Untersuchung des Einflusses von Randbedingungen auf die Vergleichbarkeit von numerischer und experimenteller Modalanalyse

Fabian Duvigneau[1], Frederik Hähnlein[1], Christian Daniel[1],
Peter Schrader[2], Elmar Woschke[1], Daniel Juhre[1]
[1] *Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland, Email: fabian.duvigneau@ovgu.de*
[2] *Institut für Mobile Systeme, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland*

Einleitung

Im Rahmen der Bewertung von Simulationsmodellen kommt der Validierung der dynamischen Systemeigenschaften mittels experimenteller Modalanalyse eine sehr große Bedeutung zu. Zentraler Punkt ist dabei der Abgleich der Eigenfrequenzen und der Eigenformen. Im Rahmen dieses Beitrags wird der Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit von numerischer und experimenteller Modalanalyse untersucht. Dafür werden verschiedene Randbedingungen, die aus mechanischer Modellsicht identisch sind, bezüglich der resultierenden Messergebnisse verglichen und hinsichtlich ihrer Eignung für Validierungszwecke bewertet. Als Probekörper dienen eine Rechteckplatte und eine Ölwanne aus Aluminiumguss. Für die experimentelle Modalanalyse wird ein Laser-Scanning-Doppler-Vibrometer verwendet (PSV-400 der Firma Polytec). Die numerischen Analysen werden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) in Abaqus durchgeführt.

Versuchsaufbau

In Abbildung 1 ist der Versuchsaufbau für eine vertikal aufgehängte Rechteckplatte aus Aluminium dargestellt.

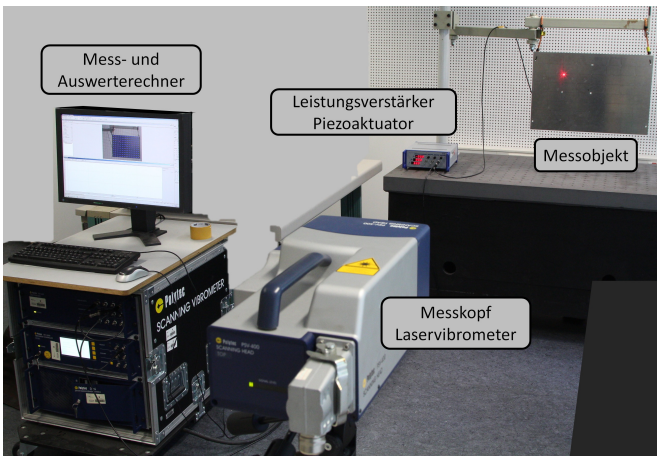

Abbildung 1: Versuchsaufbau mit vertikal aufgehängter Aluminiumplatte, Laser-Scanning-Doppler-Vibrometer, Leistungsverstärker und Messrechner

Im vorliegenden Beitrag wird in allen Untersuchungen zu verschiedenen Lagerungsbedingungen einer Rechteckplatte die selbe Aluminiumplatte verwendet. Diese ist 400 mm breit, 590 mm lang, 3,95 mm dick und weist vier symmetrisch angeordnete Bohrungen auf. Die vertikale Aufhängung ermöglicht eine einfache und flexible Positionierung des Messkopfes des Laser-Scanning-Vibrometers auf einem Stativ. Die Anregung der Rechteckplatte erfolgt über einen piezoelektrischen Flächenaktuator (42x32x0,2 mm) auf der Rückseite, der über einen Leistungsverstärker angesteuert wird (E-663 der Firma PI Ceramic GmbH). Der Aktuator ist so positioniert, dass er möglichst viele Moden anregt. In Abbildung 9 ist die Position des piezoelektrischen Aktuators mit Hilfe der roten Fläche angedeutet. Als Anregungssignal wird weißes Rauschen verwendet, um den gesamten interessierenden Frequenzbereich anzuregen. Die Analyseeinstellungen des Laser-Scanning-Vibrometers wurden anfangs untersucht und anschließend für alle Studien nicht mehr verändert, um einen Einfluss dieser Faktoren bei der Interpretation der Ergebnisse auszuschließen. Es wurden stets drei komplexe Mittelungen verwendet und der Frequenzbereich 10 bis 10.000 Hz mit einer Auflösung von 0,78 Hz erfasst.

Untersuchung verschiedener Lagerungsbedingungen einer Rechteckplatte

Im Rahmen vorangegangener Arbeiten, die sich beispielsweise mit dem speziellen Verhalten quadratischer Platten [1] sowie dem Einfluss von Dämmmaterialien [2] beschäftigten, wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass frei-freie Lagerungsbedingungen für einen Vergleich von Experiment und Simulation besonders gut geeignet sind. Bei der Betriebsschwingungsanalyse eines elektrischen Radnabenmotors im rotierenden System [3] (optische Schwingungsanalyse mittels Laser-Scanning-Vibrometer und Derotator) sind freie Randbedingungen natürlich keine Option, aber bei der experimentellen Schwingungsanalyse von Einzelkomponenten des Radnabenmotors im stehenden System wurde diese Erfahrung bestätigt [3]. In diesem Beitrag soll der Einfluss der Lagerung noch tiefgreifender analysiert werden, da auch in Fachkreisen nicht zweifelsfrei geklärt ist, ob frei-freie oder eingespannte Lagerungsbedingungen vorteilhafter sind, wenn ein Vergleich von experimenteller und numerischer Modalanalyse angestrebt wird.
Als erstes erfolgt in diesem Beitrag die Analyse verschiedener Möglichkeiten der frei-freien Lagerung in vertikal aufgehängter Lage (siehe Abbildung 1). In Abbildung 2 und 3 sind die unterschiedlichen Materialien dargestellt, die für die vertikale Aufhängung untersucht wurden. Für die Aufhängung wurden die bereits vorhandenen, symme-

trisch angeordneten Bohrungen an den Ecken der Aluminiumplatte genutzt. FE-Referenzmodelle wurden sowohl für den Fall mit als auch ohne Bohrungen erstellt. Dabei hat sich gezeigt, dass die Bohrungen keinen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis der Modalanalyse haben. Für die Modellierung der Platte wurden Schalenelemente mit quadratischen Ansatzfunktionen eingesetzt. Die Prognosequalität wurde über Konvergenzanalysen und einen Abgleich mit der analytischen Referenzlösung für eine allseitig gelenkig gelagerte Rechteckplatte abgesichert. Einflüsse schwankender Materialparameter wurden mit Hilfe des numerischen Modells untersucht. Eine Anpassung im Sinne eines Model-Updating war allerdings nicht erforderlich.

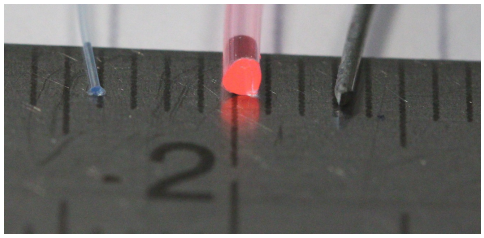

Abbildung 2: Drei verschiedene Materialien für eine freifreie Aufhängung: links dünner Nylonfaden (0,25 mm), in der Mitte dicker Nylonfaden (1,1 mm), rechts verzinkter Stahldraht (0,6 mm)

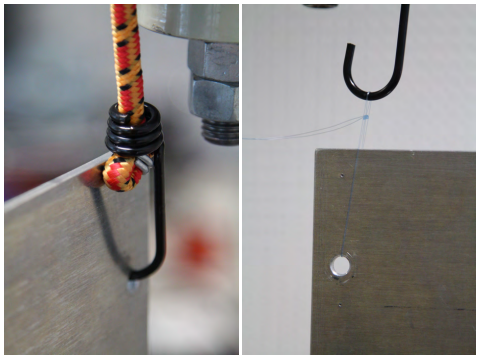

Abbildung 3: Aufhängung mittels Expanderseilen: links mit anliegendem Expander, recht mit einer Kombination aus Expanderseil und Nylonfaden

Bezüglich der Handhabung sind der dickere Nylonfaden und insbesondere die Expanderseile vorteilhaft. Allerdings ist auf der linken Seite von Abbildung 3 zu erkennen, dass das Expanderseil an der Platte anliegt, wenn die vorhandene Bohrung für den Haken genutzt wird. Die experimentellen Analysen haben gezeigt, dass dies im vorliegenden Beispiel zu deutlichen Verschiebungen der Eigenfrequenzen führt (siehe Abbildung 4). Daher war eine Kombination aus Expanderseil und Nylonfaden zwingend erforderlich, die bezüglich der Handhabung immer noch Vorteile gegenüber einer einfachen Fadenaufhängung aufweist. Allerdings hat sich gezeigt, dass die Expanderseile etwas mehr zusätzliche Dämpfung ins System einbringen als die anderen Varianten. Dies gilt es zu beachten, falls im Rahmen der Modalanalyse nicht nur die Eigenfrequenzen und -formen sondern auch die Dämpfung der Struktur bestimmt werden soll.

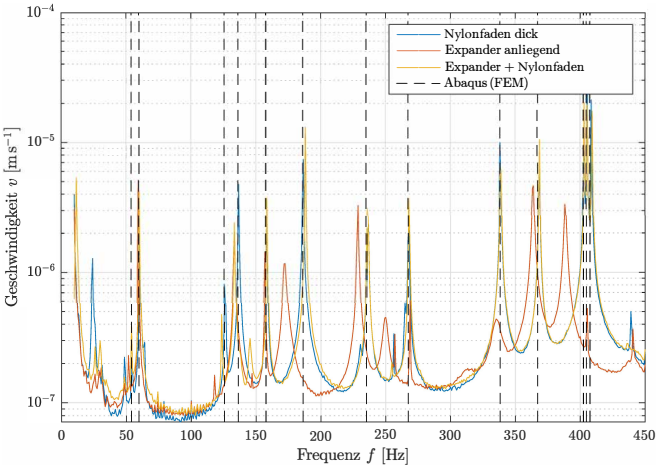

Abbildung 4: Gemitteltes Amplitudenspektrum: Vergleich Nylonfaden (dick) und beide Expandervarianten (Abbildung 3 links und rechts), mit eingezeichneten numerisch bestimmten Eigenfrequenzen

Als weitere Variante der Ausführung frei-freier Randbedingungen wurde die horizontale Lagerung auf Noppenschaum untersucht (siehe Abbildung 5). Demzufolge musste der Messkopf in diesem Fall in ausreichendem Abstand in Normalenrichtung oberhalb des Messobjektes platziert werden. Bei diesem Aufbau wurde untersucht, ob es einen Einfluss hat, wie die zu untersuchende Struktur auf dem Schaum positioniert ist, also wie viel Fläche aufliegt. In Abbildung 5 ist eine Beispielkonfiguration dargestellt.

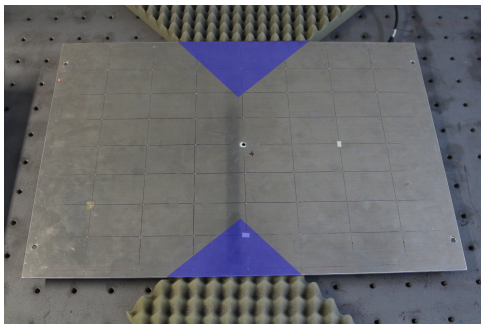

Abbildung 5: Frei-frei gelagerte Rechteckplatte auf Noppenschaum (die Auflageflächen sind blau hervorgehoben und die Anregung erfolgt wieder über den piezoelektrischen Flächenaktuator auf der Plattenrückseite)

Im Rahmen der Untersuchung hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse der vertikalen Aufhängung und der horizontalen Lagerung auf dem Schaum sehr gut bezüglich der Eigenfrequenzen und -formen übereinstimmen (siehe Abbildung 6). Allerdings wird durch den Schaum wieder zusätzliche Dämpfung ins System eingebracht, die umso größer ist, je mehr flächiger Kontakt zwischen Messobjekt und Schaum besteht. Als Extremfall diente in diesem Rahmen die Konfiguration mit umgedrehten Schaum, also den Noppen zum Labortisch anstatt zur Struktur. In Abbildung 6 ist zu erkennen, dass die Dämpfung in diesem Fall so groß ist, dass die Eigenfrequenzen verschoben werden (siehe Frequenzbereich 500-700 Hz) und de-

ren Lage für Frequenzen über 800 Hz nur noch grob abgeschätzt werden kann.

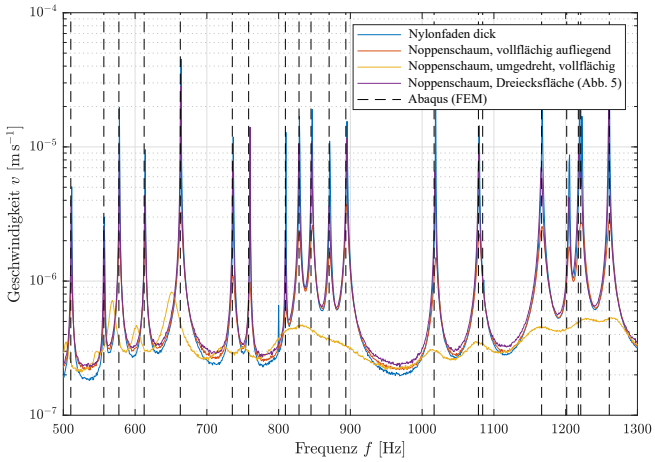

Abbildung 6: Gemitteltes Amplitudenspektrum: Vergleich Nylonfaden (dick) und auf Noppenschaum gelagerte Varianten, mit eingezeichneten numerisch bestimmten Eigenfrequenzen

Für den Vergleich der Eigenformen wird das Modal Assurance Criterion (MAC) herangezogen [4]. In Abbildung 7 ist die resultierende MAC-Matrix der ersten 200 Eigenformen für den Vergleich der frei-freien Lagerung mit dickem Nylonfaden dargestellt. Die Werte nahe Eins auf der Haupdiagonalen, während alle Nebendiagonalen nahezu unbesetzt sind, zeigen die sehr gute Übereinstimmung von numerischer und experimenteller Modalanalyse. Es ist allerdings auch ersichtlich, dass die Übereinstimmung insbesondere für die ersten 75 Eigenformen sehr gut ist und die Abweichungen im höheren Frequenzbereich erwartungsgemäß zunehmen.

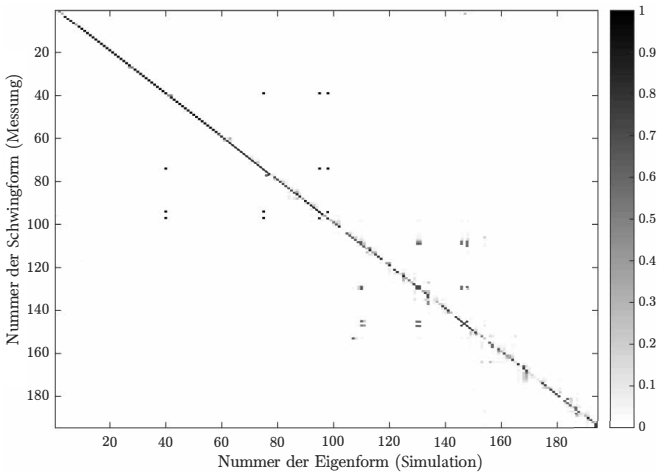

Abbildung 7: MAC-Matrix für einen Vergleich von numerisch und experimentell bestimmten Eigenformen für das Beispiel der frei-freien Lagerung mit dickem Nylonfaden (siehe Abbildung 2)

Zusammenfassend kann für die Varianten der frei-freien Lagerung konstatiert werden, dass eine Aufhängung an Fäden zu wählen ist, wenn die Dämpfung der Struktur ebenfalls ausgewertet werden soll. Sind lediglich die Eigenfrequenzen und Eigenformen von Interesse, kann auf die Lagerung auf Schaum oder auf Expanderseile (ggf. in Kombination mit Nylonfäden) zurückgegriffen werden. Die Übereinstimmung der Simulationsergebnisse und der experimentellen Daten ist im Fall der frei-freien Lagerung sehr gut (ohne jegliches Model-Updating).

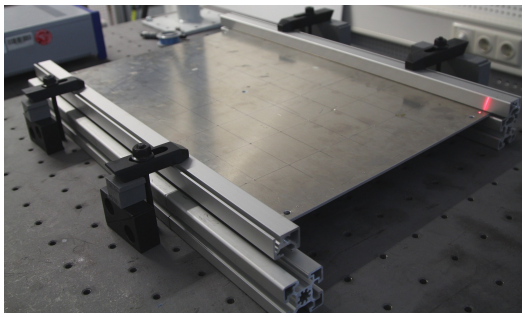

Abbildung 8: Einspannung der Aluminiumplatte an langen Seiten mit Hilfe von Spannbacken und Aluminiumprofilen

In Abbildung 8 ist nun die Realisierung einer Einspannung der Aluminiumplatte dargestellt. Die Anregung und alle Messparameter bleiben identisch. Für die in Abbildung 8 dargestellte Lagerungsvariante konnte trotz intensiver Variation der Modellierung keine Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung erzielt werden. Dies liegt höchstwahrscheinlich daran, dass die zur Einspannung genutzten Aluminiumprofile keine wesentlich höhere Steifigkeit besitzen als die Rechteckplatte selbst. Folglich kann die in Abbildung 8 gewählte Lagerungsart (insbesondere bei punktueller Fixierung wie im vorliegenden Fall) nicht als direkte numerische Randbedingung approximiert werden.
Demzufolge wäre es erforderlich, die Lagerung im Simulationsmodell mit zu berücksichtigen. Um diesen Fall zu testen, wurde eine weitere Konfiguration untersucht, die in Abbildung 9 dargestellt ist. Es handelt sich um eine Eckeneinspannung mittels Stahlwinkeln, die eine um ein Vielfaches größere Dicke als die Aluminiumplatte aufweisen und zudem mit vielen Schrauben fixiert sind. Außerdem liegt diese Einspannung nur in einem kleinen Bereich vor, wodurch die gesamte Einbausituation wesentlich definierter und folglich besser zu modellieren ist.

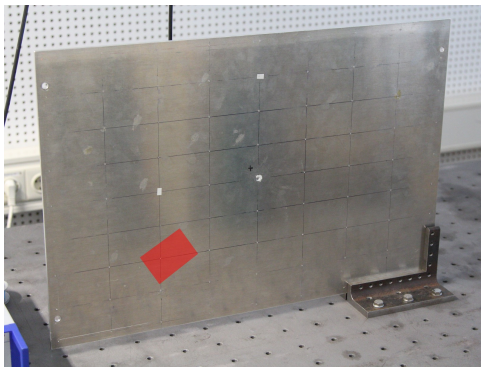

Abbildung 9: Eckeneinspannung der Rechteckplatte mit Stahlwinkeln (Markierung der Position des piezoelektrischen Flächenaktuators auf der Rückseite in rot)

In Abbildung 10 ist das Simulationsmodell der Eckeneinspannung zu sehen. Die Stahlwinkel sind mit Hilfe von quadratischen Tetraederelementen diskretisiert worden und für die Aluminiumplatte werden aus Effizienzgründen weiterhin Schalenelemente mit quadratischen Ansatzfunktionen verwendet. Die Verschiebungsfreiheitsgrade der unterschiedlichen Elementtypen werden im Bereich der Berührungsfläche direkt miteinander gekoppelt.

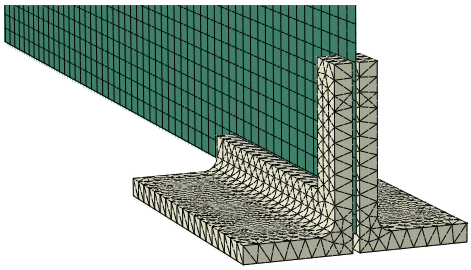

Abbildung 10: Simulationsmodell mit Stahlwinkeln in grau und Aluminiumplatte in grün

Bei den Untersuchungen zur Eckeneinspannung hat sich gezeigt, dass eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Berechnung nur erreicht werden kann, wenn die Stahlwinkel der Lagerung mit modelliert werden. Über Randbedingungen, Federn oder veränderte Steifigkeiten war es nicht möglich, die Lagerungssituation erfolgreich abzubilden. Hinsichtlich des MAC-Kriteriums zeigte sich, dass die Übereinstimmung etwas besser als im Fall der frei-freien Lagerung ist. Im vorliegenden Fall ist dieser Mehrwert aber im Vergleich zum deutlich erhöhten Modellierungsaufwand gering.

Untersuchung einer Ölwanne

Nach den intensiven Studien an der Rechteckplatte wurden die Erkenntnisse an einer Ölwanne als beispielhaftes komplexes Realbauteil überprüft. Die Ölwanne wurde mittels weißem Rauschen über einen elektrodynamischen Schwingungserreger angeregt und sowohl einzeln als auch in der realen Anbausitutation am Zylinderkurbelgehäuse untersucht. Die Erkenntnisse zu diversen Einflussparametern aus den Plattenuntersuchungen konnten bestätigt werden. Darüber hinaus wurde untersucht, ob es möglich ist, die reale Einbausitutation durch eine Einspannung im Modell abzubilden. Die Schwingformen stimmen recht gut überein, die Eigenfrequenzen liegen mit etwa 15 % Abweichung erwartungsgemäß deutlich weiter auseinander als bei den Plattenuntersuchungen und der Untersuchung der Ölwanne als frei-frei gelagerte Einzelkomponente (siehe Abbildung 11). Bei letzterer beträgt der Unterschied zwischen experimentell und numerisch bestimmter Eigenfrequenz weniger als 4 %. Dennoch ist das Ergebnis für die Approximation des frei-frei gelagerten ZKGs als Einspannung für die Ölwanne überraschend gut.

Zusammenfassung

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass es mit beiden Lagerungsbedingungen möglich ist, sehr gute Übereinstimmungen zu erzielen, wenn die Lagerung im Fall einer Einspannung adäquat im Modell berücksichtigt wird. Demzufolge sind Lagerungen wie in Abbildung 8 ungeeignet, wenn die experimentelle Modalanalyse Validierungszwecken dienen soll.

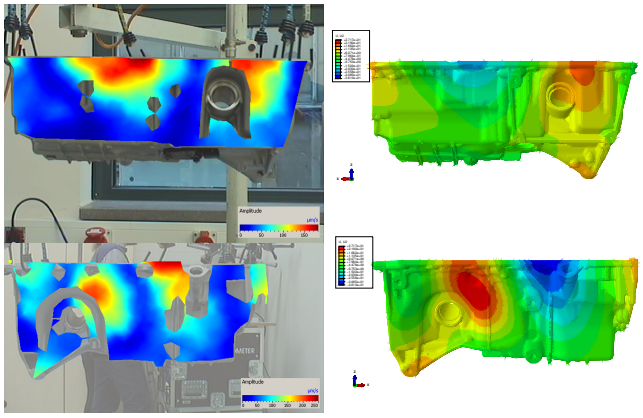

Abbildung 11: Exemplarisches Ergebnis der vierten elastischen Eigenform an den beiden langen Seiten der frei-frei gelagerten Ölwanne: links Experiment, rechts Simulation

Neben dem Vergleich der Übereinstimmung von Experiment und Simulation in Abhängigkeit von den Randbedingungen wurden sowohl für die Rechteckplatten als auch die Ölwanne viele weitere Einflussfaktoren hinsichtlich der resultierenden Messergebnisse untersucht. Aus Platzgründen sei hier bezüglich weiterer Ergebnisse und Informationen auf [5] verwiesen.

Literatur

[1] F. Duvigneau, S. Koch, R. Orszulik, E. Woschke, and U. Gabbert, "About the vibration modes of square plate-like structures," *Technische Mechanik*, vol. 36, pp. 180–189, 2016.

[2] P. Schrader, F. Duvigneau, M. G. Lloret, H. Rottengruber, and U. Gabbert, "Finite element analysis of the acoustic behavior of poroelastic materials based on experimentally determined frequency-dependent material properties," in *28th edition of the Biennial ISMA conference on Noise and Vibration Engineering*, (Leuven), 2018.

[3] F. Duvigneau, S. Koch, C. Daniel, E. Woschke, and U. Gabbert, "Vibration analysis of an electric wheel hub motor at stationary operating points," in *Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics – IFToMM* (K. Cavalca and H. Weber, eds.), Mechanisms and Machine Science, pp. 51–64, Springer, 2019.

[4] M. Pastor, M. Binda, and T. Harčarik, "Modal assurance criterion," *Procedia Engineering*, vol. 48, pp. 543 – 548, 2012. Modelling of Mechanical and Mechatronics Systems.

[5] F. Hähnlein, "Untersuchung des Einflusses von Randbedingungen auf Vergleichbarkeit von numerischer und experimenteller Modalanalyse," Masterarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2019.