

„Forced Vibration Tests“ an einem Einfamilienhaus in Monthey, Wallis, Schweiz

Felix Weber*, Olaf Huth*, Daniel Gsell*, Glauco Feltrin*, Pierino Lestuzzi[#], Roberto Peruzzi[‡] und Masoud Motavalli*

(*) Abteilung Ingenieur-Strukturen, EMPA Dübendorf

([#]) Laboratoire d'informatique et de mécanique appliquées à la construction, EPFL

([‡]) Bureau d'ingénieurs civils Kurmann & Cretton SA in Monthey

Zusammenfassung: In Zusammenarbeit mit dem Laboratoire d'informatique et de mécanique appliquées à la construction der EPFL und mit dem Bauingenieurbüro Kurmann & Cretton SA in Monthey führte die Abteilung Ingenieur-Strukturen der Empa Dübendorf erzwungene Schwingungsmessungen an einem Einfamilienhaus in Monthey (VS) durch. Das Mauerwerkshaus besteht aus einem Erd-, einem Unter- und einem Obergeschoss. Zwei hydraulische Zylinder, welche je eine Masse von 500 kg auf einem Schlitten bewegen und damit maximal eine dynamische Kraft von 32 kN produzieren, wurden auf den Boden des Obergeschosses montiert. Die Zylinder sind weggeregelt, wobei die Regelsoftware auch das Fahren von beliebigen Sollwegsignalen, also auch Zufallssignale, erlaubt. Die in die Struktur eingeleitete Kraft wird dabei von einem Kraftsensor zwischen Zylinder und Montagehalterung gemessen. Die Antwort des Hauses wurde mittels Beschleunigungssensoren gemessen, und zwar auf dem Obergeschoss in den Ecken und in der Mitte in beiden Hauptachsen und im Erd- wie Untergeschoss in der Mitte in beiden Hauptachsen. Eine erste Umgebungsvibrationsmessung hat eine Frequenz von ca 10 Hz für die erste Eigenschwingung ergeben. Basierend darauf wurde dann die Struktur mit Zufallssignalen im Frequenzbereich 5 bis 20 Hz während 400 s mit steigender dynamischer Zylinderkraft angeregt. Das Ziel war den Einfluss der Anregungsintensität auf die Modalparameter zu untersuchen. Die Messungen zeigen, dass die erste Eigenfrequenz und deren Dämpfung stark von der Anregungsintensität abhängen. Gründe für dieses stark nichtlineare Verhalten können Interaktionen zwischen Boden und Gebäude sein, welches sich auch als Starrkörper bewegte. Zusätzlich zu diesen Tests wurde das Haus sinusförmig in seiner ersten Eigenfrequenz angeregt, um das Mauerwerk eventuell weiter zu schädigen. Die Messungen zeigen aber, dass keine zusätzlichen Schäden selbst bei 64 kN dynamischer Zylinderkraft bewirkt werden konnten.

1 Motivation

Das gemessene Spektrum von Erbeben zeigt, dass ihre Energie auch in einem engen Frequenzbereich nicht gleichverteilt ist (Abbildung 1) [1]. Um die Wirkung eines Erdbebens auf ein Gebäude abschätzen zu können, muss man daher sicher die Eigenfrequenzen des Gebäudes kennen, und zwar die tiefsten Eigenfrequenzen, da diese Schwingungen i.d.R. die grössten Relativverschiebungen bewirken. Falls das Gebäude in einer seiner Eigenfrequenzen angeregt wird, so ist die resultierende Schwingamplitude von der Dämpfung der angeregten Eigenschwingung und der Schwingungsform abhängig. Daher müssen nebst Eigenfrequenzen auch Dämpfung (damping ratio) und Eigenformen, also alle Modalparameter bekannt sein.

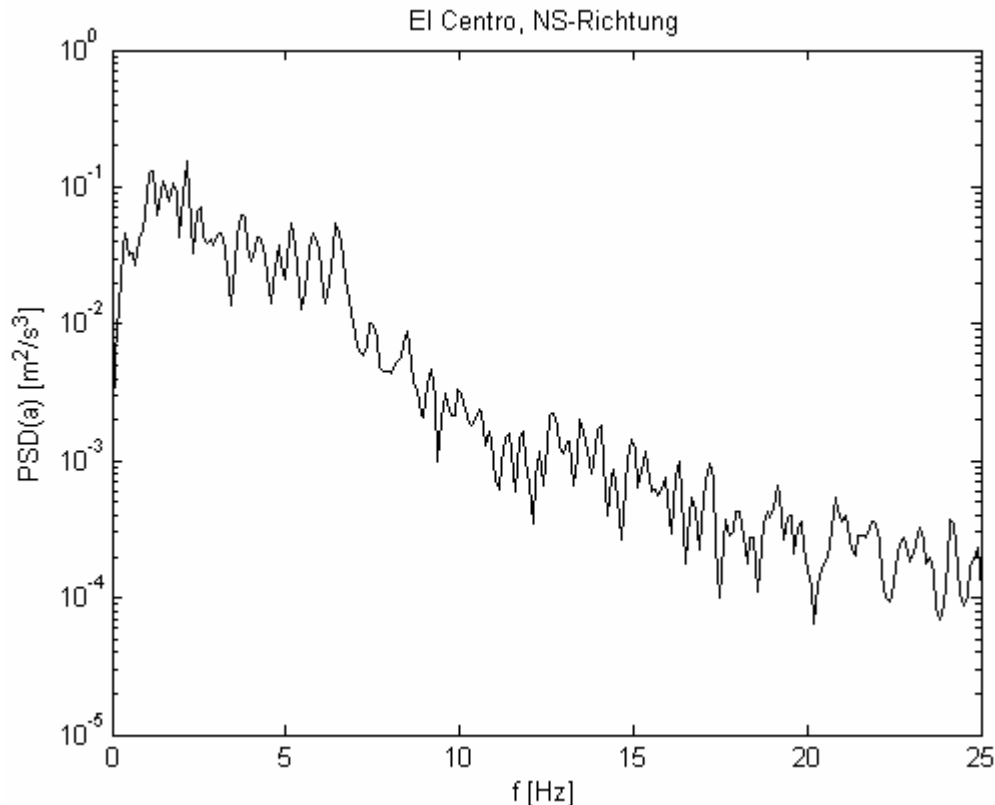


Abbildung 1: Gemessenes Spektrum des El Centro Erdbebens in Nord-Süd-Richtung.

2 Versuchsaufbau

2.1 Struktur

Das Versuchsobjekt ist das Einfamilienhaus in der Avenue du Crochetan 54, 1870 Monthey, Wallis (Abbildung 2) [2]. Es ist ein Haus mit einem Untergeschoss, einem Erdgeschoss und einem Obergeschoss mit Dachschräge. Die Mauern sind Backsteinmauern, die Decke zwischen Erdgeschoss und Obergeschoss ist eine Stahlbetonrippendecke mit Füllsteinen.

2.2 Hydraulische Schwinger

Jeder hydraulische Schwinger bewegt eine Masse von 500 kg auf einem Montagegerüst (Abbildung 3). Die Schwinger erzeugen statisch maximal 40 kN und dynamisch maximal 32 kN. Der maximale Kolbenweg beträgt +/- 160 mm.

Die Schwinger wurden mittels Kranwagen und Mulde ins Obergeschoss transportiert (Abbildung 4, Abbildung 5). Die auf einem Montagegerüst montierten Schwinger wurden mit der anzuregenden Struktur mittels vorgespannter Schrauben verbunden (Abbildung 6, links).

Die Schwinger wurden weggeregelt betrieben, wobei ein Kraftsensor zwischen Zylinder und Montagegerüst die aktuelle, auf die Struktur wirkende Kraft misst. Die Regelsoftware erlaubt sowohl das Fahren von sinusförmigen Wegsignalen wie auch das Fahren von beliebig definierten Sollwegsignalen (Abbildung 6, rechts), also auch Zufallssignale mit definierter Bandbreite, so genannt farbiges Rauschen.



Abbildung 2: Einfamilienhaus in Monthey, Wallis, Schweiz.



Abbildung 3: Hydraulischer Schwinger mit 500 kg Masse auf Schlitten, fixiert auf gelbem Montagegerüst.



Abbildung 4: Kranwagen, welcher die Mulde mit Schwinger ans Haus hebt (links) und Schwinger in Mulde (rechts).



Abbildung 5: Mulde mit Schwinger wird gegen das Obergeschoss geführt.

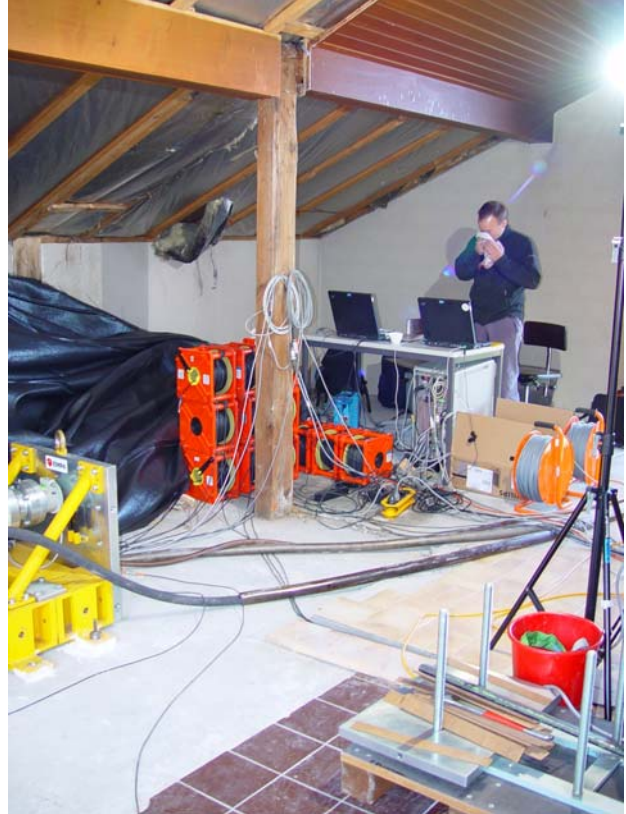


Abbildung 6: Bohren der Löcher für die Montage des Schwingers (links) und Messstation mit Control-Tower für Wegregelung beider Schwinger.

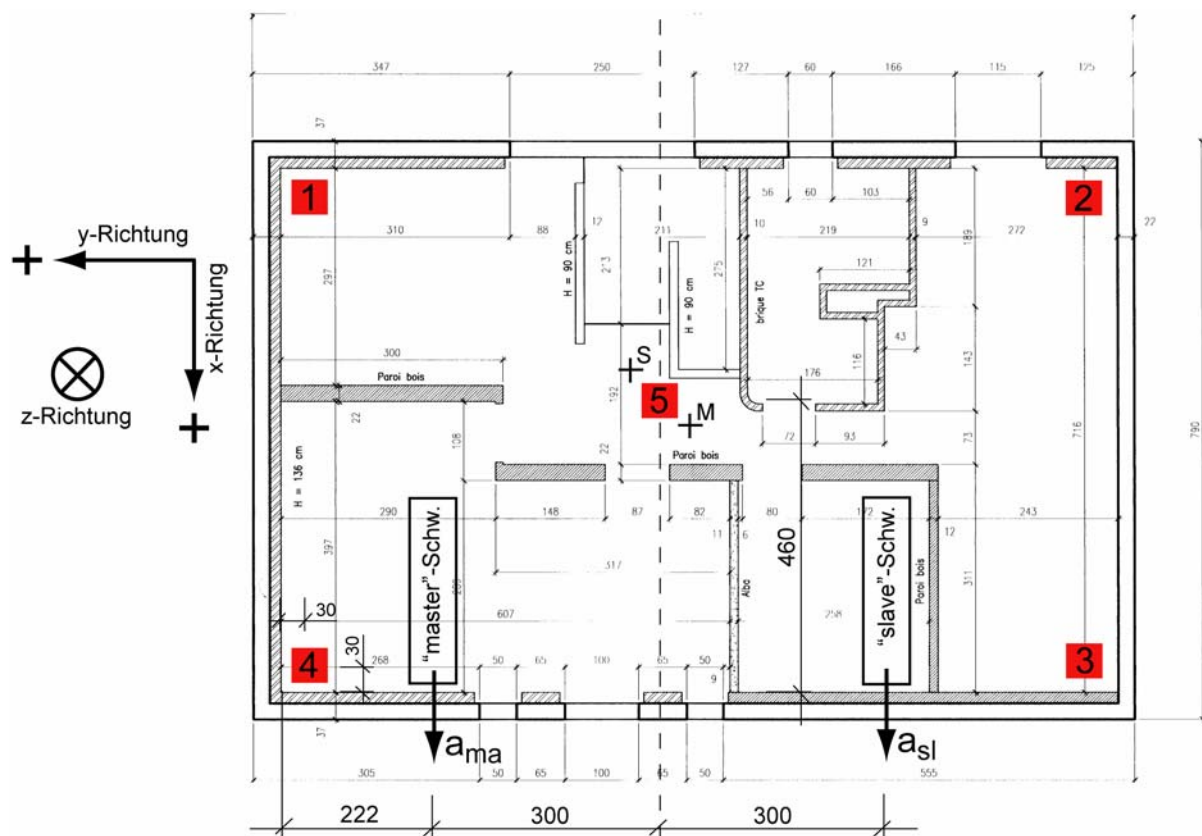


Abbildung 7: Mobile Ölversorgung auf Empa-Lastwagen.

Die Ölversorgung wurde durch mobile, auf dem Empa-Lastwagen gelagerte Öldruckaggregate sichergestellt (Abbildung 7).

2.3 Messkonfiguration

Im Obergeschoss wurde die Beschleunigung in allen Ecken und in der Mitte zwischen berechnetem Massen- und Steifigkeitsschwerpunkt in x-, y- und z-Richtung gemessen (Abbildung 8). Im Erdgeschoss wie auch im Untergeschoss wurde die Beschleunigung in der Mitte zwischen berechnetem Massen- und Steifigkeitsschwerpunkt in den beiden Hauptachsen (x- und y-Richtung) gemessen. Die gewählte Sensorverteilung erlaubte das Bestimmen der ersten angeregten Eigenschwingung um die schwache Achse des Hauses.



■ : 3-dimensionale Beschleunigungsmessung des Bodens des OG

a_{ma} : Beschleunigung in x-Richtung des "master"-Schwingers

a_{sl} : Beschleunigung in x-Richtung des "slave"-Schwingers

S: berechneter Steifigkeitsmittelpunkt

M: berechneter Massenschwerpunkt

Abbildung 8: Sensorplatzierung auf dem Obergeschoss.

3 Messungen

3.1 Umgebungsvibrationsmessung

Da die Struktur bei den „forced vibration tests“ in x-Richtung, also um die schwache Achse, angeregt wurde, wird in Abbildung 9 das Spektrum gemittelt aus allen Sensoren in x-Richtung resultierend aus den Umgebungsvibrationsmessung gezeigt. Die erste Eigenfrequenz ist an diesem Versuchstag zu 10.25 Hz bestimmt worden (Abbildung 9, Tabelle 1).

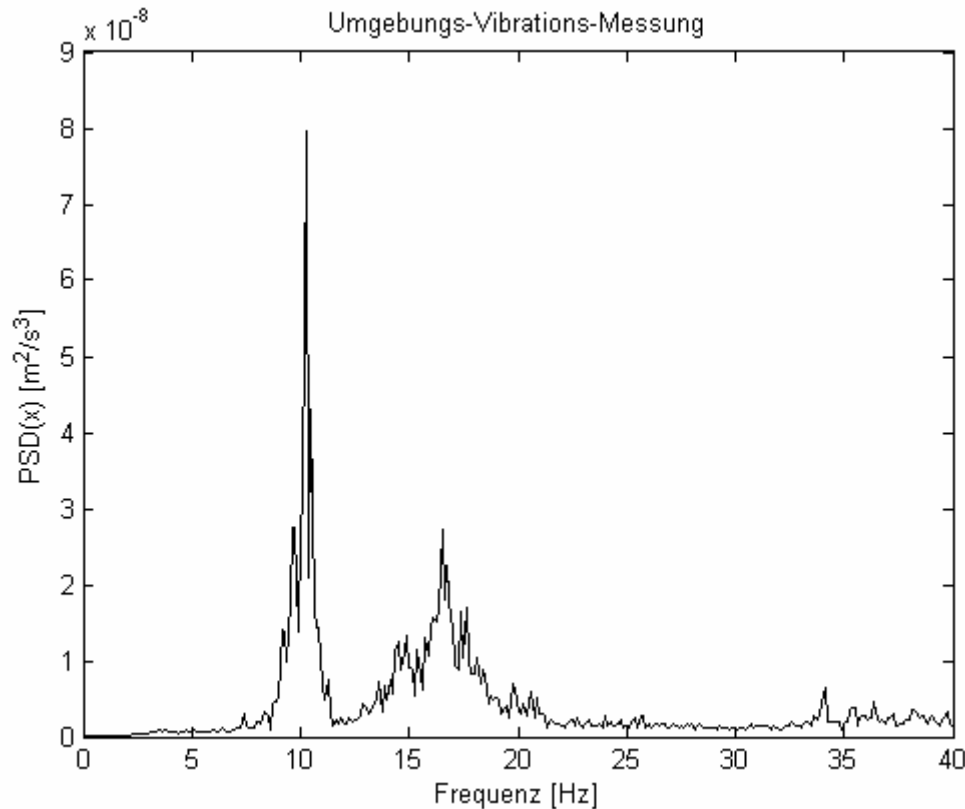


Abbildung 9: Spektrum (Power spectral density estimate via Welch's method) gemittelt über alle Sensoren in x-Richtung resultierend aus Umgebungsvibrationsmessung.

Tabelle 1: Daten Umgebungsvibrations-Messung.

Anregungsart	Messzeit [s]	Messfrequenz [Hz]	Anzahl Sensoren für Mittelung [-]	Erste Eigenfrequenz [Hz]
Umgebungs-vibrationen	900	512	5	10.25 (abhängig vom Versuchstag)

3.2 „Forced Vibration“-Messung

Die Struktur wurde bei den „forced vibration tests“ in x-Richtung nur mit dem Schwinger „master“ mit einem breitbandigen Zufallssignal angeregt (Abbildung 10). Dabei wurde die maximale Schwingerkraft von 5%-100% variiert, wobei aber das Spektrum der Anregung

ihren grössten Energieanteil immer im Frequenzbereich 4-20 Hz hatte. Der Weg wurde so geregelt, dass in diesem Frequenzbereich die Anregungsenergie etwa konstant war, damit die Eigenschwingungen dieses Frequenzbereichs etwa gleich stark angeregt wurden.

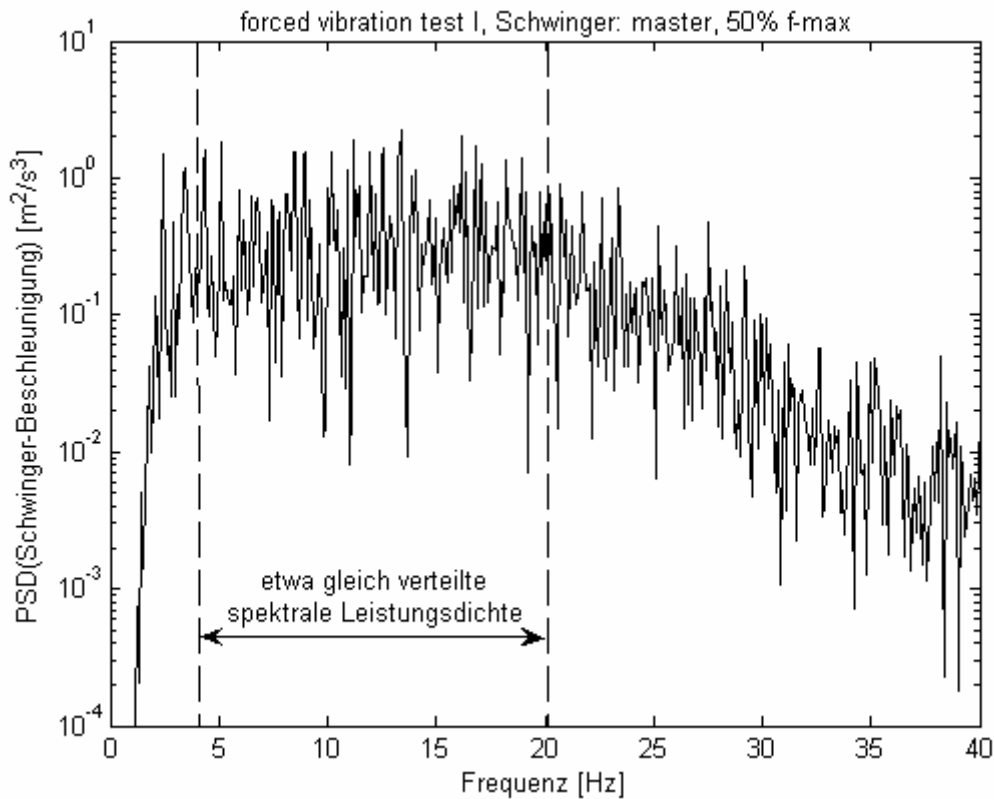


Abbildung 10: Spektrum der Anregung.

Der Schwinger regt die Struktur mit der Kraft an, welche dem Produkt aus Schwingermasse mal Schwingerbeschleunigung entspricht. Da die Masse (500 kg) konstant ist, kann die Übertragungsfunktion aus Anregung und Antwort mit der Schwingerbeschleunigung und Strukturbeschleunigung gebildet werden. Aus der spektralen Leistungsdichte der Beschleunigung k und der Beschleunigung des Schwingers [3]

$$a_k(t) \xrightarrow{\text{Fourier Transformation}} Y_k(j\omega), \quad a_{sch}(t) \xrightarrow{\text{Fourier Transformation}} U(j\omega) \quad (1), (2)$$

resultiert die dimensionslose Transferfunktion

$$G_k(j\omega) = \frac{Y_k(j\omega)}{U(j\omega)}. \quad (3)$$

Die Magnitude ist die Quadratwurzel aus Real- und Imaginärteil der Übertragungsfunktion

$$M_k(\omega) = \sqrt{\{Re(G_k(j\omega))\}^2 + \{Im(G_k(j\omega))\}^2}. \quad (4)$$

Dargestellt in Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13 ist die über alle n Sensoren in x -Richtung gemittelte Magnitude

$$\text{gemittelte Magnitude}(x) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n M_k(\omega) \quad (5)$$

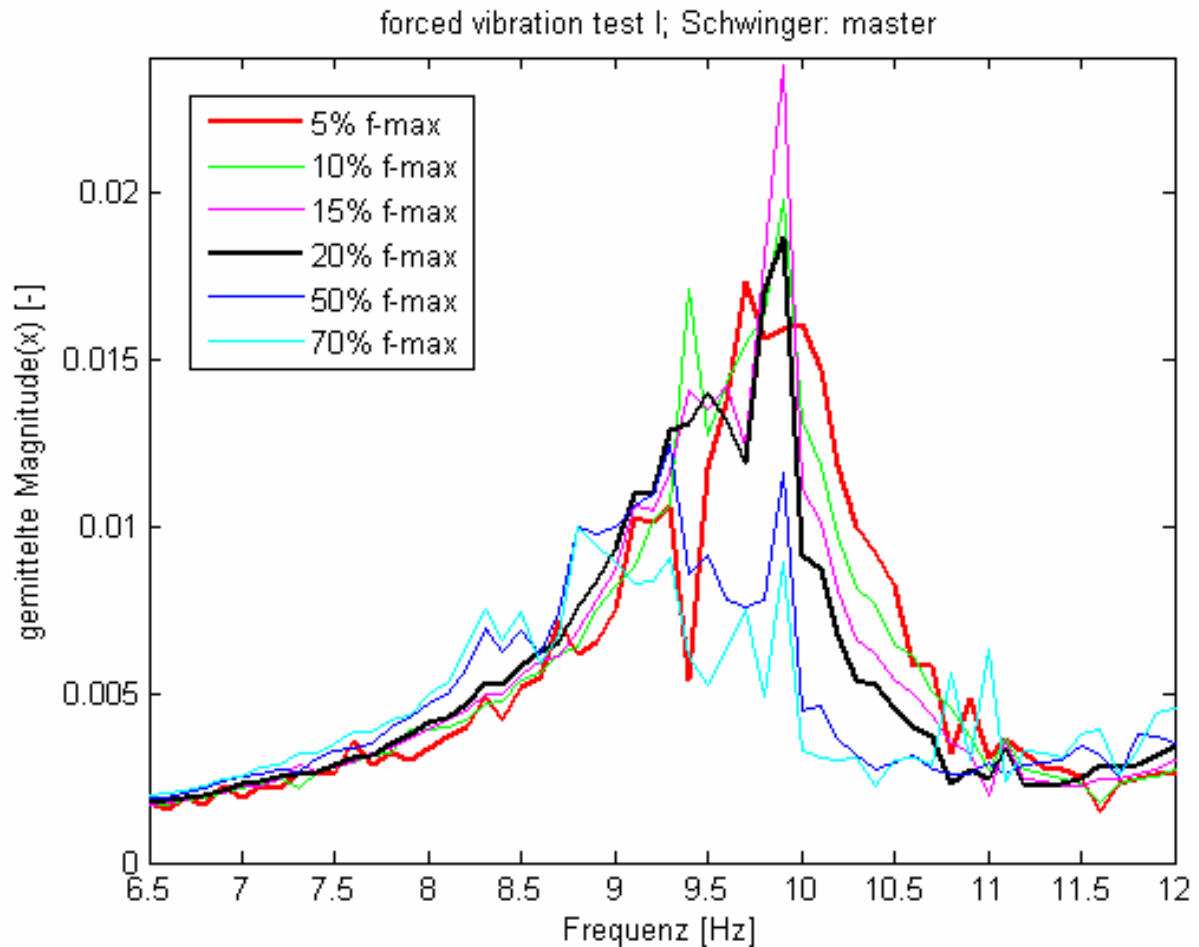


Abbildung 11: Gemittelte Magnitude in Abhängigkeit der Anregungsintensität, Versuchsserie I.

Die Dämpfung (damping ratio, nicht Logarithmisches Dekrement) kann mit der Methode der halben Bandbreite aus den gemessenen Übertragungsfunktionen (Abbildung 11, Abbildung 12, Abbildung 13) wie folgt bestimmt werden [4]

$$\zeta = \frac{f_{s2} - f_{s1}}{2f_{res}} \quad (6)$$

wobei f_{res} die Resonanzfrequenz ist und f_{s1} bzw. f_{s2} die Frequenzen, wo die Resonanzkurve den Wert $(Max/\sqrt{2})$ schneidet. Um diese Methode anwenden zu können, wird die Resonanzkurve links des Resonanz-Peaks und rechts des Resonanz-Peaks mit einem Polynom 3-ter Ordnung gefittet. Die Frequenzen f_{s1} und f_{s2} werden mittels der gefitteten Polynome bestimmt. Der Maximalwert wird mit der ursprünglichen Magnitude bestimmt. Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen die Methode anhand der Messung bei 10% und 70% Anregungsintensität. Da die Resonanzkurven wegen nichtlinearen Effekten nicht symmetrisch sind, und da die Dämpfung relativ gross ist, liefert diese Methode eine grobe Schätzung der Dämpfung.

Eine weitere Methode für die Bestimmung der Dämpfung ist das Bestimmen des Logarithmischen Dekrements aus Aufschwingversuchen (Abbildung 16) [5]. Dazu wurde das Gebäude mit dem Schwinger „master“ sinusförmig mit erster Gebäudeeigenfrequenz mit 100% Intensität angeregt und durch Ausschalten der gesamten Hydraulik der Ausklang der angeregten Grundschwingung gemessen.

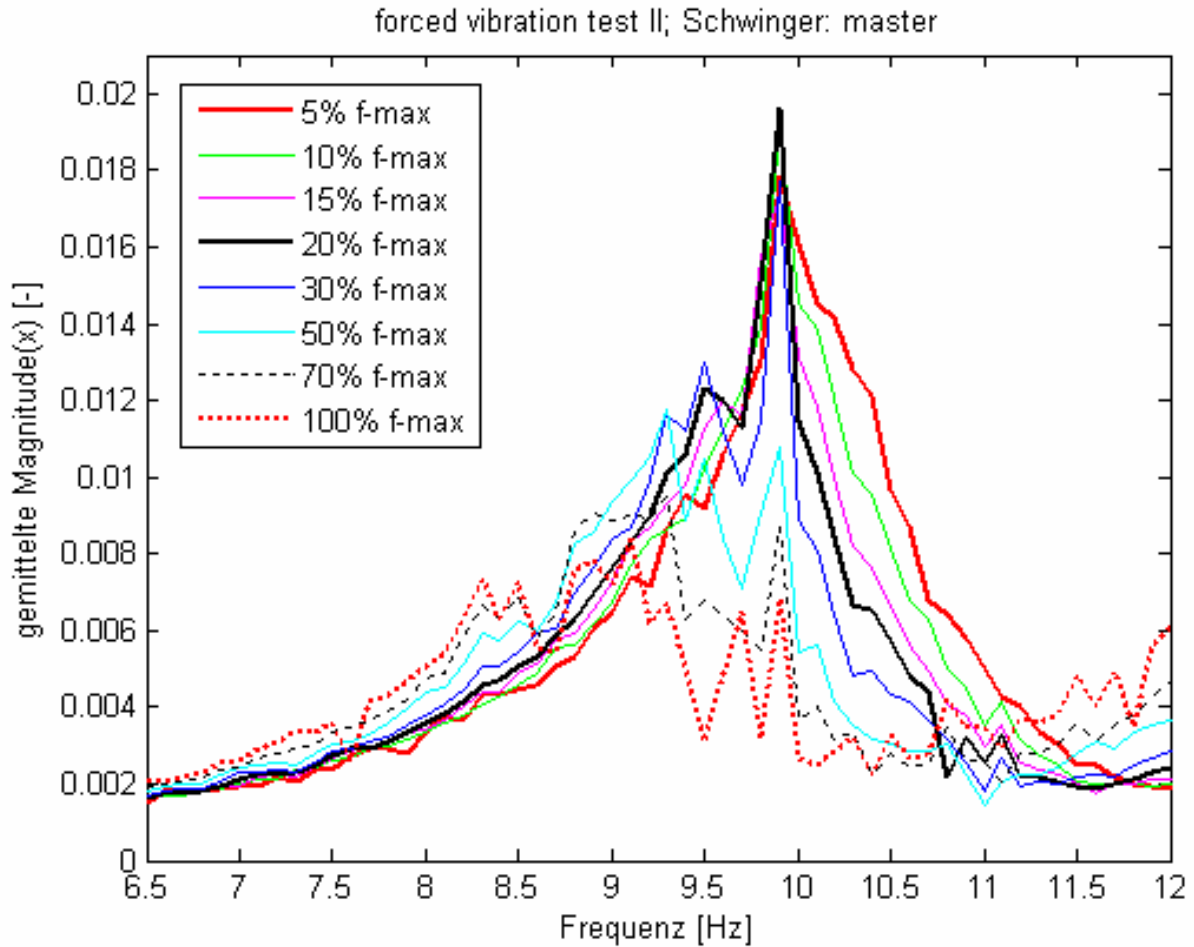


Abbildung 12: Gemittelte Magnitude in Abhängigkeit der Anregungsintensität, Versuchsserie II.

Unter der Annahme rein viskoser Dämpfung ist das Verhältnis der lokalen Maxima in der Abklingkurve konstant. Aus dem logarithmischen Dekrement kann dann die Dämpfung (damping ratio) für die angeregte Eigenschwingung bestimmt werden.

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \ln\left(\frac{a(t_i)}{a(t_i + nT_d)}\right) = \frac{1}{n} \cdot \ln(a(t_i)) - \ln(a(t_i + nT_d)) \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (8)$$

Die Tabelle 2 gibt einen Überblick über die hier beschriebenen Versuche. Die Anregung mit Zufallssignal bei verschiedenen Stufen der maximalen dynamischen Zylinderkraft wurde dreimal gemacht. Die sinusförmige Anregung der Struktur erfolgte bei der Frequenz der ersten Eigenschwingung um maximale Verschiebungen der Struktur zu erzielen und damit voraussichtlich die höchste Dämpfung, welche in diesem Fall 20% betrug (Tabelle 2, Abbildung 16).

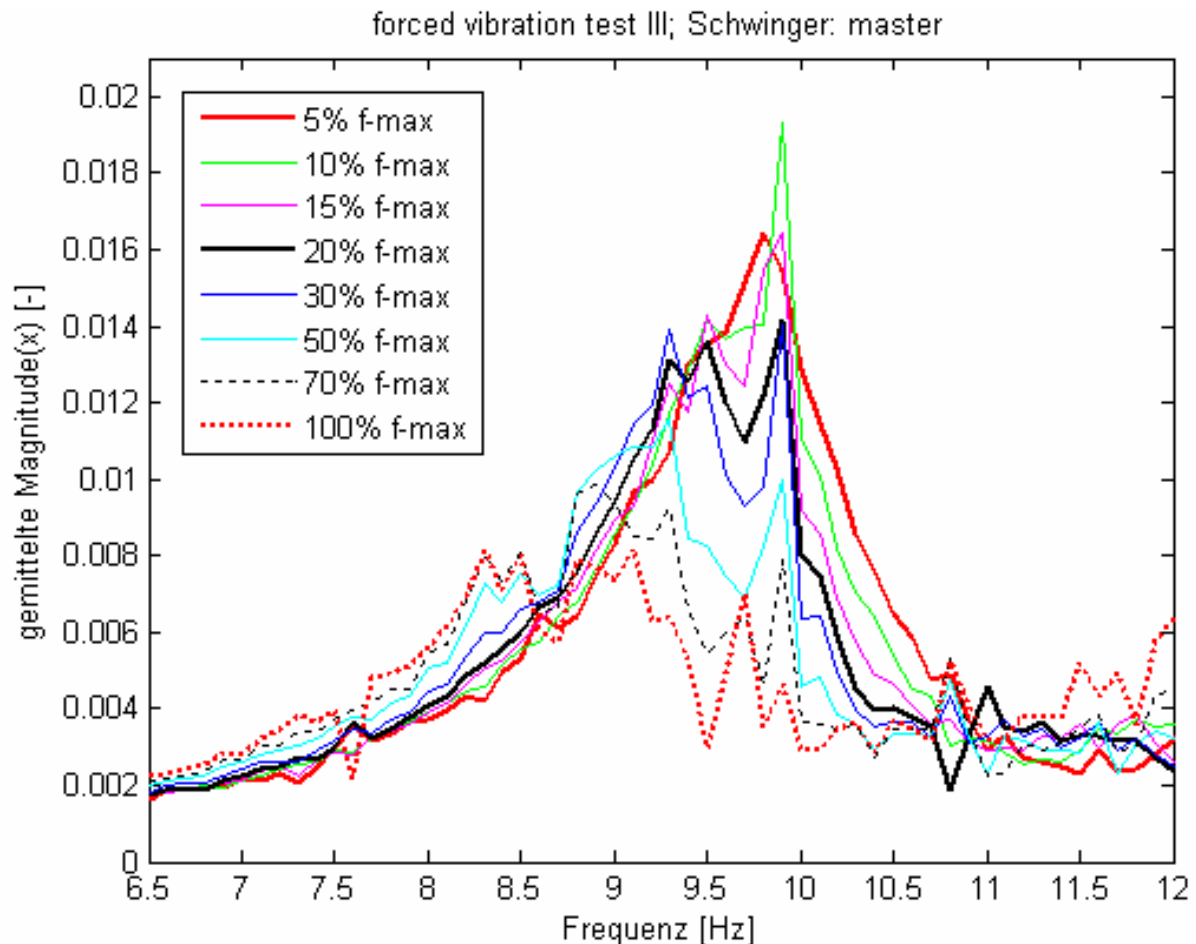


Abbildung 13: Gemittelte Magnitude in Abhängigkeit der Anregungsintensität, Versuchsserie III.

Mit zunehmender Anregungsintensität des breitbandigen Zufallssignals sinkt die Frequenz der ersten Eigenschwingung (Abbildung 17) und deren Dämpfung steigt (Abbildung 18). Diese Abhängigkeit, welche alle drei Versuchsserien zeigen, ist das Resultat der grösseren erzwungenen Verschiebung, welche vermutlich zu grösseren Relativverschiebungen zwischen einzelnen Bauelementen und vermutlich zu grösseren Relativverschiebungen zwischen Struktur und Boden führten. Damit nimmt die Reibung und demzufolge die Dämpfung zu und die Eigenfrequenz ab.

Die Dämpfung (damping ratio) ist für die Zufallsanregung mit der Methode der halben Bandbreite und für die harmonische Anregung, wo die Gebäudeanregung maximal gross war, mit der Methode des Logarithmischen Dekrementes aus Aufschwingversuchen ermittelt worden. Obwohl die Methode der halben Bandbreite für asymmetrische Resonanzkurven und für sehr grosse Dämpfungszahlen nur bedingt zuverlässig ist, so liegen diese Punkte doch in einer Linie mit der Dämpfungszahl resultierend aus harmonischer Anregung. Dies deutet darauf hin, die Methode der halben Bandbreite in diesem Beispiel trotz allem eine gute Abschätzung für die Dämpfung liefert.

Der leichte Einbruch der Dämpfung im Bereich zwischen 10%-20% Anregungsintensität in Abbildung 18 korrespondiert mit der Tatsache, dass die Resonanz-Peaks nicht bei 5% Anregungsintensität sondern bei 10%-20% Anregungsintensität maximal sind (Abbildung 11, Abbildung 12, Abbildung 13). Dass die Dämpfung nicht bei minimaler Anregungsintensität minimal ist kann mit der These grösserer Relativverschiebungen nicht erklärt werden.

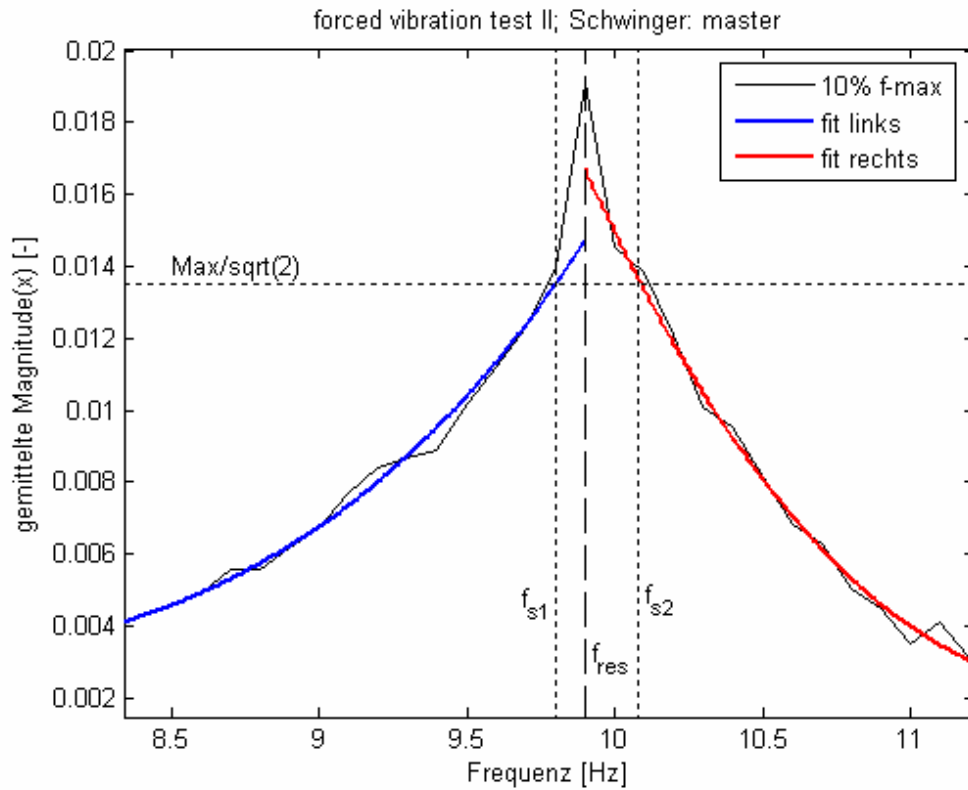


Abbildung 14: Beispiel für Methode der halben Bandbreite für 10% Anregungsintensität.

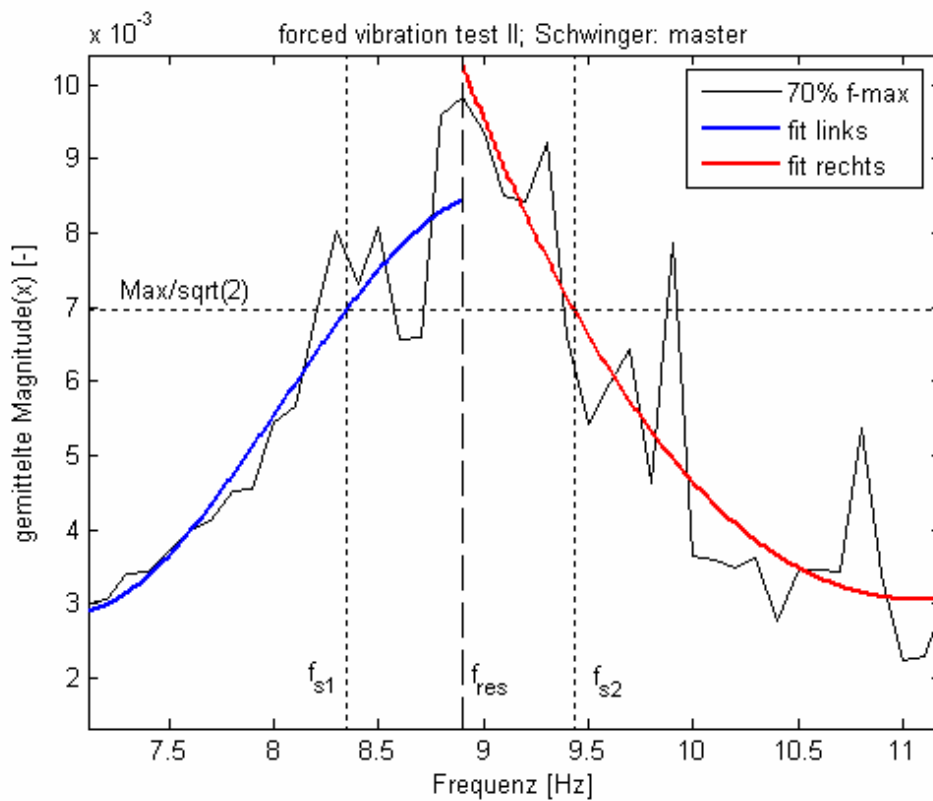


Abbildung 15: Beispiel für Methode der halben Bandbreite für 70% Anregungsintensität.

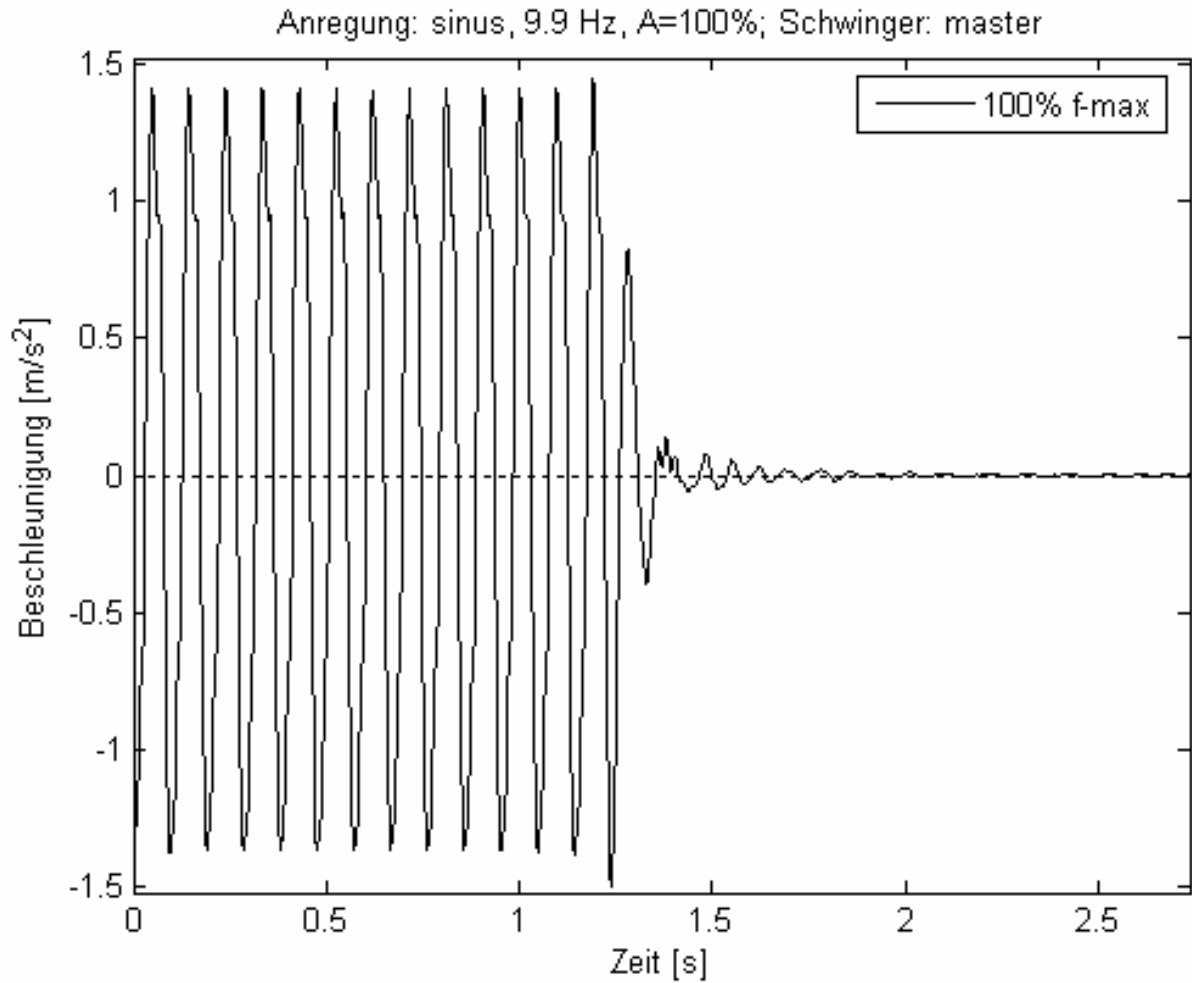


Abbildung 16: Freies Abklingen der ersten Eigenschwingung um die schwache Achse.

Tabelle 2: Daten „forced vibration“-Messung.

Anregungsart	Messzeit [s]	Versuchsreihe [-]	Anzahl Sensoren für Mittelung	Anregungsintensität in % der maximalen dynamischen Schwingerkraft	Dämpfung [%]
Schwinger „master“, Zufallssignal 5-20 Hz	400	I	5	5%, 10%, 15%, 20%, 50%, 70%	Siehe Abbildung 18
Schwinger „master“, Zufallssignal 5-20 Hz	400	II	5	5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 50%, 70%, 100%	Siehe Abbildung 18
Schwinger „master“, Zufallssignal 5-20 Hz	400	III	5	5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 50%, 70%, 100%	Siehe Abbildung 18
Sinus, 9.9 Hz	20	(viele)	5	100%	20

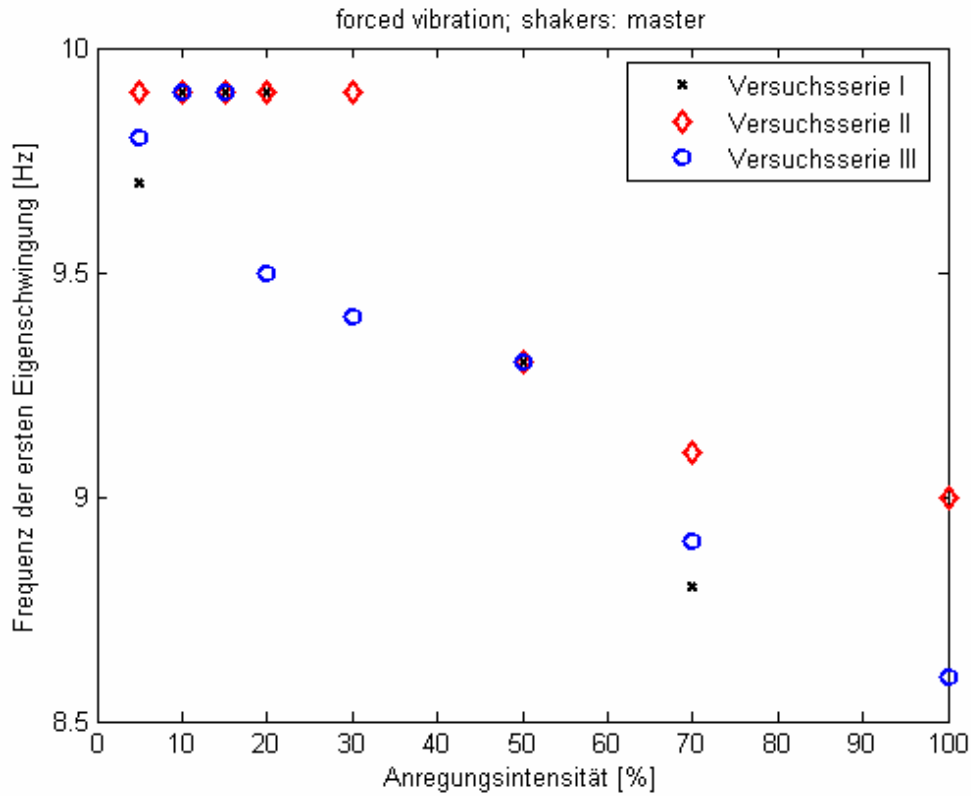


Abbildung 17: Zusammenhang Frequenz-Anregungsintensität für die erste Eigenschwingung bei Zufallsanregung.

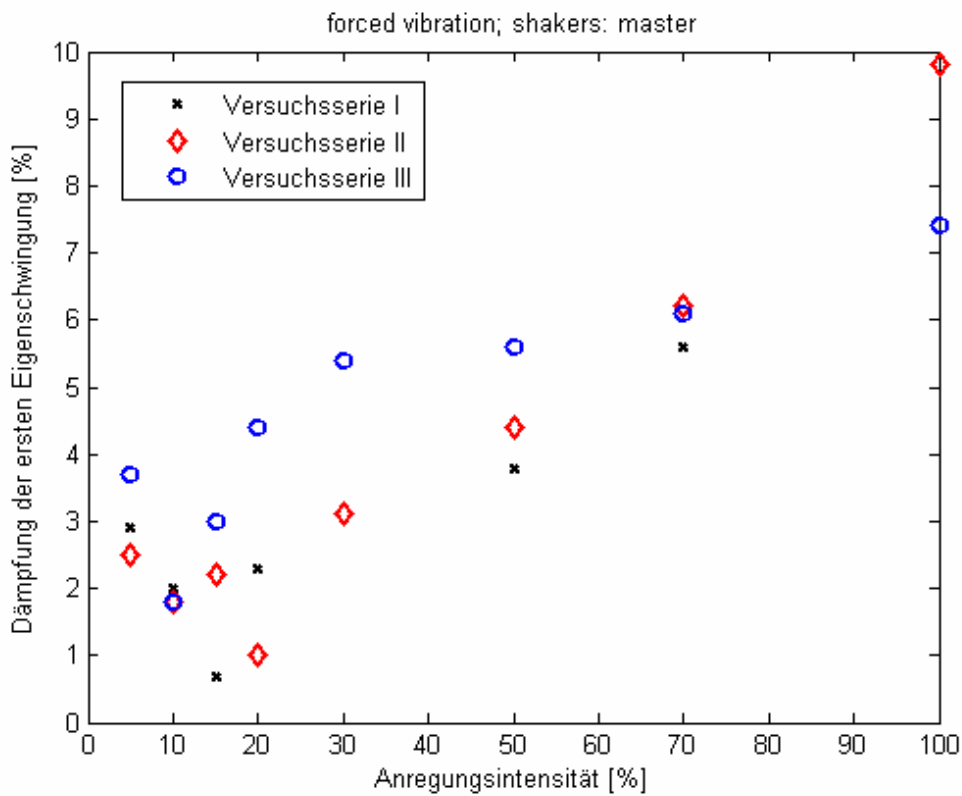


Abbildung 18: Zusammenhang Dämpfung-Anregungsintensität für die erste Eigenschwingung bei Zufallsanregung.

4 Schlussfolgerungen

Die Schwingungsmessungen an dem Einfamilienhaus in Monthey zeigen deutlich, dass die Dämpfung eines niedrigen Hauses mit zunehmender Anregungsamplitude zunimmt. Dieser nichtlineare Effekt ist sehr wahrscheinlich das Resultat erhöhter Reibung zwischen einzelnen Bauelementen und zwischen Struktur und Boden, was zu mehr Energiedissipation und damit zu mehr Dämpfung führt. Dieser Effekt kann z.B. bei Erdbeben von Nutzen sein, da stärkere Erdbeben zwar grössere Verschiebungen der Gebäude bewirken, aber die erhöhte Gebäudedämpfung die erhöhte Gebäudeschwingamplitude wenigstens zum Teil kompensiert.

Dank

Der Dank geht an die Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen und das Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), welche das Projekt finanziell unterstützten. Des Weiteren ist den technischen Mitarbeitern des Structural Engineering Research Laboratory für ihren kompetenten Einsatz gedankt.

Referenzen

- [1] <http://www.vibrationdata.com/elcentro.htm>
- [2] Weber, F., and Huth, O. (2005), "Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften eines Einfamilienhauses in Monthey / Wallis", Empa-Bericht Nr. 841173.
- [3] Bachmann, H., et al. (1995), *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*, Birkhäuser Verlag Basel, ISBN 3-7643-5148-9.
- [4] Hamm, P. (2002), "Vibrations of wooden footbridges induced by pedestrians and a mechanical exciter", *Proceedings of the International Conference on Footbridge*, Paris, France, 20-22 November 2002, on CD, AFGC – OTUA (eds.).
- [5] Weber, F., Distl, H., and Nützel, O. (2005), "Versuchsweiser Einbau eines adaptiven Seildämpfers in eine Schrägseilbrücke", *Beton- und Stahlbetonbau 100(2005)*, Heft 7, 582-589.