Vergleich verschiedener Anregungsarten einer Platte mit einem Laser-Scanning-Vibrometer

Kai Simanowski, Tom Langmann, Timo Schaffeld und Delf Sachau

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Professur für Mechatronik, 22043 Hamburg
E-Mail: simanowski@hsu-hh.de

Einleitung

Für die experimentelle Untersuchung des dynamischen Verhaltens schwingungsfähiger Strukturen werden diese zunächst angeregt. Durch die Messung der darauf folgenden Vibration können charakteristische Parameter ermittelt werden. Mit Hilfe spezieller Signalformen und unter Erfassung der Anregung selbst, kann das Übertragungsverhalten zwischen verschiedenen Orten der Struktur gemessen werden. Eine ausreichende Anzahl geeigneter Messpunkte ermöglicht es, das Orts- und Frequenzabhängige Schwingverhalten aussagekräftig zu visualisieren.

Für die Anregung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, von denen einige in dieser Arbeit gegenübergestellt werden.

Versuchsaufbau

Als Beispielstruktur dient eine Aluminiumplatte, die an einem Holzgehäuse befestigt ist. Für Untersuchungen zur aktiven Lärmminderung [1] wurde diese mit Piezo-Aktoren bestückt, siehe Abbildung 1.

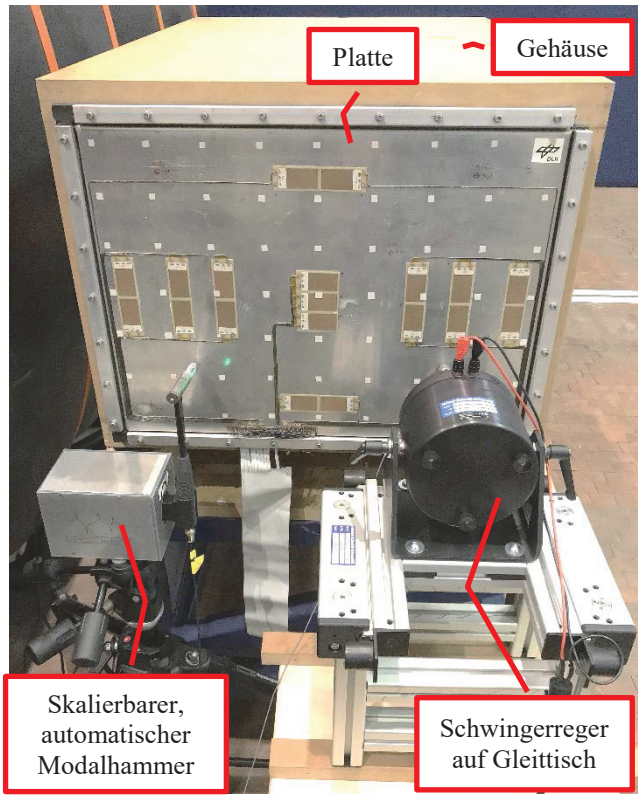

Abbildung 1: Versuchsaufbau, Platte mit Anregungsvorrichtungen

Das Holzgehäuse besteht, zur Minderung von Wandschwingungen, aus 50 mm dicken MDF-Platten und hat ein Innenmaß (Breite*Höhe*Tiefe in mm) von 600*450*1000. Der Innenraum ist, zwecks Unterdrückung von Gehäuseresonanzen, bereichsweise mit Dämmwatte und Schaumstoff gefüllt. Die Aluminiumplatte hat eine Dicke von 2 mm und ist an ihren Rändern durch doppelte Abkantungen versteift. Die indirekte Befestigung über Schaumstoffstreifen, und Bohrungen mit Spiel stellt eine entkoppelnde, dämpfende und spannungsfreie Lagerung dar, siehe Abbildung 2.

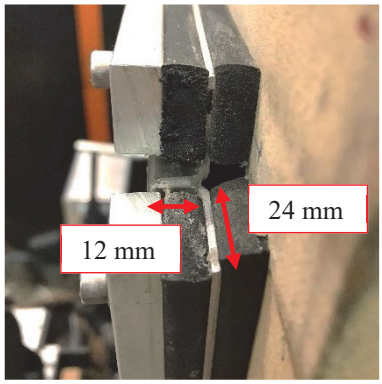

Abbildung 2: Befestigung der Platte

Die Platte wird nacheinander mit folgenden Vorrichtungen angeregt:

1) Schwingerreger: Brüel&Kjaer (B&K) Typ 4809 (max. 45 N, bewegte Masse 0,06 kg) auf einem Gleittisch, Ankopplung über einen 90 mm langen und 2 mm durchmessenden Stößel mit Quetschverschraubung, Kraftaufnehmer B&K 8230-001 (**Ref1**) und geklebter Aufschlagkappe, siehe Abbildung 3, *Position* unten rechts mit 125 mm Abstand zum Rand der Platte,

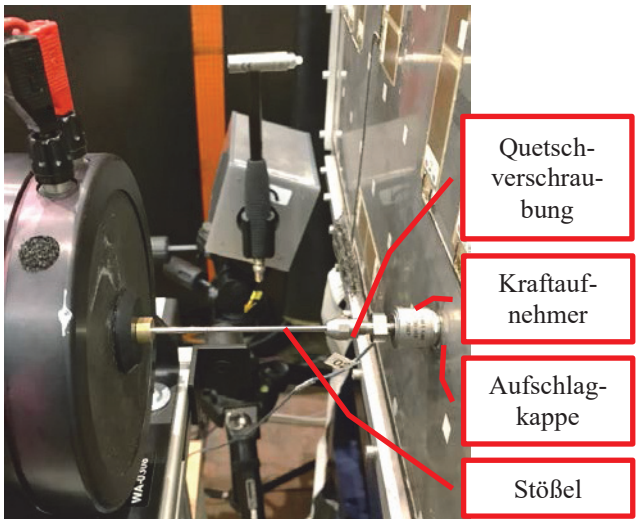

Abbildung 3 im Vordergrund: montierter Schwingerreger mit Stößel, Quetschverschraubung und Kraftaufnehmer, **im Hintergrund:** automatischer Modalhammer

2) Inertial-Schwingerreger: Kendrion Kuhnke AS1101/E3 (Gesamtgewicht 0,173 kg) mit Gewindeadapter an **Ref1** geschraubt, siehe Abbildung 4,

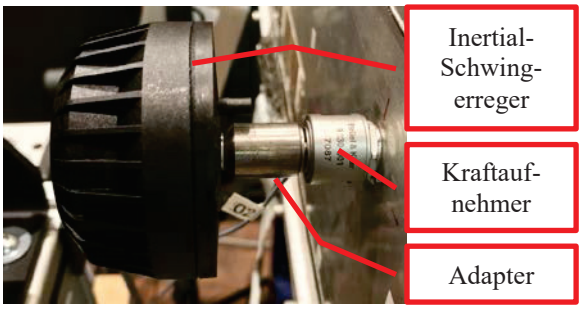

Abbildung 4: Montierter Inertial-Schwingerreger mit Adapter und Kraftaufnehmer

3) Skalierbarer, automatischer Modalhammer: NV-Tech-Design SAM2 (für Kräfte bis 2.200 N) mit Impulshammer PCB 086C03 (**Ref3**), *Position* unten links mit 125 mm Abstand zum Rand,

4) Lautsprecher: 6“-Chassis eighteensound 6ND430 in Eigenbaugehäuse (B*H*T in mm) 220*220*160, *Position* innen gegenüber 1) in 50 mm Abstand mit der Membran vor der Platte und mit Mikrofon B&K 4188-A-021 (**Ref4**) in 25 mm Abstand mittig vor der Membran.

Ein Polytec Laser-Scanning-Vibrometer PSV-500 Xtra misst berührungslos in einem unregelmäßigen Raster (389 Scanpunkte, im Mittel 30 mm Punktabstand, siehe Abbildung 5) die Vibration der Platte senkrecht zur Oberfläche als Schwinggeschwindigkeit. Der kleinste Abstand zwischen Scankopf und Platte beträgt 1030 mm.

Abbildung 5: Versuchsaufbau mit Scanpunkten und Vernetzung

Um abzusichern, dass bei allen Messungen ein vergleichbarer Arbeitspunkt vorliegt, wird ein Beschleunigungsaufnehmer B&K 4517 (**Ref2)** verwendet, *Position* innen oben links, mit 125 mm Abstand zum Rand. Leistungsverstärker für 1), 2) und 4) ist ein B&K 2718.

Der Frequenzbereich wird nach oben begrenzt durch die erwartete Frequenz $f_{m,n}$ der Eigenform (EF) mit drei Schwingungsbäuchen in horizontaler (m) und vertikaler (n) Richtung. Diese beträgt, mit den Parametern Breite $a = 0{,}6\ m$, Höhe $b = 0{,}45\ m$, Elastizitätsmodul E $= 69.000$ N/mm^2, Dicke $h = 2\ mm$, Dichte $\rho = 2.700\ kg/m^3$, Querkontraktionszahl $\mu = 0{,}35$, berechnet nach Formel (1), siehe [2], $f_{3,3} = 339{,}87\ Hz$.

$$f_{m,n} = \frac{\pi}{2}\left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2\right]\sqrt{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)\rho h}} \quad [Hz] \quad (1).$$

Durchführung

Es wird, wenn nicht anders erwähnt, eine FFT-Analyse mit einer Frequenzspanne von 20 Hz bis 400 Hz (Abtastrate 1 kHz) und einer Frequenzauflösung von 0,25 Hz durchgeführt. Dabei werden die Real- und Imaginärteile separat (komplex) über 3 Rechteck-gefensterte Blöcke mit 75 % Überlappung gemittelt. Das Spektrum der Beschleunigung von **Ref2** wird, für eine bessere Vergleichbarkeit zu den Amplituden der Vibrometermessungen, zur Schwinggeschwindigkeit aufintegriert und beträgt in den ausgeprägtesten Resonanzbereichen jeweils ca. 1 mm/s.

Die ausgewerteten Messungen haben folgende Bezeichnungen:

M1: Schwingerreger auf Gleittisch, Pseudo-Rauschen mit ca. 1 N Effektivwert an **Ref1**.
M2: Inertial-Schwingerreger, Pseudo-Rauschen mit 1 N Effektivwert an **Ref1**.
M3: Lautsprecher, Pseudo-Rauschen mit 30 Pa Effektivwert an **Ref4**.
M4: Hammer mit Hartkunststoffkappe, im Zeitverlauf 40 N Spitzenwert an **Ref3**. Keine Mittelung.
M5: Hammer mit Hartkunststoffkappe, im Zeitverlauf 40 N Spitzenwert an **Ref3**. Messung im Zeitbereich (4 kHz Abtastrate und 2500 Messpunkte), keine Mittelung.

Auswertung

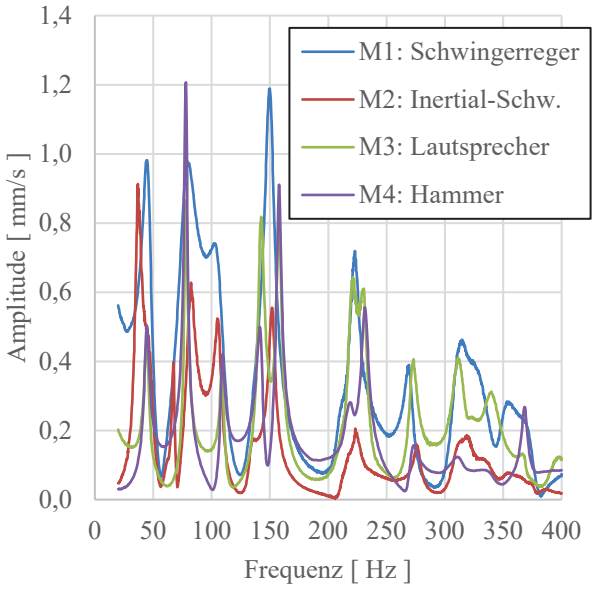

Abbildung 6: Vergleich der gemittelten Spektren am Referenzaufnehmer Ref2 für die Messungen 1 bis 4

Abbildung 6 zeigt, für die Messungen 1 bis 4, die gemittelten Spektren an **Ref2**, also die in der jeweiligen Frequenzlinie über alle Punkte gemittelten Amplituden. Diese und somit die Arbeitspunkte liegen in einer vergleichbaren Größenordnung.

Die Unterschiede der Versuchsreihen M1 bis M4 sind in Abbildung 7 bis Abbildung 10 erkennbar. Hier sind für Frequenzspannen von jeweils ca. 100 Hz die über alle Messpunkte gemittelten Amplituden der Übertragungsfunktionen zwischen der mit dem Vibrometer gemessenen Geschwindigkeit auf der Platte und der jeweiligen Referenz dargestellt. Zusätzlich die Lage der, nach Formel (1) berechneten, Frequenzen (Ber.). Bei EF 1,1 kann mit dem Lautsprecher (M3) nicht gut angeregt werden. Die gemessenen Spitzen liegen hier alle ca. 7 Hz höher als die berechnete Eigenfrequenz. EF 2,1 ist klar erkennbar, Messungen und Rechnung weichen um maximal 2 Hz voneinander ab, wie auch bei EF 1,2. Die Spitzen bei EF 3,1 liegen 4 Hz tiefer und bei EF 2,2 7 Hz höher als berechnet.

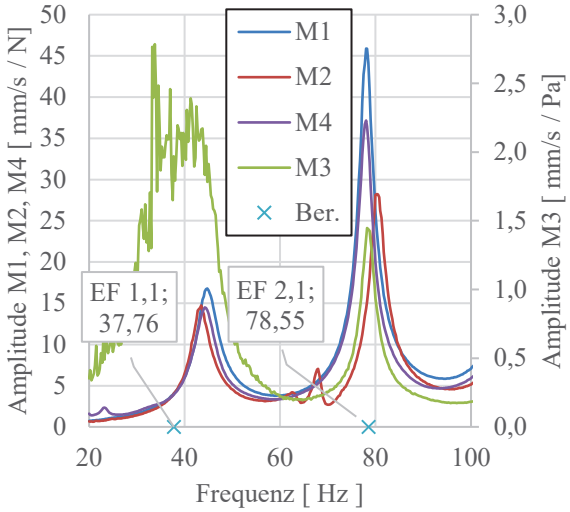

Abbildung 7: Vergleich der über alle Messpunkte gemittelten Übertragungsfunktion zwischen Vibrometer und jeweiliger Referenz für die Messungen 1 bis 4, 20 Hz bis 100 Hz, zusätzlich Lage der berechneten Eigenfrequenzen

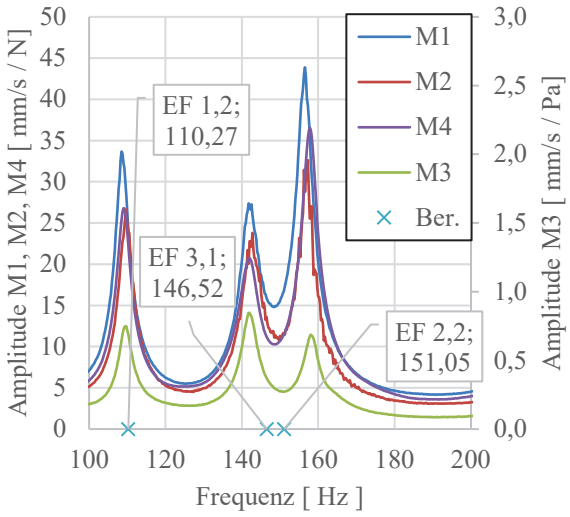

Abbildung 8: Vergleich 100 Hz bis 200 Hz

Zwischen 200 Hz und 250 Hz sind die Spitzen nicht klar voneinander trennbar. EF 4,1 kann nur bei M3 beobachtet werden und liegt bei 220,5 Hz statt wie berechnet bei 241,69 Hz, siehe Abbildung 11 a). Bei der stärksten Überhöhung schwingt die Platte in EF 3,2, beispielhaft in Abbildung 11 b). Mit dem Inertial-Schwingerreger in M2 liegt EF 2,3 8 Hz höher als bei den anderen, siehe Abbildung 11 c). Zwischen 300 Hz und 400 Hz ist, abgesehen von M3, eine Überhöhung bei ca. 368 Hz ausgeprägt, die jedoch das Schwingverhalten von EF 3,3 aufweist, siehe Abbildung 11 d).

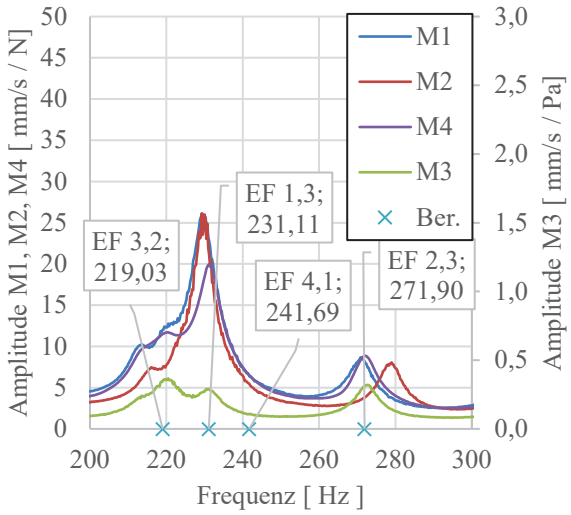

Abbildung 9: Vergleich 200 Hz bis 300 Hz

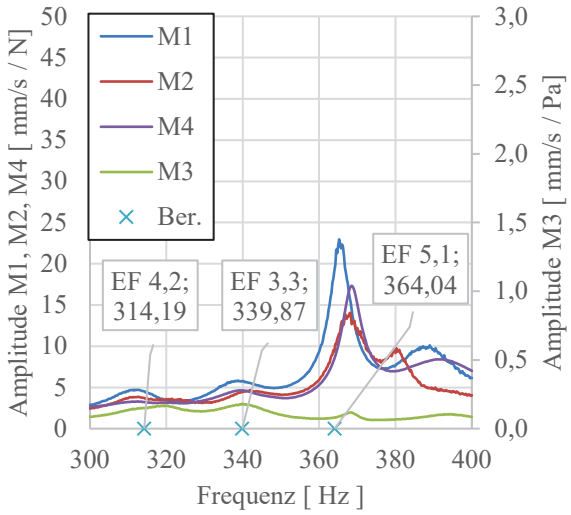

Abbildung 10: Vergleich 300 Hz bis 400 Hz

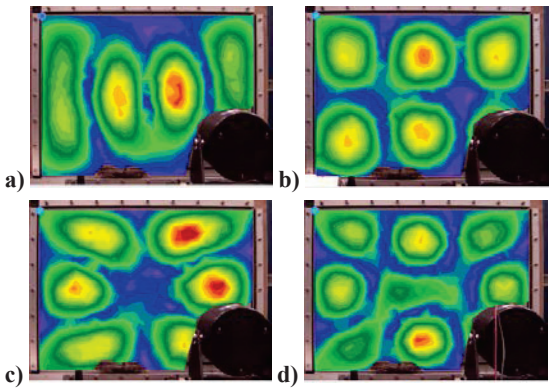

Abbildung 11: a) M3 zeigt bei 220,5 Hz EF 4,1. b) M4 zeigt bei 231,25 Hz EF 3,2. c) M2 zeigt bei 279 Hz EF 2,3. d) M1 zeigt bei 368,25 Hz EF 3,3.

Die gemittelten Spektren der verwendeten Referenzen sind in Abbildung 12 als Pegel dargestellt. Bei M1 und M2 ist der Sensor fest zwischen Erreger und Platte montiert, das Spektrum ist daher stark vom Schwingverhalten der Struktur beeinflusst. Bei M3 sieht man das Übertragungsverhalten des Lautsprechers, der bei tiefen Frequenzen einen geringen Wirkungsgrad aufweist. M4 ist praktisch rückwirkungsfrei, jedoch führt die Elastizität der Kunststoffspitze zur Dämpfung hin zu höheren Frequenzen.

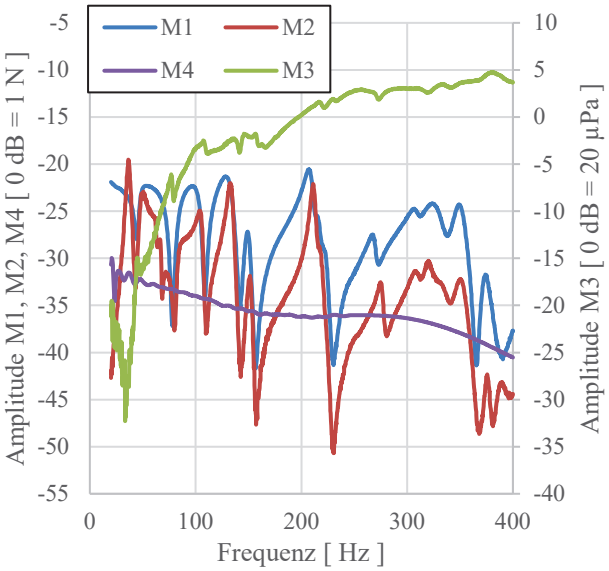

Abbildung 12: Vergleich der gemittelten Spektren der Referenzsignale

Ein typischer Kraft-Zeit-Verlauf, gemessen an **Ref3**, unter Anregung mit dem automatischen Hammer und Messung im Zeitbereich (M5) ist in Abbildung 13 zu sehen. Ein Pre-Trigger lässt den Zeitblock für die Analyse 2 ms vor dem Maximum beginnen. Kleinere Nebenspitzen sind durch den Versuchsaufbau bedingt (u. a. Stativ, Motor, Elastizität des Hammergriffs, siehe [3]).

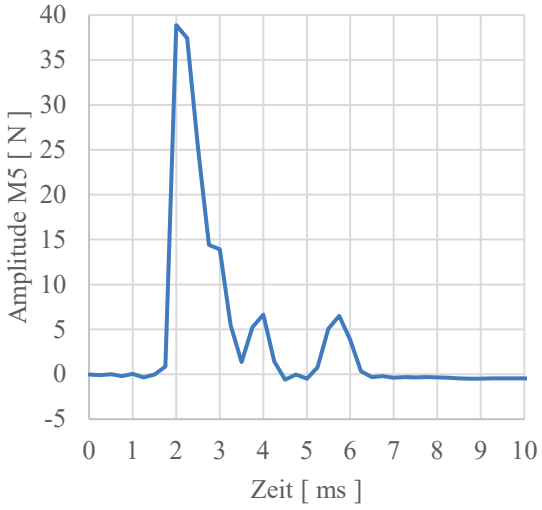

Abbildung 13: Typischer Verlauf der Messung im Zeitbereich bei Anregung mit dem Hammer (M5)

Abbildung 14 zeigt für M5 die Visualisierung der Schwingungsamplitude bei ausgewählten Zeitschritten. Der im linken Bild mit Blautönen dargestellte Bereich zeigt den Anregungsort.

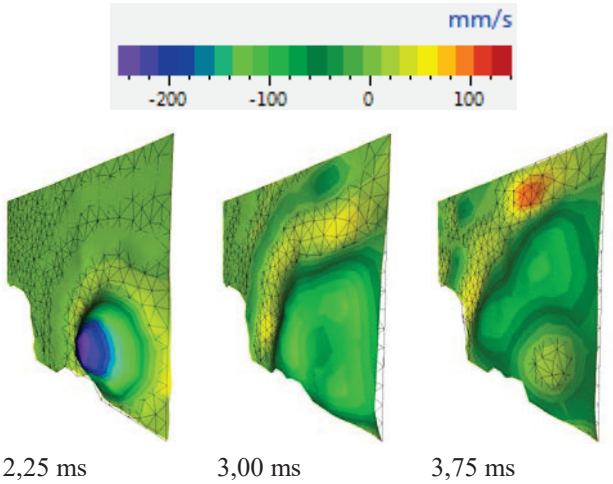

Abbildung 14: Visualisierung einzelner Zeitschritte der Messung im Zeitbereich bei Anregung mit dem Hammer (M5)

Ergebnisse

Die gewählten Werte für Punktabstand und Frequenzauflösung sind zur Erfassung der Eigenformen ausreichend. Die Anregungsorte erlauben es, mit wenigen Ausnahmen, die Struktur in ihren jeweiligen Eigenformen schwingen zu lassen.

Die gemessenen Eigenfrequenzen liegen nur teilweise bei den berechneten. Dies liegt auch an der nicht perfekten Befestigung der Platte und der zusätzlichen Massenbelegung. Die Anregungsvorrichtungen funktionieren weitestgehend zuverlässig, führen jedoch teilweise zu Verschiebungen der Eigenfrequenzen und wirken sich auch bei den Amplituden aus.

Der mit dem Lautsprecher erzeugte Schallpegel ist bei 40 Hz um 20 dB geringer als bei 80 Hz und zur Anregung der ersten Eigenform nicht geeignet.

Zusammenfassung

Die Beispielstruktur kann mit allen betrachteten Vorrichtungen an einem vergleichbaren Betriebspunkt angeregt werden. Ein Laser Scanning Vibrometer ermöglicht die Visualisierung verschiedener Messdaten in der Fläche. Der automatische Modalhammer erlaubt, über die Betriebsschwingformanalyse hinaus, die Untersuchung des Ausschwingverhaltens.

Literatur

[1] Gerner C., Rössel R., Sachau D.: Active noise control with a smart panel. ICSV11 (2004), 499-506

[2] Kollmann F. G., Schösser T. F., Angert, R. Praktische Maschinenakustik. Springer, Heidelberg, 2006

[3] Schaffeld T.: Inbetriebnahme eines skalierbaren, automatischen Modalhammers. Bachelorarbeit, Helmut-Schmidt-Universität, 2019