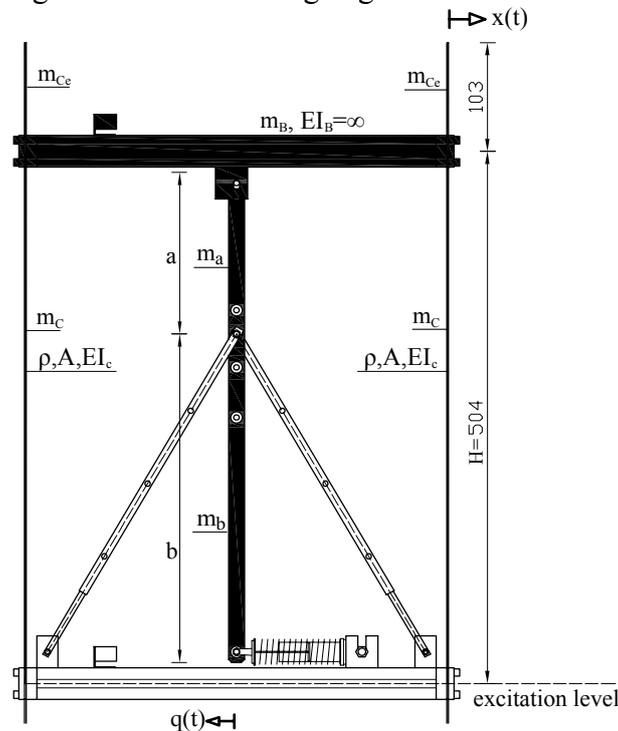


Abbildung 3: Übersetzungsstruktur mit eingebautem Dämpfer und schwingenden Massen

Das Dämpfungsmaß der Gesamtstruktur wird sowohl aus dem Abklingverhalten der freien Schwingung als auch mittels Bandbreitenmethode bestimmt. Die Dämpfungskonstante r des VDDs wird in einer gesonderten Parameterstudie ermittelt. Das Übersetzungsverhältnis der Hebelkonstruktion wird durch die beiden Abmessungen a und b beschrieben über die dann die Dämpferkraft Q_x bestimmt werden kann. Die Bewegungsgleichung des äquivalenten Einmassenschwingers wird damit:

$$m^* \ddot{x} + r(b/a)^2 \dot{x} + k^* x = -m^* \ddot{w}_g . \quad (3)$$

Der Rahmen ohne und der mit VDD werden harmonisch angeregt. Das Amplitudenverhältnis der Beschleunigungen, gemessen mit zwei piezoelektrischen Aufnehmern, stellt die Amplitudenfrequenzgänge dar (Abb. 4). Zu beobachten ist, dass sich mit größer werdendem Übersetzungsverhältnis sowohl der dynamische Vergrößerungsfaktor als auch die Eigenfrequenz verringert. Dies lässt sich mit der Vergrößerung des Trägheitsterms des Übersetzungsstabes erklären. In Abbildung 5 ist für das Übersetzungsverhältnis 1:1 der Amplitudenfrequenzgang des ungedämpften Rahmens, der des Rahmens mit eingebautem VDD, der des Rahmens mit zusätzlich eingebautem Federelement und die numerische Simulation des ungedämpften Rahmens dargestellt.

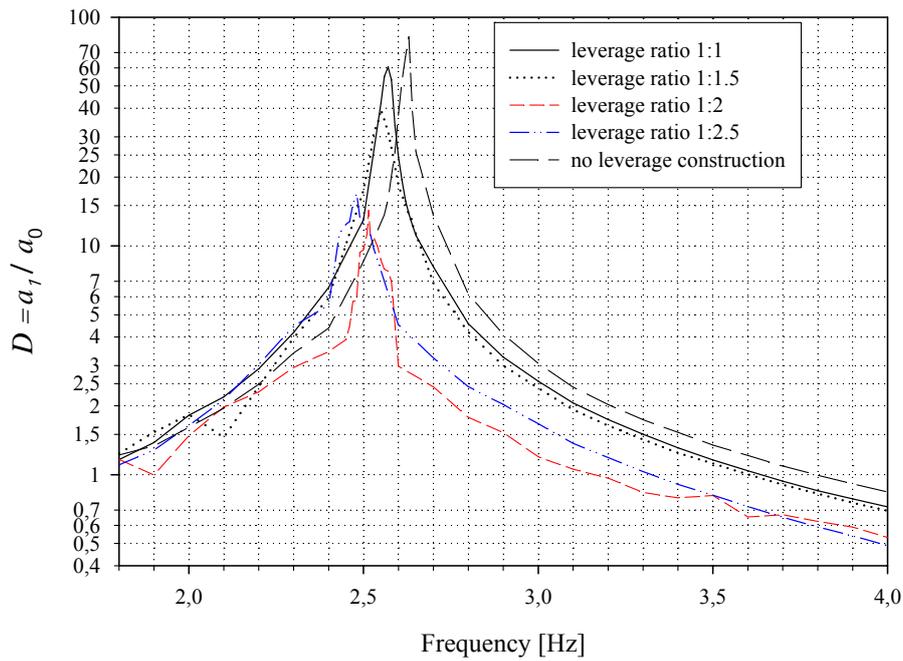


Abbildung 4: Vergleich der Amplitudenfrequenzgänge ohne eingebauten VDD

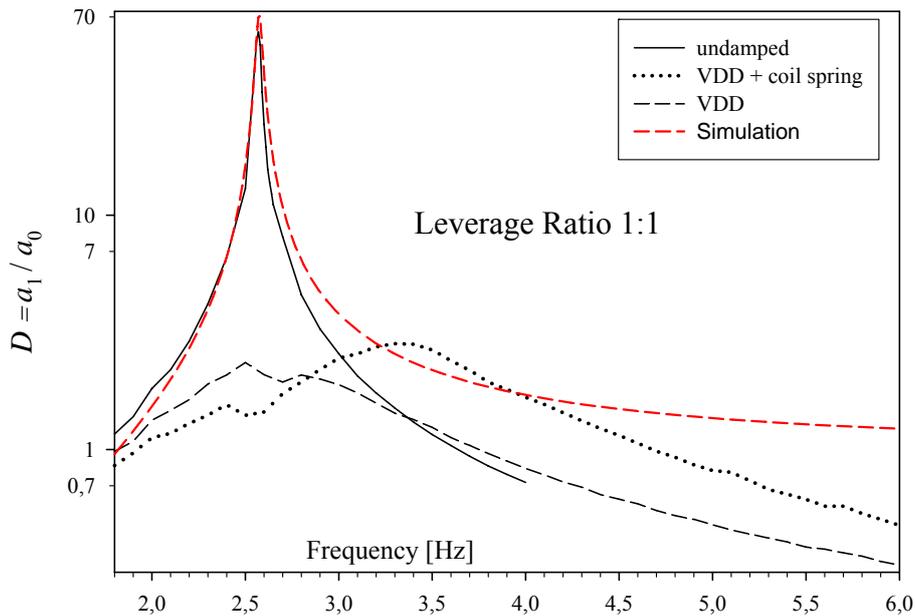


Abbildung 5: Amplitudenfrequenzgang für das Übersetzungsverhältnis 1:1

In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass sich der dynamische Vergrößerungsfaktor bei Einbau des VDDs stark reduziert, dabei aber weder die Steifigkeit noch die Eigenfrequenz des Systems erhöht wird. Es ist auch der Frequenzgang mit zusätzlich parallel geschalteter Feder abgebildet. Bei dieser Konfiguration erhöht sich die Steifigkeit und somit auch die Eigenfrequenz.

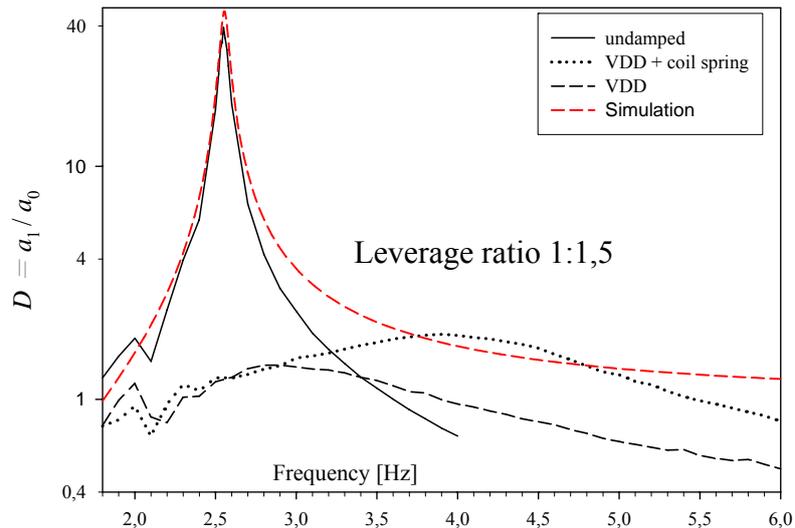


Abbildung 6: Amplitudenfrequenzgang für das Übersetzungsverhältnis 1:1,5

In Abbildung 6 ist zu erkennen, dass sich der Vergrößerungsfaktor mit steigendem Übersetzungsverhältnis weiter verringern lässt. Je nach Konfiguration lässt sich der Vergrößerungsfaktor bis auf 1,4 - 3,4% des Rahmens ohne Dämpfer und Übersetzungsstruktur verringern. Das Dämpfungsmaß des Rahmens ohne VDD beträgt 4‰ und erhöht sich mit eingebautem VDD bei einem Übersetzungsverhältnis von 1:1 auf 19,6‰ und bei einem Übersetzungsverhältnis von 1:1,5 auf 44,1‰.

4. ZWEISTÖCKIGER RAHMEN UNTER STOCHASTISCHER ANREGUNG

Um die Boden-Bauwerksinteraktion eines zweistöckigen Rahmens zu simulieren wird in das zuletzt untersuchte Modell ein zusätzliches Zwischengeschoss eingebaut. Der unterste, auf Anregungsniveau befindliche Riegel stellt wieder die Bezugsebene dar und dessen Beschleunigung ist mit einer Weganregung des äquivalenten zweistöckigen Rahmens gleichzusetzen. Die Analogie aus Abbildung 2 kann somit, um ein Geschöß erweitert, übernommen werden. Es werden zwei Varianten der Dämpferanordnung untersucht, zuerst wird eine Übersetzungsstruktur im unteren, dann im oberen Geschöß eingebaut (Abb. 7).



Abbildung 7: Modellrahmen mit Dämpferanordnung in Ebene 1 bzw. Ebene 2

Beide Einbauvarianten der Übersetzungskonstruktion haben ein Verhältnis von 1:1. Als Variationsparameter werden unterschiedliche Dämpfungöle und Kolbenköpfe untersucht. Das Rahmenmodell ist auf jeder Riegelebene mit einem Beschleunigungsaufnehmer ausgestattet und wird auf Höhe des untersten Riegels mit bandlimitiertem weißen Rauschen angeregt.

Die Auswirkungen der stochastischen Signale auf den gedämpften Versuchsrahmen werden über die Varianzen der Eingangs- und Ausgangssignale beurteilt. Die Varianz des Eingangssignals ist gleich der Varianz der gemessenen Beschleunigungen des untersten Riegels, die der Ausgangssignale ist gleich der Varianz der Beschleunigungen der beiden oberen Riegel. Ein gedämpftes System zeichnet sich dadurch aus, dass die Varianz des Eingangssignals σ_{ein}^2 größer als die des gemessenen Ausgangssignals σ_{aus}^2 ist. Je kleiner σ_{aus}^2 im Vergleich zu σ_{ein}^2 ist, desto besser ist die Konstruktion gedämpft. Wenn als Erwartungswert das arithmetische Mittel der Messwerte der Beschleunigungsaufnehmer je Messebene eingesetzt wird, ergibt sich die jeweils zugehörige Varianz zu:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})^2 . \quad (4)$$

- Je größer die prozentuelle Differenz von $\sigma_{\text{Ebene1}}^2/\sigma_{\text{ein}}^2$ zu $\sigma_{\text{Ebene2}}^2/\sigma_{\text{ein}}^2$ ist, desto besser ist das zweite Rahmengeschoß gedämpft und umgekehrt.
- Je kleiner das Verhältnis $\sigma_{\text{Ebene,i}}^2/\sigma_{\text{ein}}^2$ ist, desto besser ist das gesamte Rahmensystem gedämpft.

Die Mittelwerte und die sich daraus ergebenden Varianzen werden für 12 verschiedene Versuche ausgewertet. Bei den Messungen ändert sich einerseits die Einbauebene des VDDs, andererseits wird mit Parametern des VDDs selbst (Viskosität des Dämpfungöls und unterschiedliche Durchflussöffnungen im Kolbenkopf) variiert. Die gemessenen Größen sind Beschleunigungen, das heißt, für die Beurteilung der Dämpfung der Konstruktion werden Varianzen der Beschleunigungen verglichen (siehe Tab. 1).

Versuchsrahmen mit Übersetzung in EBENE 1						
	Messung Nr. 1 [V50/2D]	Messung Nr. 2 [V100/2D]	Messung Nr. 3 [V300/2D]	Messung Nr. 4 [V50/4D]	Messung Nr. 5 [V100/4D]	Messung Nr. 6 [V300/4D]
$\sigma_{\text{ai1}}/\sigma_{\text{ai0}}$	0,077	0,103	0,118	0,078	0,059	0,064
$\sigma_{\text{ai2}}/\sigma_{\text{ai0}}$	0,016	0,020	0,017	0,019	0,014	0,011
Versuchsrahmen mit Übersetzung in EBENE 2						
	Messung Nr. 7 [V50/2D]	Messung Nr. 8 [V100/2D]	Messung Nr. 9 [V300/2D]	Messung Nr. 10 [V50/4D]	Messung Nr. 11 [V100/4D]	Messung Nr. 12 [V300/4D]
$\sigma_{\text{ai1}}/\sigma_{\text{ai0}}$	0,042	0,064	0,089	0,044	0,065	0,105
$\sigma_{\text{ai2}}/\sigma_{\text{ai0}}$	0,027	0,046	0,086	0,031	0,058	0,090

Tabelle 1: Varianzverhältnisse

In Abbildung 8 und 9 werden die Verhältnisse $\sigma_{\text{ai1}}/\sigma_{\text{ai0}}$ (entspricht: $\sigma_{\text{Ebene1}}^2/\sigma_{\text{ein}}^2$) beziehungsweise $\sigma_{\text{ai2}}/\sigma_{\text{ai0}}$ (entspricht: $\sigma_{\text{Ebene2}}^2/\sigma_{\text{ein}}^2$) grafisch dargestellt. Die Messungen mit gleichem Dämpfungöl des VDDs werden blockweise dargestellt.

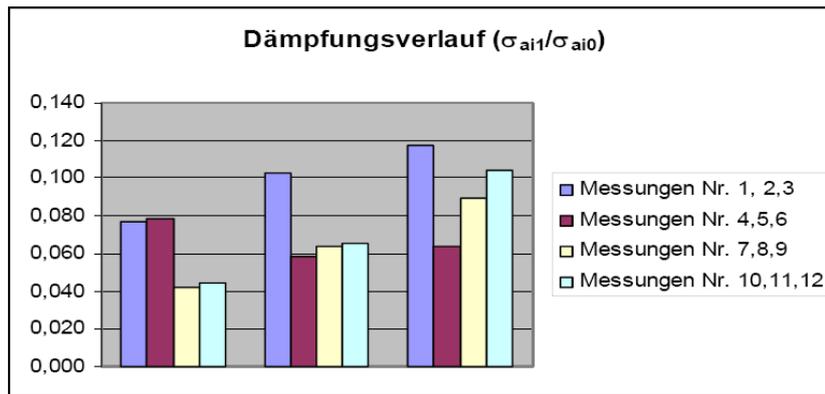


Abbildung 8: Dämpfungsverlauf aus den Verhältnissen $\sigma_{ai1}/\sigma_{ai0}$

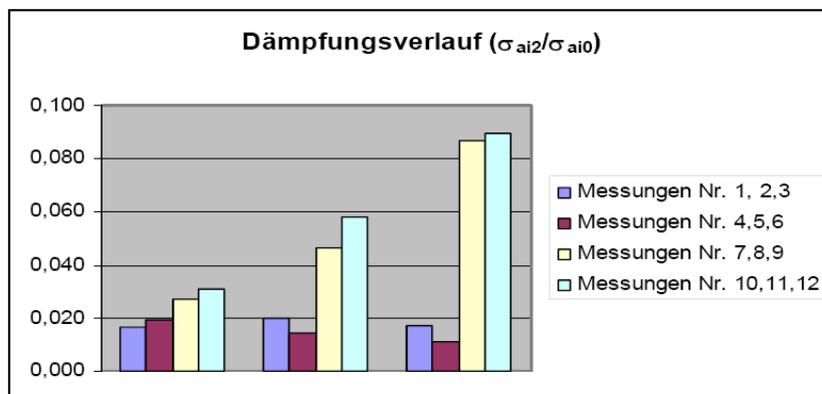


Abbildung 9: Dämpfungsverlauf aus den Verhältnissen $\sigma_{ai2}/\sigma_{ai0}$

Aus den Abbildungen 8 und 9 ist zu erkennen, dass die Übersetzungsanordnung in Ebene 1 beziehungsweise in Ebene 2 mit allen Dämpferkonfigurationen eine gute Dämpfung des Stockwerkrahmens bewirkt. Bis auf die Messungen Nr. 4, 5 und 6 weisen die Varianzverhältnisse $\sigma_{ai1}/\sigma_{ai0}$ und $\sigma_{ai2}/\sigma_{ai0}$ einen fast linear steigenden Verlauf auf. Die Dämpfung der Rahmenstruktur verbessert sich in den Experimenten mit geringer Viskosität des Dämpfungöls. Bezüglich der Anzahl der Durchflussöffnungen im Kolbenkopf lässt sich keine klare Aussage treffen. Bei Anordnung der Übersetzung in Ebene 1 wird die 2. Rahmenebene besser gedämpft als bei Übersetzungsanordnung in Ebene 2. Umgekehrt wird bei der Übersetzungsanordnung in Ebene 2 die erste Rahmenebene besser gedämpft als bei der Übersetzungsanordnung in Ebene 1.

Die untersuchten Rahmenkonstruktionen werden als mathematisch-mechanische Modelle beschrieben, mittels numerischer Simulation angeregt und die Ergebnisse schließlich den aus den Messungen gewonnenen Ergebnissen gegenübergestellt. Um die Signalantworten der zwei Riegelebenen des jeweiligen Versuchsaufbaus auf ein bekanntes Eingangssignal zu erhalten muss dessen Übertragungsmatrix $\mathbf{H}(iv)$ bestimmt werden,

$$\mathbf{H}(iv) = (\mathbf{k} - v^2 \mathbf{m} + iv \mathbf{r})^{-1}, \quad i = \sqrt{-1}, \quad v \dots \text{Erregerfrequenz.} \quad (5)$$

liegen. Dies kann auf kleine geometrische Ungenauigkeiten beziehungsweise unbestimmbare Dämpfereinflüsse zurückzuführen sein.

Vergleicht man die Varianzverhältnisse $\sigma_{ai1}/\sigma_{ai0}$ für beide Übersetzungsanordnungen, so lässt sich bei den Messungen ein linear steigender Verlauf bei steigender Viskosität des Dämpfungsöls erkennen. Für die Varianzverhältnisse $\sigma_{ai2}/\sigma_{ai0}$ ist diese Tendenz nur für die Übersetzungsanordnung in Ebene 2 zu erkennen. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass bei Steigerung der Viskosität der Silikonöle die Varianzverhältnisse geringer werden.

Weiters ist zu erkennen, dass sich die Varianzverhältnisverläufe von Messung und Simulation bis auf wenige Ausnahmen genau konträr verhalten. Aufgrund der Simulation zeigt sich, dass jene Dämpfer mit 2 Durchflussöffnungen im Kolbenkopf ein besseres Dämpfungsverhalten in den untersuchten Rahmenaufbauten aufweisen als Dämpfer mit 4 Düsenöffnungen.

Aus den Ergebnissen folgt, dass die zweite Rahmenebene bei Anordnung der Übersetzung in Ebene 1 im Vergleich zur Anordnung der Übersetzung in Ebene 2 die bessere Lösung darstellt. Dies gilt auch umgekehrt für die erste Rahmenebene. Hier lässt sich eine gute Wirkung der Dämpfer bei einer Übersetzungsanordnung in Ebene 2 erzielen.

5. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die Untersuchungen an den einstöckigen und zweistöckigen Rahmen zeigen, dass sich Rahmenstrukturen durch den Einbau eines VDDs gut dämpfen lassen und es möglich ist den dynamischen Vergrößerungsfaktor um ein Vielfaches zu reduzieren. Die zu dämpfende Struktur selbst wird durch den Einbau des Dämpfers nicht wie bei konventionellem Erdbebendesign „steifer“ gemacht. Somit wird die Eigenfrequenz auch nicht erhöht. Weiters kann durch eine geeignete Wahl des Übersetzungsverhältnisses die Dämpfung optimiert werden. Wird die Übersetzung aber zu groß gewählt, kommt es aufgrund der sehr hohen effektiven Dämpfungskonstante zu einer, ebenfalls unerwünschten, Starrkörperbewegung. Die Dichtungen der eingesetzten VDDs wurden für die Versuche adaptiert um geringere Reibungsverluste zu erhalten. Für reale Bauwerke müssen mehrere VDDs eingesetzt werden, deren Dämpfungsparameter, basierend auf den maximalen auftretenden dynamischen Kräften, gewählt werden.

Im Zuge der Kapazitätsbemessung von Strukturen sind seismische Dämpfer ein gutes Mittel um Schäden aufgrund plastischer Verformungen zufolge dynamischer Lasten zu vermeiden oder zumindest zu minimieren.

SCHRIFTENVERZEICHNIS

Seltenhammer, A., 2006. Optimal Arrangement and Parameters of Viscous Damping Devices in Plane Frame Structures. Diplomarbeit, Technische Universität Wien.

Leitner, M., 2006. Dynamische Wirkung externer viskoser Schwingungsdämpfer in stochastisch angeregten Rahmentragwerken. Diplomarbeit, Technische Universität Wien.