



Stefanie Mahringer, BSc

Entwicklung einer Messsoftware für experimentelle Modalanalysen von eindimensionalen Strukturen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuerin

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Katrin Ellermann

Institut für Mechanik

Dipl.-Ing. Marcel Prem, BSc

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Klanner, BSc

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Zunächst gilt mein Dank den Mitarbeitern des Instituts für Mechanik an der Technischen Universität Graz, allen voran dessen Leiterin Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Katrin Ellermann und meinen Betreuern Dipl.-Ing. Marcel Prem, BSc und Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Klanner, BSc für die großartige Zusammenarbeit und die fachliche Kompetenz, die ich jederzeit beanspruchen durfte.

Ganz besonderer Dank gilt auch meiner Familie, die mir nicht nur dieses Studium ermöglichte, sondern mir auch jederzeit Verständnis entgegenbrachte und bei Sorgen und Problemen stets ein offenes Ohr für mich hatte.

Darüber hinaus danke ich meinem Freund, der mir immer unterstützend zur Seite steht und mich auch nach Rückschlägen immer wieder aufzubauen versteht.

Schließlich möchte ich mich noch bei meinen Studienkollegen für die gemeinsame Studienzzeit bedanken. Ihr wart nicht nur bei der Prüfungsvorbereitung immer für mich da, sondern auch beim Feiern danach.

Abstract

The results of modal tests are used to verify parameters of numerical models for vibration simulations. At the Institute of Mechanics an outdated system to perform modal tests exists, and therefore LabVIEW is used to develop state-of-the-art programs to carry out these tests. The functionality of the programs includes the measurement of the necessary sensor signals, the creation of frequency response functions, a modal analysis and the animation of the calculated modes. The testing can be done for different one-dimensional structures. One program is designed to carry out modal tests with a modal hammer, one to excite the structure using a shaker. For the shaker, several possibilities for the excitation signal are implemented. Modal analysis can be carried out using two different methods in order to obtain useful results for different structures. The measurement data are also exported for further use in MATLAB. The frequency response functions, the modal analysis and an animation of the modes are also performed in MATLAB. To verify the programs, comparative measurements are carried out with the existing system. Application notes and other verification options are proposed. The necessary theoretical basis for carrying out such tests is dealt with and operating instructions for the programs are created. This allows members of the institute to independently conduct modal tests.

Kurzfassung

Die Verifizierung von Parametern in numerischen Modellen zur Schwingungsuntersuchung erfolgt durch den Vergleich mit experimentellen Modaltests. Ein am Institut für Mechanik vorhandenes System für die Durchführung von Modaltests entspricht nicht mehr dem Stand der Technik, deshalb werden mit LabVIEW Programme zur Durchführung dieser Tests entwickelt. Die Funktionalität der Programme umfasst die Aufnahme der nötigen Sensorsignale, die Erstellung von Frequenzgangskurven, eine Modalanalyse sowie die Animation der berechneten Moden. Die Testung erfolgt für verschiedene eindimensionale Strukturen. Eines der Programme ist für die Durchführung von Modaltests mit einem Modalhammer konzipiert, ein zweites für die Anregung der Struktur mittels Shaker. Für die Anregung mit dem Shaker sind mehrere Möglichkeiten für das Anregesignal implementiert. Auch die Modalanalyse kann mit zwei unterschiedlichen Methoden durchgeführt werden, um für unterschiedliche Strukturen brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Die Messdaten werden zusätzlich für eine weitere Verwendung in MATLAB exportiert. Die Frequenzgangskurven, die Modalanalyse und eine Animation der Moden sind in MATLAB beispielhaft ausgeführt. Zur Verifizierung der Programme werden Vergleichsmessungen mit dem vorhandenen System durchgeführt und Anwendungshinweise sowie weitere Möglichkeiten zur Verifizierung vorgeschlagen. Die notwendigen theoretischen Grundlagen für die Durchführung solcher Tests werden behandelt und Bedienungsanleitungen für die Programme erstellt. Dadurch soll es am Institut möglich sein, mit dieser Arbeit als Grundlage selbstständig Modaltests durchzuführen.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 8 |
| 1.1 | Aufgabenstellung | 8 |
| 1.2 | Aufbau der Arbeit | 8 |
| 2 | Grundlagen | 10 |
| 2.1 | Der Zweimassenschwinger | 10 |
| 2.1.1 | Das modale Modell | 11 |
| 2.1.2 | Die Frequenzgangsmatrix | 12 |
| 2.2 | Darstellung und Eigenschaften des Frequenzgangs | 15 |
| 2.3 | Bestimmung modaler Parameter | 22 |
| 2.3.1 | SDOF-Methoden | 22 |
| 2.3.2 | MDOF-Methoden | 25 |
| 2.4 | Signalverarbeitung | 27 |
| 2.4.1 | Alias-Effekt (Aliasing) | 27 |
| 2.4.2 | Fouriertransformation | 28 |
| 2.4.3 | Leck-Effekt (Leakage) | 29 |
| 2.4.4 | Auflösung | 31 |
| 2.5 | Anregungsmethoden | 31 |
| 2.5.1 | Stepped Sine (Stufensinus) | 31 |
| 2.5.2 | Zufallssignal (Random oder White Noise) | 31 |
| 2.5.3 | Hammer | 33 |
| 2.5.4 | Chirp (Zirpe) | 33 |
| 3 | Messtechnik und Versuchsaufbau | 35 |
| 3.1 | Versuchsaufbau | 35 |
| 3.1.1 | Impacttest | 35 |
| 3.1.2 | Shakertest | 36 |
| 3.2 | Messgeräte | 37 |
| 3.2.1 | Beschleunigungssensor | 37 |
| 3.2.2 | Modalhammer | 37 |
| 3.2.3 | Shaker | 38 |
| 3.2.4 | Kraftsensor | 39 |
| 3.2.5 | Datenerfassungssystem | 40 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | Messsoftware und Auswertung | 41 |
| 4.1 | Messsoftware | 41 |
| 4.1.1 | Impacttest | 41 |
| 4.1.2 | Programm-Aufbau: Impacttest | 50 |
| 4.1.3 | Shakertest | 53 |
| 4.1.4 | Programm-Aufbau: Shakertest | 55 |
| 4.2 | Auswertung | 58 |
| 4.2.1 | Auswertung Breitband-FRF | 58 |
| 4.2.2 | Auswertung Stepped Sine Daten | 60 |
| 5 | Ergebnisse und Verifikation | 61 |
| 5.1 | Ergebnisse | 61 |
| 5.2 | Verifikation | 66 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 69 |
| A | Betriebsanleitung Impacttest | 71 |
| B | Betriebsanleitung Shakertest | 85 |
| B.1 | Stepped Sine Testing | 94 |
| B.2 | White Noise Testing | 96 |
| C | MATLAB-Codes | 105 |
| C.1 | Broadband FRF Code | 105 |
| C.2 | Stepped Sine FRF Code | 109 |
| | Abbildungsverzeichnis | 113 |
| | Tabellenverzeichnis | 116 |
| | Literatur | 117 |

1 Einleitung

Am Institut für Mechanik wird im Rahmen einer Dissertation die Dynamik von Elektromotoren näher untersucht. Dazu werden unter anderem numerische Simulationen durchgeführt. Um die Eingangsparameter für diese Simulationen zu validieren, sind Modaltests an der Rotorwelle notwendig. Das Wort „Modal“ in Modaltest leitet sich vom englischen Wort *mode* (=Eigenform) ab [10]. Modaltests werden generell durchgeführt, um mathematische Modelle einer Struktur zu erstellen. Ein Hauptanwendungsbereich besteht darin, die gemessenen Daten mit den Ergebnissen aus einem Finite Element Methode Modell oder anderen theoretischen Modellen abzugleichen und diese zu validieren. Dafür sind genaue Werte der Eigenfrequenzen und die Gestalt der Eigenformen notwendig, um die Mode zu identifizieren und die numerisch berechneten Moden zuordnen zu können. Da Dämpfungsparameter nicht aus mathematischen Modellen berechnet werden können, sind Korrelationen hier nicht möglich. Die aus der Messung ermittelten Werte können aber in die Modelle integriert werden, um die Effekte der Dämpfung näherungsweise zu beschreiben [9].

1.1 Aufgabenstellung

Für diese Modaltests wurde bisher ein am Institut verfügbares System von LMS für Modaltests genutzt. Da dieses System noch unter WindowsXP betrieben wird und die Konfiguration und auch die Weiterverwendung der Daten nicht benutzerfreundlich bzw veraltet ist, soll ein neues System erstellt werden. Dabei sollen Messsysteme von National Instruments zum Einsatz kommen. Mit einer auf LabVIEW basierenden Anwendungssoftware sollen eindimensionale Bauteile getestet und die oben genannten Parameter ermittelt werden. Die Daten sollen außerdem für eine weitere Verwendung in MATLAB zugänglich gemacht werden. Zudem sollen zusätzlich zu dem in LMS verfügbaren Modaltest mit Anregung des Bauteils durch einen Modalhammer weitere Anregungsmöglichkeiten durch einen Schwingungsgenerator (Shaker) implementiert werden. Für die Untersuchung der Dynamik der Elektromotoren ist im Zusammenhang mit dieser Arbeit vor allem die Betrachtung der Rotorwelle ausschlaggebend. An dieser sollen im Rahmen der Arbeit Tests für die Ermittlung dieser Parameter durchgeführt werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Ewins [9] nennt 3 wichtige Voraussetzungen für die Durchführung von Modaltests:

- Kenntnis der theoretischen Grundlagen von Modaltests,
- eine genaue Messung der Vibrationen und
- eine realistische und detaillierte Datenanalyse.

In Abschnitt 2.1 wird versucht auf den ersten Punkt einzugehen und die mechanischen Phänomene im Zusammenhang mit Modaltests zu erklären. Die Messung der Vibrationen erfolgt durch die Messung der Anregungskraft und der resultierenden Beschleunigung. Der Messaufbau und die eingesetzte Messtechnik werden in Kapitel 3 und die Grundsätze der Signalverarbeitung in Abschnitt 2.4 erläutert. Verschiedene Versionen von Modaltests und deren Vor- und Nachteile werden in Abschnitt 2.5 diskutiert. Aus den gemessenen Daten wird der Frequenzgang (auch: Frequency Response Function - FRF) erstellt. Aus dieser Kurve lassen sich die gesuchten Parameter bestimmen. Der Abschnitt 2.2 behandelt die wichtigsten Eigenschaften des Frequenzgangs. In Abschnitt 2.3 werden schließlich verschiedene Methoden zur Parameterbestimmung vorgestellt und versucht Anwendungshinweise sowie Vor- und Nachteile der Methoden zu formulieren.

Eine Übersicht der erstellten Programme findet sich in Kapitel 4 und in Kapitel 5 werden die Ergebnisse einzelner Messungen präsentiert und versucht diese durch Vergleichsmessungen zu verifizieren und daraus Anwendungshinweise sowie mögliche Verbesserungen abzuleiten. Die Anhänge beinhalten die Bedienungsanleitungen für die erstellten Programme sowie den Code der MATLAB-Auswertungen.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel widmet sich den physikalischen Grundlagen von Modaltests, den Grundsätzen der Signalverarbeitung, verschiedenen Anregungsmethoden und Darstellungen und Eigenschaften der zuvor ermittelten Funktionen sowie Techniken zur Parameterbestimmung. Sofern nicht anders angegeben, wurde die Literatur von EWINS [9] und AVITABLE [1] für dieses Kapitel herangezogen.

2.1 Der Zweimassenschwinger

In Abbildung 2.1 ist ein Zweimassenschwinger dargestellt, der zur Erläuterung des Frequenzganges verwendet wird. Das System mit zwei Freiheitsgraden (2 Degrees of Freedom (DOF)) besteht aus den Massen m_1 und m_2 und den Federn k_1 , k_2 und k_3 . Abbildung 2.2

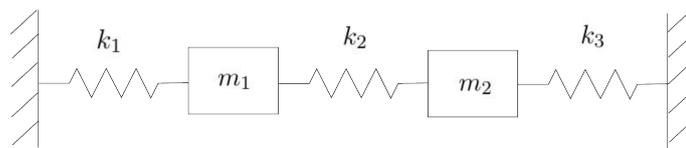


Abbildung 2.1: ungedämpfter Zweimassenschwinger

zeigt den Freischnitt des 2DOF Systems. Darin werden die Federn durch Kräfte ersetzt und Koordinatensysteme festgelegt. Der Weg, der von Masse m_1 zurückgelegt wird, wird mit x_1 bezeichnet, jener von Masse m_2 mit x_2 . Für eine Auslenkung $x_2 > x_1$ ergeben sich

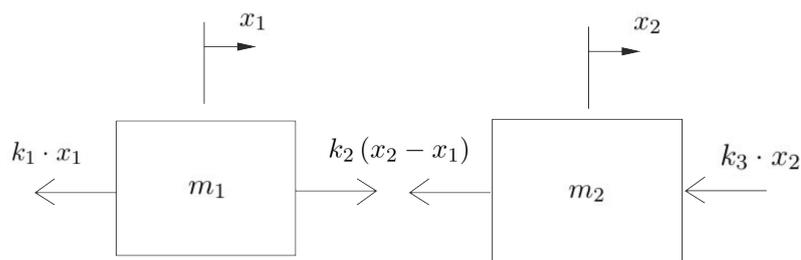


Abbildung 2.2: Freischnitt ungedämpfter Zweimassenschwinger

die Impulssätze der beiden Massen laut Skizze zu

$$m_1 \ddot{x}_1 = -k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1) \quad (2.1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -k_2 (x_2 - x_1) - k_3 x_2 \quad (2.2)$$

mit \ddot{x}_1 und \ddot{x}_2 als Beschleunigungen der beiden Massen. Für eine implizite Darstellung kann auch auf

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = 0 \quad (2.3)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + (k_2 + k_3) x_2 - k_2 x_1 = 0 \quad (2.4)$$

umgeformt werden. Dies lässt sich mit

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

auch als Matrixgleichung oder abgekürzt in der Form

$$\mathbf{M}\ddot{\underline{x}} + \mathbf{K}\underline{x} = \underline{0} \quad (2.6)$$

anschreiben. Für die homogene, lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung führt der Ansatz

$$\underline{x}(t) = \underline{X} e^{i\omega t} \quad (2.7)$$

und seine Ableitungen

$$\dot{\underline{x}}(t) = i\omega \underline{X} e^{i\omega t} \quad (2.8)$$

$$\ddot{\underline{x}}(t) = -\omega^2 \underline{X} e^{i\omega t} \quad (2.9)$$

zum Ziel. Eingesetzt in Gleichung (2.6) ergibt sich

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\underline{X} e^{i\omega t} = \underline{0} \quad (2.10)$$

Für die Lösung dieser Gleichung muss die Determinante des Klammerausdrucks $\det|\bullet|$

$$\det|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0 \quad (2.11)$$

sein. Die Lösung der Determinante liefert die Eigenwerte $\bar{\omega}^2$. Durch Einsetzen dieser Eigenwerte in Gleichung (2.10) werden die zugehörigen Eigenvektoren $\underline{\Psi}$ berechnet. Die Kreisfrequenzen $\bar{\omega}$ geben die ungedämpften Eigenfrequenzen des Systems an und $\underline{\Psi}$ die Eigenformen der einzelnen Moden. Die Eigenwerte $\bar{\omega}^2$ und die Eigenvektoren $\underline{\Psi}$ können jeweils in Matrizen, die Eigenwertmatrix $\bar{\omega}^2$ und die Eigenvektormatrix $\mathbf{\Psi}$, zusammengefasst werden.

2.1.1 Das modale Modell

Das räumliche Modell kann mithilfe der Eigenvektormatrix $\mathbf{\Psi}$ in das Modalmodell

$$\mathbf{\Psi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Psi} = \mathbf{m}_r \quad (2.12)$$

$$\mathbf{\Psi}^T \mathbf{K} \mathbf{\Psi} = \mathbf{k}_r \quad (2.13)$$

transformiert werden. Die modale Massenmatrix \mathbf{m}_r (Diagonalmatrix mit den Einträgen m_r , modale Masse von Mode r) und die modale Steifigkeitsmatrix \mathbf{k}_r (Diagonalmatrix mit den Einträgen k_r , modale Steifigkeit der Mode r) führen auf die Eigenwertmatrix

$$\bar{\omega}_r^2 = \mathbf{m}_r^{-1} \mathbf{k}_r \quad (2.14)$$

Die Eigenvektormatrix Ψ ist abhängig von einem beliebigen Skalierungsfaktor und somit nicht eindeutig bestimmt. Es gibt verschiedene Skalierungsmöglichkeiten, wobei die Massennormierung

$$\Phi = \Psi \mathbf{m}_r^{-\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

klare Vorteile bietet. Die massennormierte Eigenvektormatrix Φ hat die Besonderheiten, dass die Transformation der Massenmatrix in das massennormierte Modalmodell

$$\Phi^T \mathbf{M} \Phi = \mathbf{I} \quad (2.16)$$

die Einheitsmatrix \mathbf{I} ergibt und die der Steifigkeitsmatrix

$$\Phi^T \mathbf{K} \Phi = \bar{\omega}_r^2 \quad (2.17)$$

die Eigenwertmatrix $\bar{\omega}_r^2$.

2.1.2 Die Frequenzgangsmatrix

Wird der Zweimassenschwinger nun harmonisch durch die externen Kräfte $\underline{f}(t)$ angeregt, lautet die Bewegungsgleichung

$$\mathbf{M} \ddot{\underline{x}} + \mathbf{K} \underline{x} = \underline{f}(t) \quad (2.18)$$

Für die Lösung der inhomogenen Differentialgleichung ist ein partikulärer Ansatz erforderlich. Harmonische Anregungen mit der Frequenz Ω sind durch

$$\underline{f}(t) = \underline{F} e^{i\Omega t} \quad (2.19)$$

mit \underline{F} die Amplituden der Anregung gegeben. Für die Auslenkung wird wieder der gleiche Ansatz wie für das homogene System nach Gleichung (2.7) und die Ableitungen nach Gleichungen (2.8) und (2.9) verwendet. Eingesetzt in die Bewegungsgleichung ergibt sich

$$(\mathbf{K} - \Omega^2 \mathbf{M}) \underline{X} e^{i\Omega t} = \underline{F} e^{i\Omega t} \quad (2.20)$$

und auf \underline{X} umgeformt

$$\underline{X} = (\mathbf{K} - \Omega^2 \mathbf{M})^{-1} \underline{F} \quad (2.21)$$

Mit

$$\alpha(\Omega) = (\mathbf{K} - \Omega^2 \mathbf{M})^{-1} \quad (2.22)$$

als Frequenzgangsmatrix (auch Frequency Response Function - FRF) ergibt sich

$$\underline{X} = \underline{\alpha}(\Omega)\underline{F} \quad (2.23)$$

Die Inverse der Frequenzgangsmatrix

$$\underline{\alpha}(\omega)^{-1} = \underline{K} - \Omega^2 \underline{M} \quad (2.24)$$

wird nun mit der massennormierten Eigenvektormatrix Φ modal transformiert zu

$$\Phi^T(\underline{K} - \Omega^2 \underline{M})\Phi = \Phi^T \underline{\alpha}(\Omega)^{-1} \Phi \quad (2.25)$$

Mit den Gleichungen (2.16) und (2.17) ergibt sich Gleichung (2.25) zu

$$(\bar{\omega}_r^2 - \Omega^2) = \Phi^T \underline{\alpha}(\Omega)^{-1} \Phi \quad (2.26)$$

was auf die allgemeine Form der Frequenzgangsmatrix

$$\underline{\alpha}(\Omega) = \Phi(\bar{\omega}_r^2 - \Omega^2)^{-1} \Phi^T \quad (2.27)$$

umgeformt werden kann. In dieser Form können direkt die ungedämpften Eigenfrequenzen $\bar{\omega}_r$ herausgelesen werden. Auch ist aus dieser Gleichung ersichtlich, dass die Frequenzgangsmatrix

$$\alpha_{jk} = (X_j/F_k) = \alpha_{kj} = (X_k/F_j) \quad (2.28)$$

symmetrisch ist. Die Elemente der Frequenzgangsmatrix lassen sich somit anschreiben als

$$\alpha_{jk}(\Omega) = \sum_{r=1}^N \frac{(\Phi_{jr})(\Phi_{kr})}{\bar{\omega}_r^2 - \Omega^2} = \sum_{r=1}^N \frac{(\Psi_{jr})(\Psi_{kr})}{m_r(\bar{\omega}_r^2 - \Omega^2)} \quad (2.29)$$

oder

$$\alpha_{jk}(\Omega) = \sum_{r=1}^N \frac{{}_r A_{jk}}{\bar{\omega}_r^2 - \Omega^2} \quad (2.30)$$

wobei ${}_r A_{jk}$ die modale Konstante und N die Anzahl der Freiheitsgrade (entspricht der Anzahl der Moden) bezeichnet. Der Frequenzgang lässt sich somit aus den Anteilen der einzelnen Moden zusammensetzen. Die modale Konstante bestimmt dabei, wie groß bei momentaner Frequenz Ω der Anteil der Eigenmode mit der Eigenfrequenz $\bar{\omega}_r$ am gesamten Frequenzgang ist. In einem weiteren Schritt soll nun die Dämpfung berücksichtigt werden. Dabei existieren verschiedene Ansätze. In der Strukturdynamik wird oft aus Vereinfachungsgründen eine der Steifigkeits- und der Massenmatrix proportionale Dämpfung verwendet. Allgemein kann die Dämpfung zwar nicht als proportional betrachtet werden, für kleine Dämpfungen, wie sie in den meisten mechanischen Strukturen auftreten, ist diese Näherung jedoch zulässig. Dieses Modell wird als Rayleighdämpfung bezeichnet und

lautet

$$\mathbf{D} = \beta \mathbf{K} + \gamma \mathbf{M} \quad (2.31)$$

mit den Konstanten β und γ . Die Bewegungsgleichung des Systems für harmonische Anregung (Gleichung (2.19)) lautet dann,

$$(\mathbf{K} + i\Omega \mathbf{D} - \Omega^2 \mathbf{M}) \underline{X} e^{i\Omega t} = \underline{F} e^{i\Omega t} \quad (2.32)$$

wobei für die Auslenkung $\underline{x}(t)$ und ihre Ableitungen die Gleichungen (2.7) - (2.9) eingesetzt worden sind. Für das homogene System ergeben sich die komplexen Eigenfrequenzen

$$\omega_r^2 = \bar{\omega}_r^2 \sqrt{1 - \zeta_r^2} \quad (2.33)$$

mit den ungedämpften Eigenfrequenzen

$$\bar{\omega}_r^2 = \frac{k_r}{m_r} \quad (2.34)$$

und dem Dämpfungsgrad

$$\zeta_r = \frac{\beta \bar{\omega}_r}{2} + \frac{\gamma}{2\bar{\omega}_r} \quad (2.35)$$

wobei die Eigenvektoren identisch mit jenen des ungedämpften Systems sind. Aus der Bewegungsgleichung (2.32) lässt sich die Frequenzgangsmatrix

$$\boldsymbol{\alpha}(\Omega) = (\mathbf{K} + i\Omega \mathbf{D} - \Omega^2 \mathbf{M})^{-1} \quad (2.36)$$

für das proportional gedämpfte System bestimmen. Diese kann mit der oben gezeigten Transformation in das modale Modell auf

$$\boldsymbol{\alpha}(\Omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\underline{\Psi}_r^T \underline{\Psi}_r}{(k_r - \Omega^2 m_r) + 2i\zeta_r k_r \frac{\Omega}{\bar{\omega}_r}} \quad (2.37)$$

umgeformt werden. Durch die Transformation auf die massennormierte Eigenvektormatrix ergibt sich die allgemeine Form der Frequenzgangsmatrix

$$\boldsymbol{\alpha}(\Omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\underline{\Phi}_r^T \underline{\Phi}_r}{(\bar{\omega}_r^2 - \Omega^2) + 2i\zeta_r \Omega \bar{\omega}_r} \quad (2.38)$$

oder in Indexschreibweise als

$$\alpha_{jk}(\Omega) = \sum_{r=1}^N \frac{{}_r A_{jk}}{\bar{\omega}_r^2 - \Omega^2 + 2i\zeta_r \Omega \bar{\omega}_r} \quad (2.39)$$

in welcher die ungedämpften Eigenfrequenzen und diesmal zusätzlich die Dämpfung direkt ersichtlich sind.

2.2 Darstellung und Eigenschaften des Frequenzgangs

Bis jetzt wurde die Frequenzgangsmatrix immer als Rezeptanz (Receptance) $\alpha(\Omega) = \mathbf{X}/\mathbf{F}$ definiert. Es sind aber verschiedene Definitionen üblich. Neben der Auslenkung X können auch die Geschwindigkeit V oder die Beschleunigung A der Masse verwendet werden, je nachdem welche Größe gemessen wird. Die Größen sind über die Ableitungen gekoppelt und dadurch ergeben sich folgende Zusammenhänge für die Frequenzgangsmatrix in Geschwindigkeitsform, genannt Admittanz (Mobility) Y

$$\mathbf{Y}(\Omega) = i\Omega\alpha(\Omega) \quad (2.40)$$

und in Beschleunigungsform, genannt Akzeleranz (Accelerance oder Inertance)

$$\mathbf{A}(\Omega) = i\Omega\mathbf{Y}(\Omega) \quad (2.41)$$

$$= -\Omega^2\alpha(\Omega) \quad (2.42)$$

Allgemein kann die Frequenzgangsmatrix auch immer mit $\mathbf{H}(\Omega)$ bezeichnet werden, unabhängig davon welche Darstellungsform vorliegt. Da im experimentellen Teil dieser Arbeit die Bewegung des Systems mit einem Beschleunigungsaufnehmer erfasst wird, wird im Folgenden meist auch darauf Bezug genommen. Die FRF ist eine frequenzabhängige Funktion, daher müssen die Messdaten fouriertransformiert werden. Durch diese Transformation entsteht eine komplexe Funktion, welche von der Frequenz abhängig ist. In Abschnitt 2.4.2 wird die Fouriertransformation kurz erläutert. Die Funktionen sind also von drei Variablen (Frequenz und die beiden Teile der komplexen Funktion) abhängig und können daher nicht vollständig in einem einzigen zweidimensionalen Graph dargestellt werden. Die dreidimensionale Ansicht eines SDOF-Systems ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Gebräuchlich sind

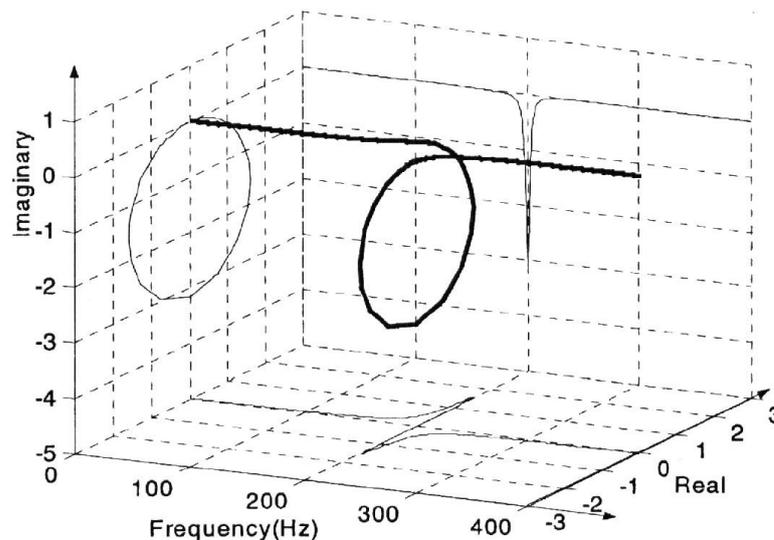


Abbildung 2.3: Dreidimensionale Darstellung einer FRF mit einem Freiheitsgrad [9]

alle drei Seitenansichten (Real- vs. Imaginärteil, Realteil vs. Frequenz und Imaginärteil

vs. Frequenz) von Abbildung 2.3, sowie auch die Darstellungen von Betrag (Amplitude) und Phase über der Frequenz. Eine Resonanz stellt sich in den unterschiedlichen Graphen nach Abbildung 2.4 wie folgt dar: Die Amplitude der FRF erreicht ein Maximum, der Ima-

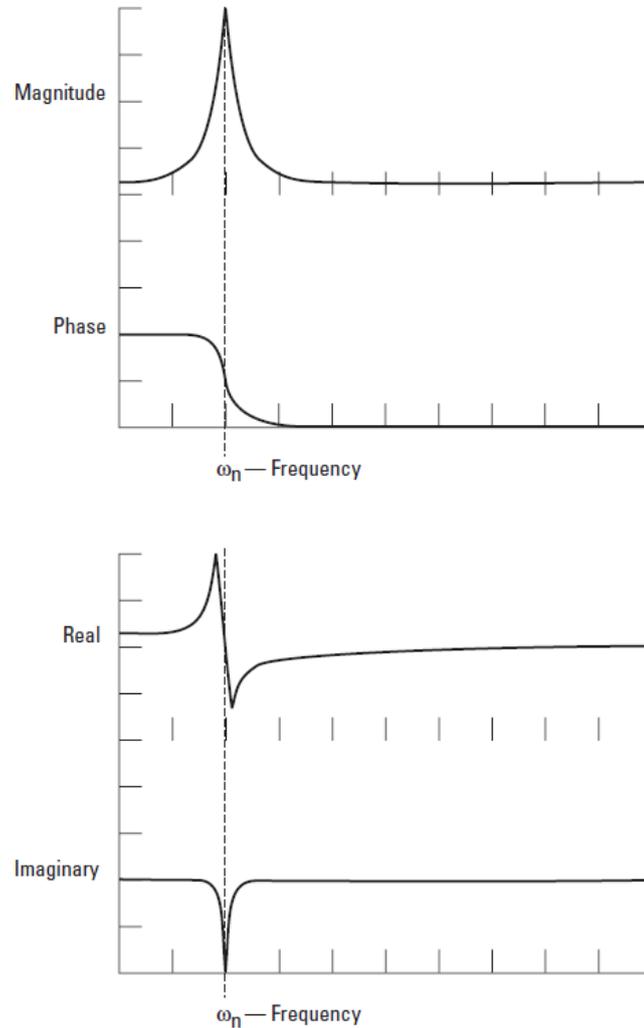


Abbildung 2.4: Amplituden- und Phasengang (oben) und Real- und Imaginärteil (unten) einer FRF [17]

ginärteil der FRF erreicht entweder ein Maximum oder Minimum, der Realteil der FRF ist Null und die Antwort des System ist um 90° versetzt zur Anregung [17]. In Abbildung 2.5 ist ein Nyquistplot (Real- vs. Imaginärteil) eines SDOF Systems dargestellt. Eine Resonanz stellt dabei näherungsweise einen Kreis dar. Je nach Art der Dämpfung und FRF ergibt sich für je eine Definition der FRF ein exakter Kreis. Für viskose Dämpfung nimmt die Admittanz und für strukturelle Dämpfung die Rezeptanz eine exakte Kreisform an. Die Frequenzwerte der FRF können den einzelnen Punkten im Diagramm zugeteilt werden. Diese Darstellung hebt den Bereich der Resonanz hervor, da Punkte weiter weg vom Resonanzbereich sehr nah aneinander liegen. In Abbildung 2.6 ist die Amplitude einer SDOF-FRF abgebildet, welche zeigt, dass die FRF in drei Abschnitte unterteilt werden

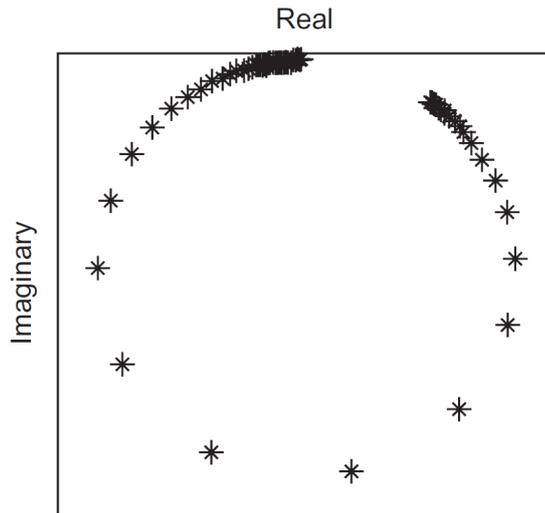


Abbildung 2.5: Nyquist Plot einer Rezeptanz FRF [12]

kann. Der erste Abschnitt ist eine Gerade, welche durch die Steifigkeit des Systems be-

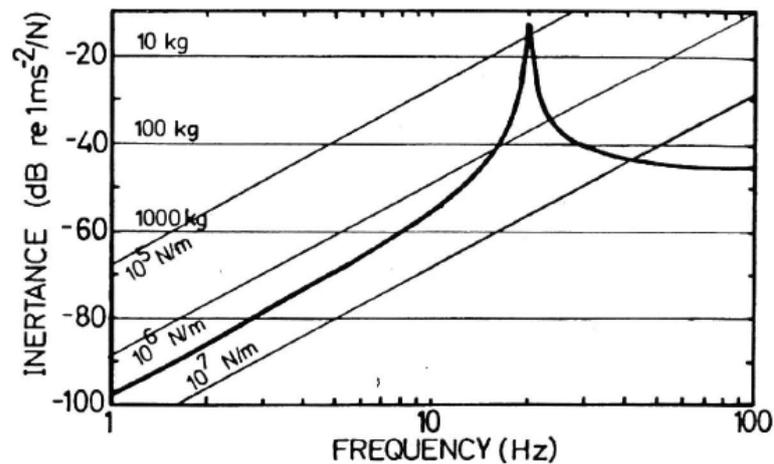


Abbildung 2.6: SDOF Akzeleranz FRF [9]

stimmt wird. Der zweite Abschnitt ist die Spitze, welche die Eigenfrequenz kennzeichnet und deren Ausprägung von der Dämpfung bestimmt wird und der dritte Abschnitt ist wiederum eine Gerade, welche durch die Masse des Systems bestimmt wird. Für steigende Werte der Dämpfung nimmt der Ausschlag der Amplitude ab und der Phasensprung wird weniger abrupt, siehe Abbildung 2.7. Wie bereits in Gleichung (2.38) ersichtlich, kann der Frequenzgang eines MDOF-Systems aus den Anteilen der einzelnen Moden zusammengesetzt werden. Dies lässt sich auch in der graphischen Darstellung der Amplitude der FRF in Abbildung 2.8 visualisieren. Für die Erklärung der Eigenschaften der Frequenzgangsmatrix wird das Modell eines einseitig eingespannten Trägers verwendet. Die drei Messpositionen sind in Abbildung 2.9 gekennzeichnet. Um die gesamte Frequenzgangsmatrix zu bestimmen sind 9 Messungen notwendig. Im Folgenden zeigt Abbildung 2.10 wie die Matrix aufgebaut wird. Um die FRF h_{32} zu bestimmen, wird der Träger an Position

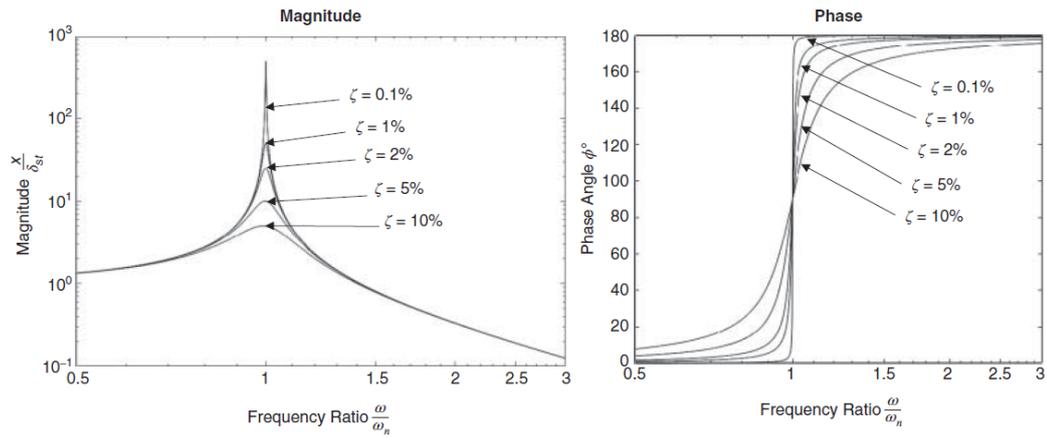


Abbildung 2.7: FRF mit Variation der Dämpfung [1]

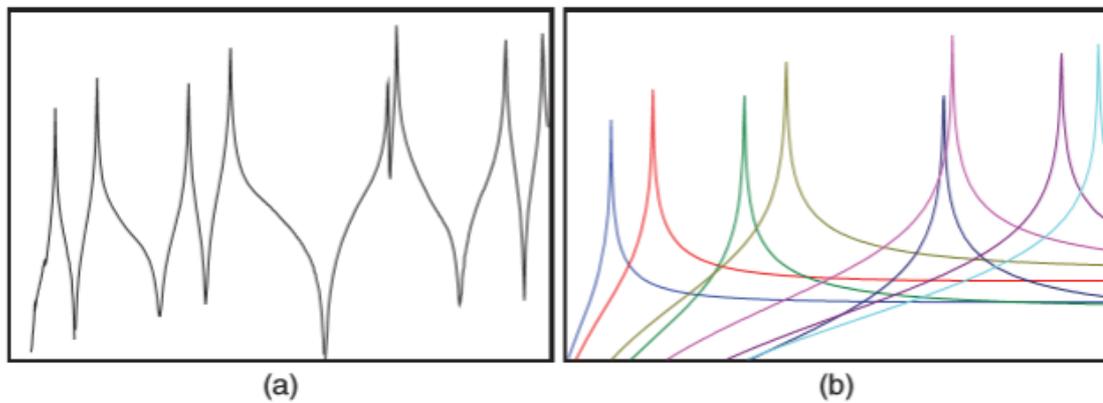


Abbildung 2.8: FRF eines MDOF Systems (a) Gesamt-FRF (b) Anteil der einzelnen Moden an der Gesamt-FRF [1]



Abbildung 2.9: einseitig eingespannter Träger [1]

zwei angeregt und die Bewegung des Balkens an Position drei bestimmt. Die dargestellten Kurven an den Matrixeinträgen sind die Amplituden der FRFs über der Frequenz. Im Abschnitt 2.1.2 wurde gezeigt, dass die Frequenzgangmatrix symmetrisch ist, was auch in Abbildung 2.10 sichtbar ist. Wird an der gleichen Position gemessen, wie angeregt wird, handelt es sich um Punkt-FRFs. Bei unterschiedlichen Punkten spricht man von Transfer-FRFs. Die FRFs h_{11} , h_{22} und h_{33} sind somit Punkt-FRFs und weisen Besonderheiten auf:

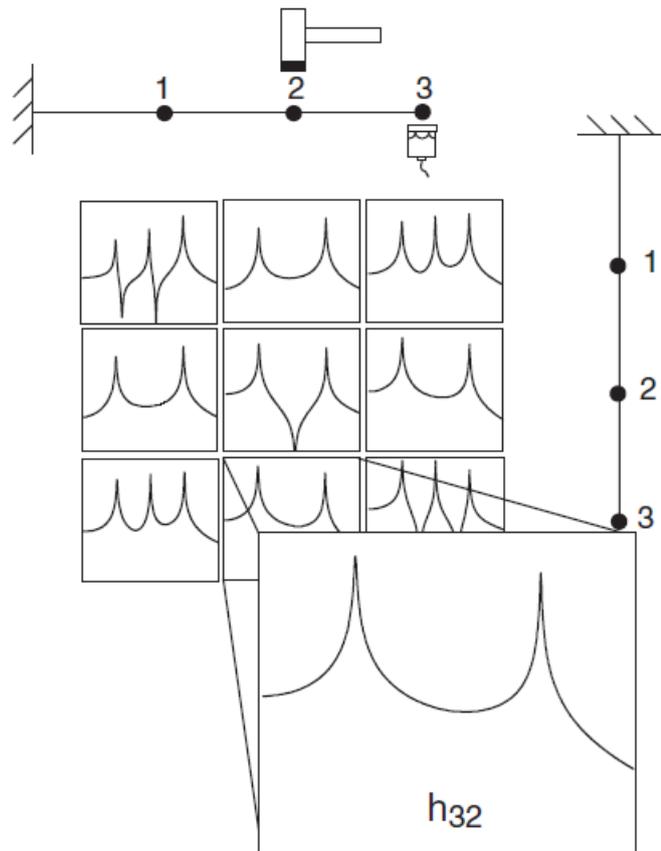


Abbildung 2.10: Aufbau der FRF-Matrix [1]

- alle Resonanzen (die Spitzen) sind durch Antiresonanzen (negative Spitzen) getrennt
- die Phase sinkt bei einer Resonanz um 180° und steigt bei einer Antiresonanz um 180°
- die Spitzen im Imaginärteil der FRF zeigen in die gleiche Richtung

Die erste Besonderheit kann am 2DOF System gezeigt werden. Die Gleichungen für die FRFs können angeschrieben werden mit

$$\alpha_{11}(\Omega) = \frac{0.5}{\omega_1^2 - \Omega^2} + \frac{0.5}{\omega_2^2 - \Omega^2} \quad (2.43)$$

für die Punkt-FRF und

$$\alpha_{21}(\Omega) = \frac{0.5}{\omega_1^2 - \Omega^2} - \frac{0.5}{\omega_2^2 - \Omega^2} \quad (2.44)$$

für die Transfer-FRF. Der einzige Unterschied der beiden FRFs ist das Vorzeichen der modalen Konstante der zweiten Mode. Abbildung 2.11 (oben) zeigt die Punkt-FRF und Abbildung 2.11 (unten) die Transfer-FRF. Bei Betrachtung von Gleichung (2.43) ist ersichtlich, dass für $\Omega < \omega_1$ beide Terme der Gleichung positiv sind und sich somit addieren.

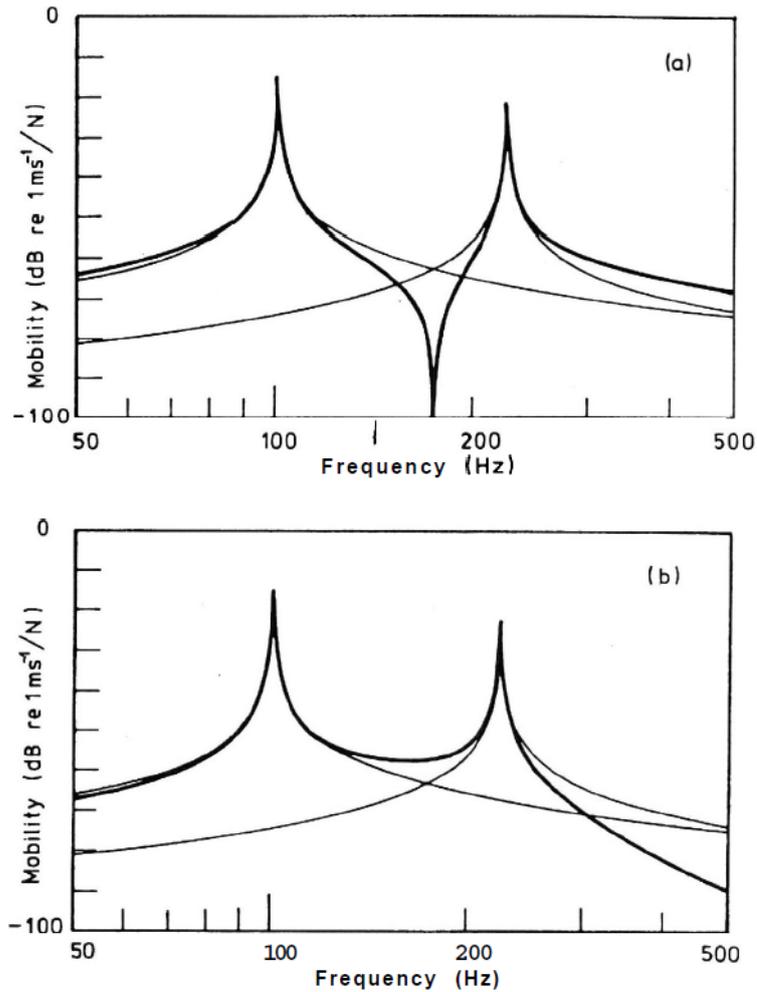


Abbildung 2.11: Admittanz Punkt-FRF (oben) und Transfer-FRF (unten) [9]

Da die Skala in Abbildung 2.11 logarithmisch ist, ist die Summenkurve nur knapp über der Einzelkurve von Mode 1. Für $\Omega > \omega_2$ haben beide Terme auch das gleiche Vorzeichen und addieren sich somit ebenfalls. Für $\omega_1 < \Omega < \omega_2$ ist der erste Term negativ und der zweite positiv, somit subtrahieren sie sich. Im Schnittpunkt sind sie gleich groß mit unterschiedlichem Vorzeichen, die Summenkurve wird somit Null und es entsteht eine sogenannte Antimode. Da in Gleichung (2.44) die Vorzeichen der modalen Konstanten unterschiedlich sind, ergibt sich ein umgekehrtes Bild. Die Summenkurve vor der ersten Mode liegt knapp unter der Einzelkurve von Mode 1 und die Summenkurve nach der zweiten Mode nimmt deutlich ab, da die Einflüsse beider Moden ähnlich groß sind. Zwischen den beiden Moden haben beide Terme das gleiche Vorzeichen und die Kurven addieren sich somit. Im Schnittpunkt der Kurven ist die Summenkurve somit genau zweimal die Einzelkurve (logarithmische Darstellung!). Für die Transfer-FRF ergibt sich dadurch zwischen den beiden Moden nur ein Minimum und keine Antimode. Diese Betrachtung lässt sich auf Systeme mit beliebig vielen Freiheitsgraden erweitern. Zwei aufeinanderfolgende Moden, deren modale Konstanten das gleiche Vorzeichen haben, haben inzwischen eine

Antimode, anderenfalls nicht. Die modalen Konstanten berechnen sich über Produkte aus Eigenvektorelementen, ein Element aus dem Punkt der angeregt wird und eines aus dem Punkt an dem die Bewegung gemessen wird. Für die Punkt-FRF bedeutet dies die Quadrierung eines Elements. Dadurch werden alle modalen Konstanten positiv und zwischen allen Moden befinden sich Antimoden. Für Transfer-FRFs gilt, wenn sich Anregungs- und Reaktionspunkt in Phase bewegen, haben sie das selbe Vorzeichen und eine Antimode dazwischen, anderenfalls ein Minimum. Generell gilt, je weiter Anregungs- und Reaktionspunkt entfernt sind, desto wahrscheinlicher bewegen sie sich nicht in Phase und ihre Vorzeichen sind somit unterschiedlich. Somit weisen FRFs von weiter entfernten Punkten generell weniger Antimoden auf.

Aus dem Imaginärteil der Frequenzgangsmatrix lässt sich die Eigenform der Moden ablesen und die Besonderheit für Punkt-FRFs erkennen. Abbildung 2.12 zeigt schematisch die Vorgehensweise zum Ablesen der Eigenform für die ersten beiden Moden. Für die erste

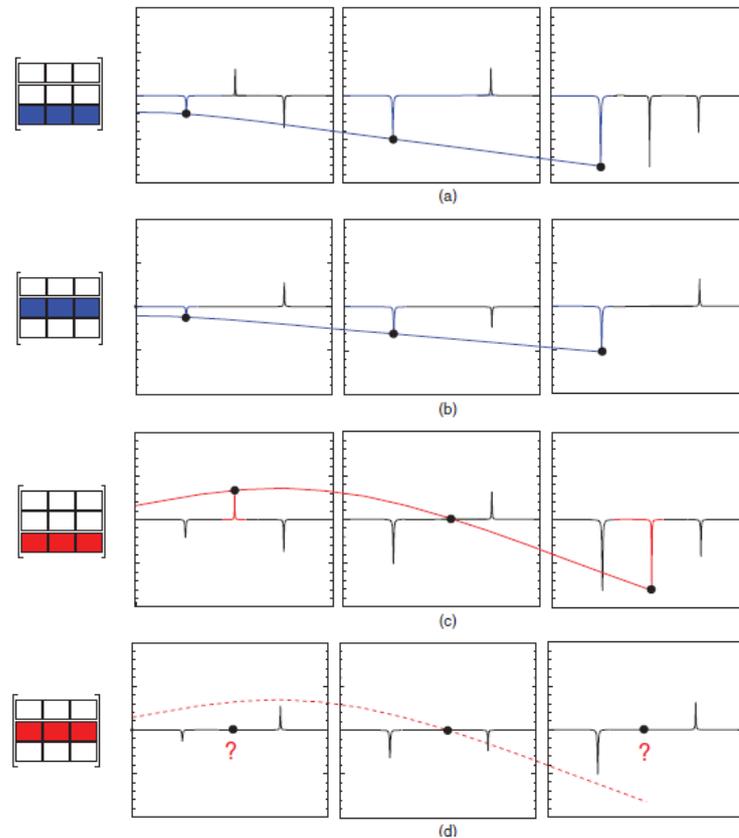


Abbildung 2.12: Eigenformen aus dem Imaginärteil der Frequenzgangsmatrix [1]

Eigenform werden in jeder Zeile der Frequenzgangsmatrix jeweils die Spitzen der ersten Mode im Imaginärteil beobachtet. Für die erste Mode werden hier die 3. (in Abbildung 2.12 (a)) und die 2. Zeile (in Abbildung 2.12 (b)) der Matrix verwendet. Aus beiden Zeilen ergibt sich qualitativ das gleiche Ergebnis. In Abbildung 2.12 (c) wird die 3. Zeile der Matrix verwendet, um die Eigenform der 2. Mode darzustellen. Im Gegensatz dazu ist die Eigenform der 2. Mode in der 2. Zeile der Matrix in Abbildung 2.12 (d) nicht sichtbar. Die

Erklärung hierfür liefert Abbildung 2.12 (c). Am Messpunkt 2 befindet sich ein Knoten, das heißt eine Nullstelle der Eigenform von Mode 2. Das bedeutet, dass die 2. Mode an der Position 2 weder bei Anregung an diesem Punkt (Spalte 2) noch bei Messung der Bewegung an diesem Punkt (Zeile 2) sichtbar wird. Wie oben bereits schematisch gezeigt, ist zur Bestimmung der Eigenform einer Mode nur eine Zeile bzw. eine Spalte der Frequenzgangsmatrix notwendig. Nachfolgend soll nun dieser Zusammenhang auch mathematisch veranschaulicht werden. Nach Gleichung (2.38) ist die modale Konstante

$${}_r A_{jk} = (\Phi_{jr})(\Phi_{kr}). \quad (2.45)$$

Die Matrixelemente dieser Multiplikation ergeben sich somit zu

$$(\underline{\Phi}_r)(\underline{\Phi}_r^T) = \begin{bmatrix} (\Phi_{1r})(\Phi_{1r}) & (\Phi_{1r})(\Phi_{2r}) & \dots & (\Phi_{1r})(\Phi_{nr}) \\ (\Phi_{2r})(\Phi_{1r}) & (\Phi_{2r})(\Phi_{2r}) & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ (\Phi_{nr})(\Phi_{1r}) & & \dots & (\Phi_{nr})(\Phi_{nr}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\Phi_{1r})(\underline{\Phi}_r^T) \\ (\Phi_{2r})(\underline{\Phi}_r^T) \\ \vdots \\ (\Phi_{nr})(\underline{\Phi}_r^T) \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Wenn nun die erste Spalte der Matrix betrachtet wird, zeigt sich, dass Φ_{1r} nur ein Skalierungsfaktor ist und die Eigenform durch den Spaltenvektor $\underline{\Phi}_r$ beschrieben wird. Bei Betrachtung der ersten Zeile der Matrix kann wiederum Φ_{1r} als Skalierungsfaktor betrachtet werden und die Eigenform lässt sich durch den Zeilenvektor $\underline{\Phi}_r^T$ beschreiben. Somit ist zur Bestimmung der Eigenformen nur eine Zeile/Spalte der modalen Matrix erforderlich.

2.3 Bestimmung modaler Parameter

Um das modale Modell aus einer experimentellen Analyse vollständig zu bestimmen, sind für alle Moden die Bestimmung der Eigenfrequenz, der Dämpfung sowie der Eigenform notwendig. Vor allem für die Bestimmung der Eigenfrequenzen und der Dämpfungen existieren verschiedene Ansätze, von denen einige in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt werden.

2.3.1 SDOF-Methoden

SDOF in diesem Zusammenhang bedeutet nicht, dass die Systeme nur einen Freiheitsgrad besitzen, sondern, dass in einem MDOF System jede Mode einzeln betrachtet wird. Alle Moden im Frequenzbereich werden im Gegensatz zu MDOF-Verfahren sequentiell anstatt simultan analysiert. Limitationen dieses Ansatzes bestehen darin, dass Moden mit nah beieinander liegenden Eigenfrequenzen nur mit großem Aufwand getrennt betrachtet werden können. Die Tatsache, dass das Verhalten eines Systems in der Nähe einer Resonanz von einer einzigen Mode dominiert wird, kann mathematisch mit Gleichung (2.39) formuliert

werden. Diese Gleichung kann ohne Vereinfachung zu

$$\alpha_{jk}(\Omega) = \frac{{}_r A_{jk}}{\bar{\omega}_r^2 - \Omega^2 + i\zeta_r \Omega \bar{\omega}_r} + \sum_{s=1 \neq r}^N \frac{{}_s A_{jk}}{\bar{\omega}_s^2 - \Omega^2 + i\zeta_s \Omega \bar{\omega}_s}. \quad (2.47)$$

umgeformt werden. Die SDOF Annahme besagt, dass der zweite Term näherungsweise unabhängig von der Frequenz ist und somit als Konstante ${}_r B_{jk}$ approximiert werden kann. Die FRF Gleichung kann somit vereinfacht werden zu

$$\alpha_{jk}(\Omega)_{\Omega \simeq \omega_r} \cong \frac{{}_r A_{jk}}{\bar{\omega}_r^2 - \Omega^2 + i\zeta_r \Omega \bar{\omega}_r} + {}_r B_{jk}. \quad (2.48)$$

Dieser Ansatz besagt nicht, dass die anderen Moden keinen Einfluss haben und vernachlässigbar sind, nur dass ihr Gesamteffekt näherungsweise als Konstante modelliert werden kann. Es existieren verschiedene Verfahren, die diesen grundsätzlichen Ansatz verwenden. In dieser Arbeit sollen "Peak Picking" und "Circle Fitting" vorgestellt werden.

Peak Picking

Diese Methode stellt die einfachste dar. Es wird angenommen, dass die gesamte FRF an der Resonanzstelle nur von einer Mode abhängt und Effekte anderer Moden ignoriert werden können. Die Dämpfung muss einerseits groß genug sein, dass akkurate Messungen der Resonanz möglich sind und darf andererseits nicht zu groß sein, damit sich die Moden nicht gegenseitig beeinflussen. Der höchste Punkt eines Peaks in der FRF Kurve wird als Eigenfrequenz angenommen. In Abbildung 2.13 ist die Vorgehensweise zur Berechnung der Werte ω_a und ω_b dargestellt. Sie stellen die zugehörigen Frequenzen zum Maximalwert der FRF $\alpha(\omega_r)$ durch $\sqrt{2}$ dividiert dar. Die Dämpfung ist

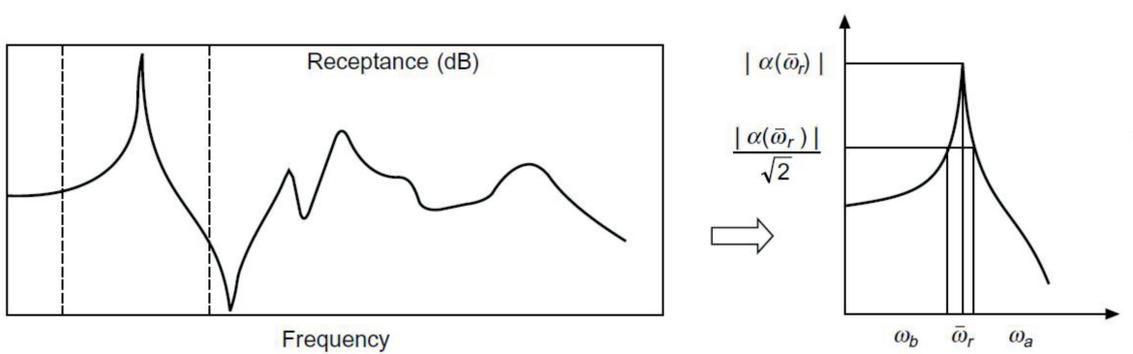


Abbildung 2.13: Peak Picking Methode [12]

$$\zeta_r = \frac{\omega_a^2 - \omega_b^2}{2\bar{\omega}_r^2} \cong \frac{\Delta\omega}{\bar{\omega}_r} \quad (2.49)$$

und die modale Konstante

$$A_r = |\alpha(\bar{\omega}_r)| \bar{\omega}_r^2 \zeta_r. \quad (2.50)$$

Die ermittelten Werte hängen sehr stark von der Genauigkeit des Maximalamplitudenwerts ab. In kommerziellen Programmen wird diese Methode aufgrund dieser Schwächen und der Verfügbarkeit von genaueren Methoden nicht mehr verwendet. Für das Grundverständnis und auch um Startwerte für bessere Methoden zu finden, kann Peak Picking dennoch sehr hilfreich sein.

Circle Fitting

In Abbildung 2.5 ist ersichtlich, dass ein Nyquist Graph (Darstellung von Real- vs. Imaginärteil) einer SDOF-FRF kreisähnliche Kurven und unter Umständen einen exakten Kreis erzeugt. Diese Tatsache bildet die Grundlage dieses Verfahrens. Mit den Annahmen, dass es sich um ein leicht gedämpftes System handelt und für die Dämpfungsberechnung die Half-Power-Points ω_a und ω_b für $\theta_a = \theta_b = 90^\circ$ verwendet werden, kann die Dämpfung nach

$$\zeta_r = \frac{\omega_a - \omega_b}{\bar{\omega}_r} \quad (2.51)$$

bestimmt werden. Abbildung 2.14 zeigt die Zusammenhänge der Größen θ_a und ω_a sowie θ_b und ω_b . Der Betrag der modalen Konstante $|{}_r A_{jk}|$ lässt sich aus dem Zusammenhang

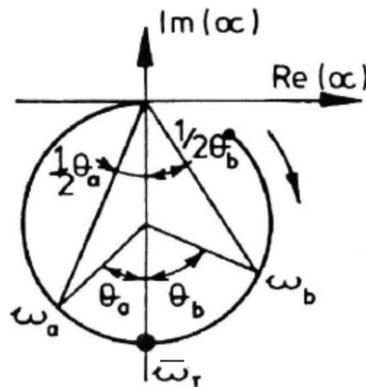


Abbildung 2.14: Nyquist Graph zur Bestimmung der modalen Parameter [9]

$${}_r D_{jk} = \frac{|{}_r A_{jk}|}{\bar{\omega}_r^2 \zeta_r} \quad (2.52)$$

berechnen, wobei ${}_r D_{jk}$ dem Durchmesser des Kreises entspricht. Das Argument der modalen Konstante entspricht der Verdrehung des Kreises und die Verschiebung des Kreises aus dem Nullpunkt entspricht dem Einfluss der anderen Moden ${}_r B_{jk}$ nach Gleichung (2.48). Die Verdrehung und Verschiebung des Kreises ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Da auch diese Methode eine SDOF Methode ist, treffen auch auf diese die eingangs erwähnten Schwächen zu.

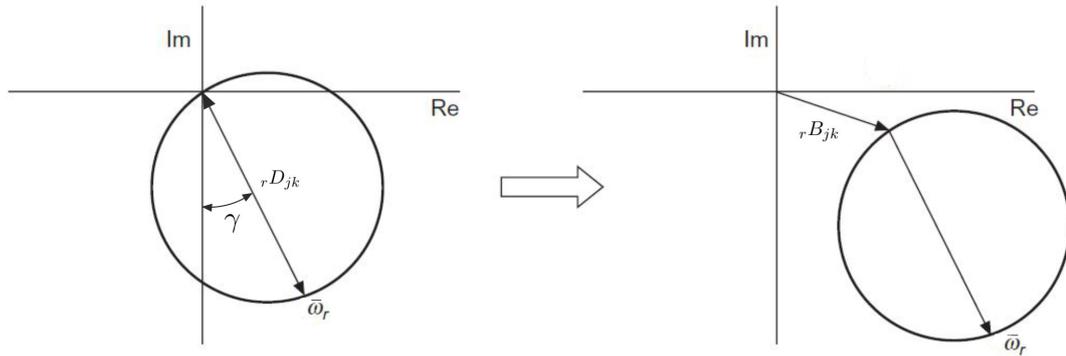


Abbildung 2.15: Verdrehung und Verschiebung im Nyquist Graph [12] (modifiziert)

2.3.2 MDOF-Methoden

Mit MDOF Methoden ist es möglich, mehrere Moden gleichzeitig zu berechnen. Auch die Einschränkung, dass Moden nicht nah beieinander liegen dürfen, ist hier nicht gegeben. Moderne Modal Analysis Programme arbeiten aus diesen Gründen fast ausschließlich mit MDOF Algorithmen.

Least Squares Complex Exponential (LSCE)

Die Least Squares Complex Exponential Methode arbeitet im Zeitbereich mit der gedämpften, exponentiell abnehmenden sinusförmigen Antwort auf eine Anregung. Von den mit der FFT in den Frequenzbereich transformierten FRFs wird der zu analysierende Teil mittels inverser Fouriertransformation (IFT) in den Zeitbereich rücktransformiert. Die Rücktransformierte wird Impuls Response Function (IRF) genannt. Der Prozess der IFT ist in Abbildung 2.16 dargestellt. In der rücktransformierten Impulse Response Function

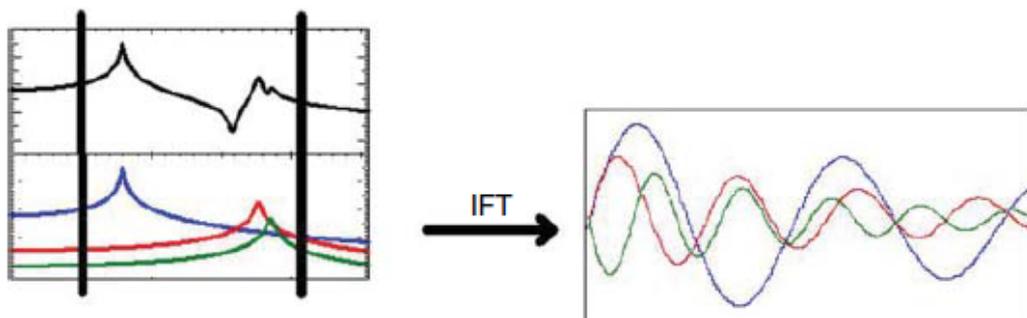


Abbildung 2.16: Rücktransformation mittels IFT von FRF zu IRF [1]

(IRF)

$$h(t_n) = \sum_{r=1}^N c_r e^{\lambda_r t_n} + c_r^* e^{\lambda_r^* t_n} = \sum_{r=1}^{2N} c_r e^{\lambda_r t_n} \quad (2.53)$$

stellt jeder Summand einen der oben dargestellten transformierten, exponentiell abnehmenden Schwingungsverläufe dar, welcher als Produkt der zeitunabhängigen Größe c_r und der zeitabhängigen, komplexen Exponentialfunktion $e^{\lambda_r t}$ formuliert wird. Die Residuen c_r sind lokale Größen und abhängig von Anregung und Antwort des Systems, die komplexen Exponentialfunktionen sind globale Größen und hängen von den komplexen Eigenwerten λ_r des Systems ab. Nach Prony's Methode kann der Einfluss der lokalen Größen von jenem der globalen Größen getrennt werden, sodass die Pole des Systems λ durch das Polynom

$$\alpha_0 + \alpha_1 z_r + \alpha_2 z_r^2 + \dots + \alpha_{2L} z_r^{2N} = \sum_{n=0}^{2N} \alpha_n z_r^n = 0 \quad (2.54)$$

bestimmt werden können. Durch die Diskretisierung wurde t_n durch $n \cdot \Delta t$ ersetzt und dann $e^{\lambda_r \Delta t}$ mit z_r substituiert. α_n sind die Polynomkoeffizienten, die aus den Impulse Response Functions mit

$$\sum_{n=0}^{2N} \alpha_n h_n = 0 \quad (2.55)$$

bestimmt werden können, wobei $h_n = h(t_n)$ entspricht. Gleichung (2.55) kann für unterschiedliche Datenpunkte $h_n, h_{n+1}, \dots, h_{n+2N}$ ausgewertet werden und durch Überlappung mit den jeweils vorherigen Datenpunkten kann ein überbestimmtes Gleichungssystem generiert werden, aus welchem die Polynomkoeffizienten α über einen Least-Square Ansatz bestimmt werden. Mit den Polynomkoeffizienten lässt sich nun z_r aus Gleichung (2.54) bestimmen und durch Rücksubstitution erhält man die komplexen Pole λ_r des Systems. Mit einem Startwert für die Anzahl der Freiheitsgrade im betrachteten Frequenzspektrum startet die Analyse und modale Parameter werden berechnet. Eine mit diesen berechneten Daten regenerierte FRF wird mit der originalen FRF verglichen und die Abweichung berechnet. Die Anzahl der Freiheitsgrade wird dann variiert und die Abweichung minimiert. Diese Methode neigt dazu, dem Modell neben wahren physikalischen Moden auch rechnerische Moden hinzuzufügen. Diese werden durch Messungenauigkeiten hervorgerufen, können aber generell einfach identifiziert werden, da sie eine unüblich hohe Dämpfung besitzen. Die LSCE-Methode kann für ein Breitbandfrequenzspektrum eingesetzt werden, die Stabilität der Methode wird jedoch durch Messrauschen stark beeinträchtigt [2]. Sie ist ideal um leicht gedämpfte Moden zu identifizieren [4].

Frequency Domain Parameter Identification (FDPI)

Die FDPI Methode gehört zu den direkten Methoden, da in einem ersten Schritt die Systemmatrizen identifiziert werden und daraus in einem weiteren Schritt die modalen Parameter berechnet werden. Die Gleichung der Frequenzgangsmatrix für viskose Dämpfung

$$\mathbf{H}(\Omega) = (-\Omega^2 \mathbf{M} + i\Omega \mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} \quad (2.56)$$

mit der Dämpfungsmatrix C wird umgeformt zu

$$(-\Omega^2 I + i\Omega A_1 + A_0)H(\Omega) = B_0 \quad (2.57)$$

mit $A_1 = M^{-1}C$, $A_0 = M^{-1}K$ und $B_0 = M^{-1}$. Die Wertepaare des Frequenzgangs $(H(\Omega), \Omega)$ werden für alle verfügbaren Werte im ausgewählten Frequenzband in das Gleichungssystem eingesetzt. Das Gleichungssystem kann dann für die Matrizen A_1 , A_0 und B_0 gelöst werden, woraus sich die Eigenfrequenzen, Dämpfungen und Residuen ergeben [14]. Die FDPI Methode ist meist nur für schmale Frequenzbereiche stabil [2]. Sie ist ideal um stark gedämpfte Moden in einem schmalen Frequenzband zu identifizieren [4].

2.4 Signalverarbeitung

Durch die Messung wird aus einem kontinuierlichen Signal ein diskretes Signal erzeugt, welches für die Modalanalyse in den Frequenzbereich transformiert wird. Durch die Diskretisierung und die Transformation treten Effekte auf, welche das Ergebnis verfälschen können. Im Folgenden werden diese Effekte, sowie Maßnahmen zu ihrer Vorbeugung beziehungsweise Abhilfe, behandelt. Auch das Prinzip der Fouriertransformation soll hier kurz vorgestellt werden.

2.4.1 Alias-Effekt (Aliasing)

Das Nyquist Shannon Abtasttheorem

$$f_s > 2f_{max} \quad (2.58)$$

besagt, dass die Abtastfrequenz f_s mindestens doppelt so hoch sein muss wie die höchste Frequenz f_{max} , die gemessen werden soll, um diese richtig identifizieren zu können. Frequenzen über der Nyquistfrequenz $f_{nyq} = f_s/2$ tauchen allerdings durch Aliasing als Frequenzen unter der Nyquistfrequenz auf. Abbildung 2.17 stellt das Phänomen des Aliasing im Zeitbereich und Abbildung 2.18 im Frequenzbereich dar. Das korrekte Spektrum ist im

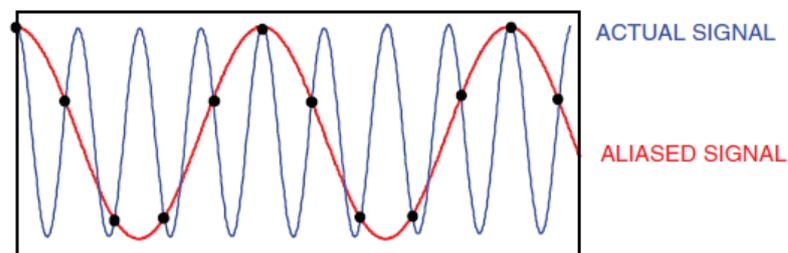


Abbildung 2.17: Aliasing [1]

oberen Diagramm dargestellt, während im unteren der Effekt des Aliasing das Spektrum verfälscht. Die Frequenzen oberhalb der Nyquistfrequenz sollten deshalb vor allen anderen

Signalverarbeitungen mit Hilfe eines Low-Pass Filters abgeschnitten werden. Solche Filter werden auch Antialiasing Filter genannt.

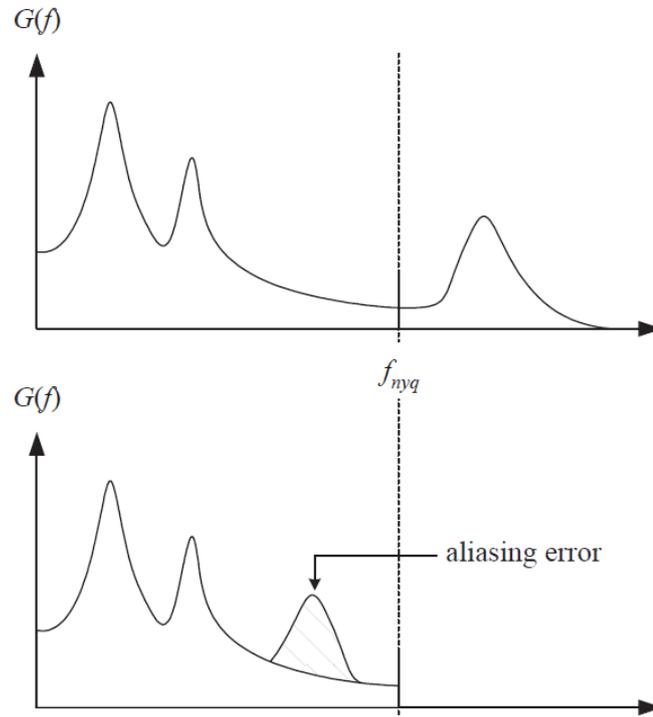


Abbildung 2.18: Aliasing im Frequenzbereich; adaptiert nach [13]

2.4.2 Fouriertransformation

Durch die Fouriertransformation kann ein Zeitsignal $x(t)$, welches im Zeitabschnitt T periodisch ist, als unendliche Folge

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (2.59)$$

geschrieben werden, wobei a_n und b_n durch

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad (2.60)$$

und

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad (2.61)$$

berechnet werden. Die Koeffizienten a_n und b_n sind die spektralen Koeffizienten der Funktion $x(t)$ und können auch in Amplituden- und Phasenform umgerechnet werden. Die

Transformation des Zeitsignals $x(t)$ in den Frequenzbereich lautet

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.62)$$

Diese Gleichung ist für ein kontinuierliches Zeitsignal mit unendlich langem Zeitintervall bestimmt. Für ein diskretes Messsignal mit endlichem Zeitbereich wird die diskrete Fouriertransformation (DFT, hier mit ausgewertetem Integral)

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi \frac{kn}{N}} \quad (2.63)$$

verwendet. x_n stellt hier den Wert des diskreten Messsignals am Messpunkt n bei einer Anzahl von N Messpunkten dar. k entspricht der jeweiligen Frequenz, für welche die spektrale Größe X_k berechnet wird. Zur Berechnung der Transformation wird meist der Fast Fourier Transform (FFT) Algorithmus von Cooley und Tukey verwendet, welcher die Anforderung besitzt, dass die Anzahl der Werte für die Transformation 2^N sein muss.

2.4.3 Leck-Effekt (Leakage)

Die Tatsache, dass das Integral aus Gleichung (2.62) von $-\infty$ bis ∞ definiert ist und Messzeiten von endlicher Zeitdauer sind, kann unter Umständen zu Problemen führen. Das periodische Signal in Abbildung 2.19 (a) liefert bei Transformation in den Frequenzbereich eine einzelne spektrale Linie. Ist jedoch die Messdauer wie in Abbildung 2.19 (b) etwas kürzer und wird daher keine ganzzahlige Zyklenzahl der Schwingung betrachtet, so zeigt das Frequenzspektrum nicht die einzelne Frequenz, die das Zeitsignal besitzt, sondern mehrere spektrale Linien in der Umgebung der wahren Frequenz. Eine Methode

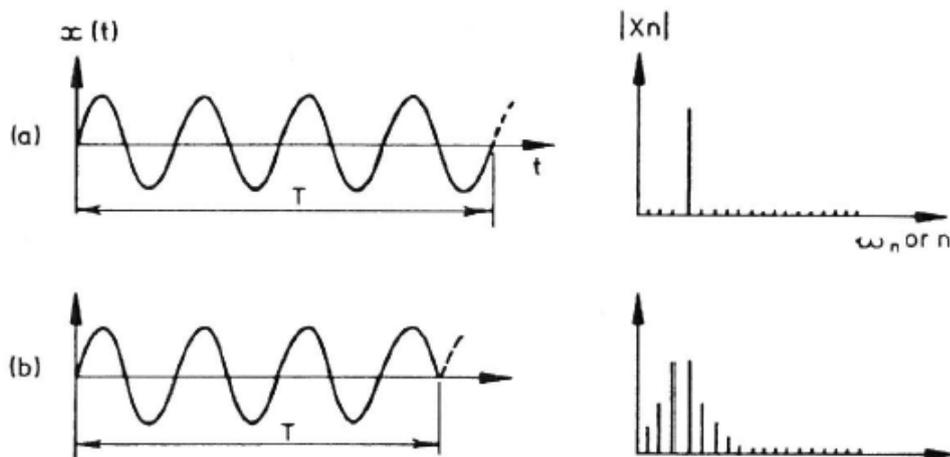


Abbildung 2.19: Leakage [9]

um diesen Effekt zu verringern sind sogenannte Fenster (Windows). Es gibt verschiedene Arten von Fenster für unterschiedliche Anwendungen. In Abbildung 2.20 sind einige vor-

gestellt, wobei der Effekt des Hanning Windows in Abbildung 2.21 gezeigt wird. Durch

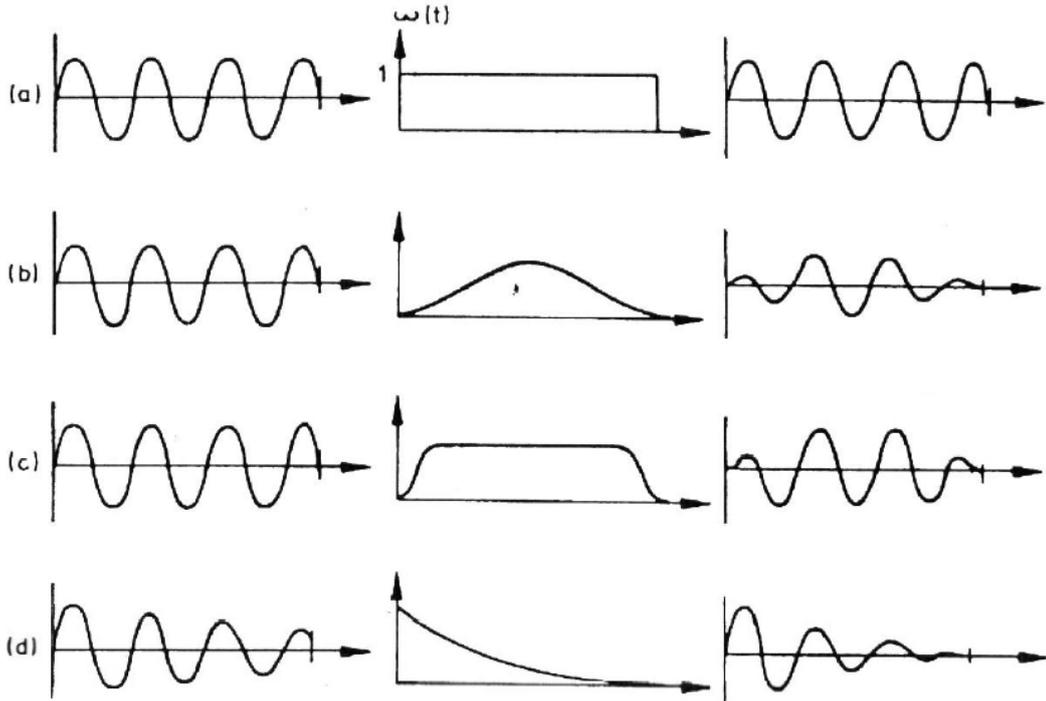


Abbildung 2.20: Verschiedene Arten von Windows: [9]

(a) Rechteck (b) Hanning (c) Cosine Taper (d) Exponential

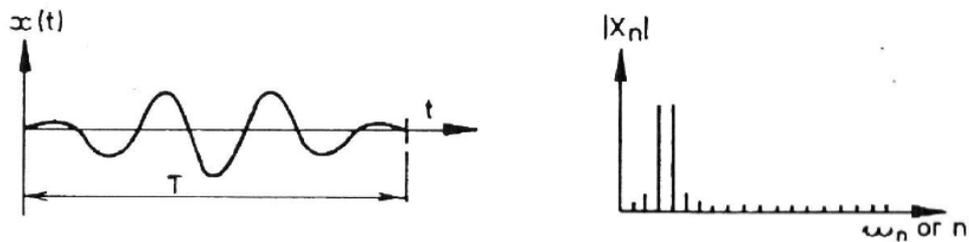


Abbildung 2.21: Effekt des Hanning Fensters an einer diskreten Fouriertransformierten [9]

das Rechteckfenster wird das Signal nicht verändert. Hanning und Cosine Taper Windows werden für kontinuierliche Signale, wie periodische oder rauschende Signale, verwendet. Das exponentielle Fenster wird für transiente Vorgänge verwendet, wenn die essenziellen Informationen am Beginn des Zeitsignals liegen und durch ein anderes Fenster unterdrückt werden würden. Generell muss nach der Anwendung eines Fensters das Signal einer Reskalierung unterworfen werden. Werden jedoch bei einem Modaltest Anregung und Antwort des Systems der gleichen Fensterung unterworfen, ist eine Reskalierung nicht notwendig.

2.4.4 Auflösung

Die Frequenzauflösung

$$\Delta f = \frac{S_r}{N} \quad (2.64)$$

hängt von der Abtastrate S_r und den gemessenen Samples N ab. Die gemessenen Samples

$$N = S_r T \quad (2.65)$$

lassen sich auch mit Hilfe der Messzeit T bestimmen.

2.5 Anregungsmethoden

Für die Anregung des Systems können verschiedene Anregungssignale verwendet werden. Die im Zuge dieser Arbeit verwendeten Signale werden hier kurz erklärt.

2.5.1 Stepped Sine (Stufensinus)

Stepped Sine Tests eignen sich dazu, spezielle Frequenzbereiche separat zu analysieren. Das Anregungssignal entspricht dabei einem Sinus mit fixer Amplitude und Frequenz. Um einen Frequenzbereich zu analysieren, wird die Frequenz des Anregungssignals schrittweise erhöht, wobei nach jeder Erhöhung gemessen wird. Es ist notwendig, dass ein stationärer Zustand erreicht wird, bevor die Messung startet. Dazu muss bei jeder neuen Frequenz der transiente Übergang abgewartet werden. Vor allem in der Nähe einer Resonanz einer leicht gedämpften Struktur kann dieser Einschwingvorgang, verglichen mit der Messdauer, signifikante Werte annehmen. Jedes Messsignal stellt dabei, im Gegensatz zu anderen Methoden, lediglich einen Punkt der FRF dar. Durch diese Tatsache nehmen Stepped Sine Tests generell mehr Zeit in Anspruch. Diese Methode hat eine sehr gute Signalqualität mit wenig Rauschanteil. Wird für die FFT jeweils ein Bereich mit vollen Schwingungen betrachtet, ist sie außerdem frei von Leakage.

2.5.2 Zufallssignal (Random oder White Noise)

Da Zufallssignale keine periodischen Signale sind, können sie nicht einfach fouriertransformiert werden. Deshalb wird hier ein anderer Ansatz mit den folgenden Parametern zur Beschreibung zufälliger Signale gewählt. Die Auto- und Kreuzkorrelationsfunktionen versuchen zufällige Signale im Zeitbereich zu beschreiben, während Auto- und Kreuzleistungsspektrum das selbe im Frequenzbereich versuchen. Die Autokorrelationsfunktion

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt \quad (2.66)$$

ist definiert als der erwartete Wert, wenn eine Variable eines zufälligen Prozesses $x(t)$ mit einer zeitverschobenen Versionen der selben Variable $x(t + \tau)$ multipliziert wird. Diese

Funktion enthält Informationen darüber, wie schnell sich zufällige Signale zeitlich ändern und ob das Signal eine periodische Abhängigkeit besitzt. Die Kreuzkorrelationsfunktion

$$R_{xf}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)f(t + \tau)dt \quad (2.67)$$

hingegen beschreibt den Zusammenhang verschiedener zufälliger Prozesse. Sie ist definiert als der erwartete Wert, wenn eine Variable eines zufälligen Prozesses $x(t)$ mit einer zeitverschobenen Variablen $f(t + \tau)$ eines anderen zufälligen Prozesses multipliziert wird. Die Auto- und Kreuzkorrelationsfunktionen erfüllen, im Gegensatz zu den zufälligen Funktionen $x(t)$ und $f(t)$, die Anforderungen an eine Fouriertransformation und können zum Autoleistungsspektrum (Power Spektral Density)

$$S_{xx}(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau)e^{-i\Omega\tau} d\tau \quad (2.68)$$

und zum Kreuzleistungsspektrum (Cross Power Spektral Density)

$$S_{xf}(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xf}(\tau)e^{-i\Omega\tau} d\tau \quad (2.69)$$

transformiert werden. Kreuzleistungsspektren sind im Allgemeinen komplexe Funktionen mit der Besonderheit, dass ihre konjugiert Komplexe

$$S_{xf}(\Omega) = S_{fx}^*(\Omega) \quad (2.70)$$

entspricht. Die FRFs einer zufälligen Anregung können nun mit dem FRF Estimator

$$H_1(\Omega) = \frac{S_{fx}(\Omega)}{S_{ff}(\Omega)} \quad (2.71)$$

oder

$$H_2(\Omega) = \frac{S_{xx}(\Omega)}{S_{xf}(\Omega)} \quad (2.72)$$

bestimmt werden. Die beiden Varianten bieten eine Möglichkeit des Vergleichs, da sie theoretisch das gleiche Ergebnis haben müssten. Die Abweichung dieser beiden Varianten wird mit der Kohärenz

$$\gamma^2 = \frac{H_1(\Omega)}{H_2(\Omega)} \quad (2.73)$$

beschrieben. Die Kohärenz kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 1 eine ideale Messung bedeutet. Ein Grund für niedrige Kohärenz kann Messrauschen sein. Dieses kann entweder am Eingangs- oder Ausgangssignal auftreten oder auch an beiden. Nahe der Resonanz wird das Eingangssignal eher durch Rauschen beeinflusst und somit S_{ff} , während an einer Antiresonanz eher das Ausgangssignal beeinflusst wird und damit S_{xx} .

Dies impliziert, dass im Resonanzbereich H_2 der bessere Estimator ist und im Antiresonanzbereich H_1 . Weiters kann dadurch abgeleitet werden, dass bei Rauschen am Eingang H_2 und bei Rauschen am Ausgang H_1 verwendet werden sollte. Tritt an beiden Signalen Rauschen auf, kann das geometrische Mittel

$$H_3(\Omega) = \sqrt{H_1(\Omega) H_2(\Omega)} \quad (2.74)$$

verwendet werden. Um die statistischen Abweichungen, welche durch die Zufallssignale eingeführt werden, zu minimieren, wird eine Mittelung (Averaging) über mehrere Samples durchgeführt. Dadurch kann auch zufälliges Rauschen entfernt werden. Bei Zufallssignalen muss immer ein Fenster verwendet werden, um Leakage zu vermindern.

2.5.3 Hammer

Abbildung 2.22 zeigt das Anregungs- und Antwortsignal eines Hammerschlags. Das Signal muss zu Beginn und Ende der Messdauer Null sein und kann dadurch als quasi-periodisch betrachtet werden. Für diese Anforderung der Fouriertransformation müssen sowohl das Hammersignal als auch das Antwortsignal innerhalb der Messdauer abgeklungen sein. Bei zu großen Abklingdauern kann ein exponentielles Fenster verwendet werden, um diese Anforderung zu erfüllen. Für die Berechnung der FRF kann entweder der typische Ansatz $H = X/F$ oder auch jener der Auto- und Kreuzkorrelationen verwendet werden. In der Theorie sind in der FRF keine statischen Unsicherheiten enthalten, wodurch Averaging nicht notwendig ist. In der Praxis hat sich aber gezeigt, dass die Hammerschläge Abweichungen aufweisen, weshalb mehrere Messungen durchgeführt werden sollten.

2.5.4 Chirp (Zirpe)

Chirp bezeichnet das Anregungssignal eines Sinus mit kontinuierlich ansteigender Frequenz, wobei die Frequenz sehr schnell gesteigert wird. Die Bezeichnung leitet sich vom charakteristischen Geräusch ab, dass dieses Signal erzeugt. Das Antwortsignal des Chirps soll genau innerhalb der Messdauer abklingen. Klingt es nicht ab, resultiert Leakage und klingt es schon sehr bald ab, ist die Signalqualität schlecht. Averaging wird lediglich durchgeführt um Rauschen zu reduzieren, da die Signale deterministisch sind und die Messungen somit keine statistischen Abweichungen besitzen. Eine niedrige Kohärenz kann bei dieser Messung auf Leakage, Nichtlinearitäten oder Rauschen hinweisen. Da diese Messung periodisch ist, wird kein Fenster benötigt.

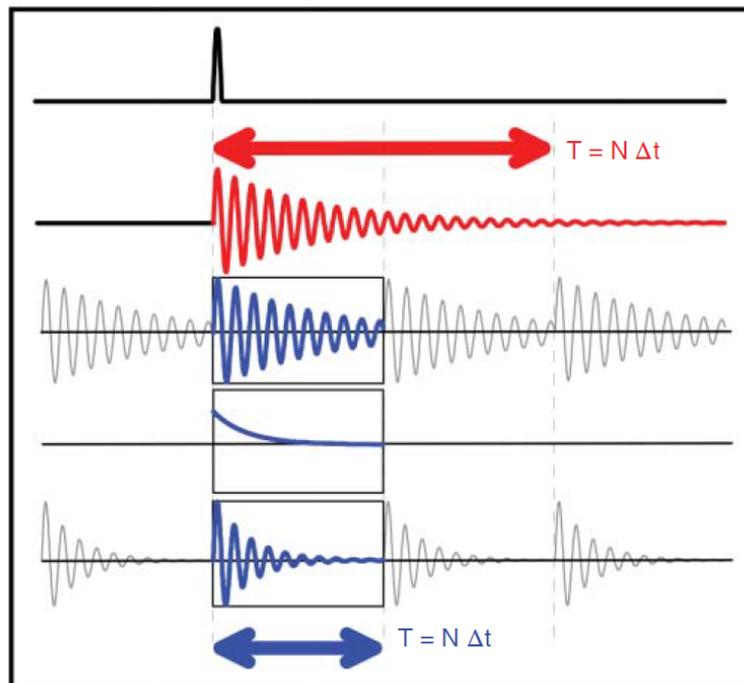


Abbildung 2.22: Anregungs- und Antwortsignal eines Hammerschlags mit Windowing mit exponentiellem Fenster [1]

3 Messtechnik und Versuchsaufbau

Der in dieser Arbeit verwendete Messaufbau eines Modaltests und die verwendete Messtechnik werden in diesem Kapitel vorgestellt.

3.1 Versuchsaufbau

Im Zuge dieser Arbeit werden Impacttests und Shakertests durchgeführt. Auf Eigenschaften dieser Testarten ist bereits im Kapitel 2 eingegangen worden. Hier sollen die Unterschiede im Versuchsaufbau und in der Datenerfassung gezeigt werden.

3.1.1 Impacttest

Abbildung 3.1 zeigt den Aufbau des Impacttests. Das Testobjekt wird mit dem Messhammer angeregt, welcher gleichzeitig das Kraftsignal misst. Ein Beschleunigungssensor, welcher auf dem Testobjekt angebracht ist, misst die am Testobjekt auftretenden Beschleunigungen. Wie und wo der Beschleunigungssensor angebracht wird, kann das Messergebnis stark beeinflussen. Ewins [9] empfiehlt zum Anbringen der Sensoren Wachs, als die einfachste Methode. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Wachsschicht dünn ist, um keine zusätzliche Dämpfung in das System zu bringen. Die Position des Beschleunigungssensors umfasst mehrere Überlegungen. Das Messen einer Punkt-FRF kann sich beim Anbringen auf einem Messpunkt als schwierig erweisen. Bei der Testung der Welle wird so vorgegangen, dass der Beschleunigungssensor an der gegenüberliegenden Seite angebracht wird. Zudem können Eigenfrequenzen, die am Ort der Sensorbefestigung einen Knoten aufweisen, nicht gemessen werden. Dies ist bereits in Abschnitt 2.2 erläutert. Bei Auswahl des Messpunkts für die Anbringung des Beschleunigungssensors muss diese Tatsache berücksichtigt werden. Das Beschleunigungs- und Kraftsignal werden über analoge Eingänge am Messerfassungsmodul von National Instruments (NI) erfasst und können im Messprogramm verarbeitet werden. In Abbildung 3.2 ist ein Bild des realen Messaufbaus gezeigt. Bedeutend ist auch die Aufhängung bzw. Befestigung des Testobjektes. Denkbar ist z.B. eine Aufhängung an sehr weichen Federn oder leichten elastischen Bändern, wobei bei der Aufhängung an Bändern die Anregungsrichtung normal auf die Aufhängungsrichtung sein soll. Durch die Befestigung ergeben sich zwangsläufig sechs Starrkörpermoden (drei Verschiebungen und drei Verdrehungen). Zweck einer weichen Aufhängung ist, dass die Eigenfrequenzen der Starrkörpermoden unter jenen der Biege- und Torsionsmoden liegen und diese somit nicht beeinflussen. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass das

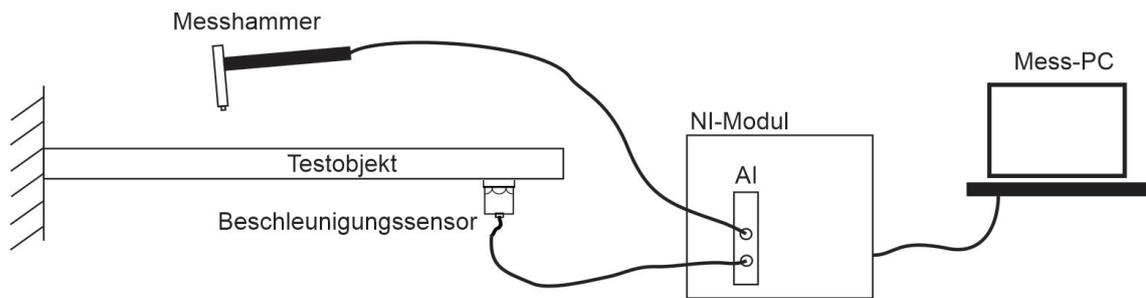


Abbildung 3.1: Layout des Impacttests

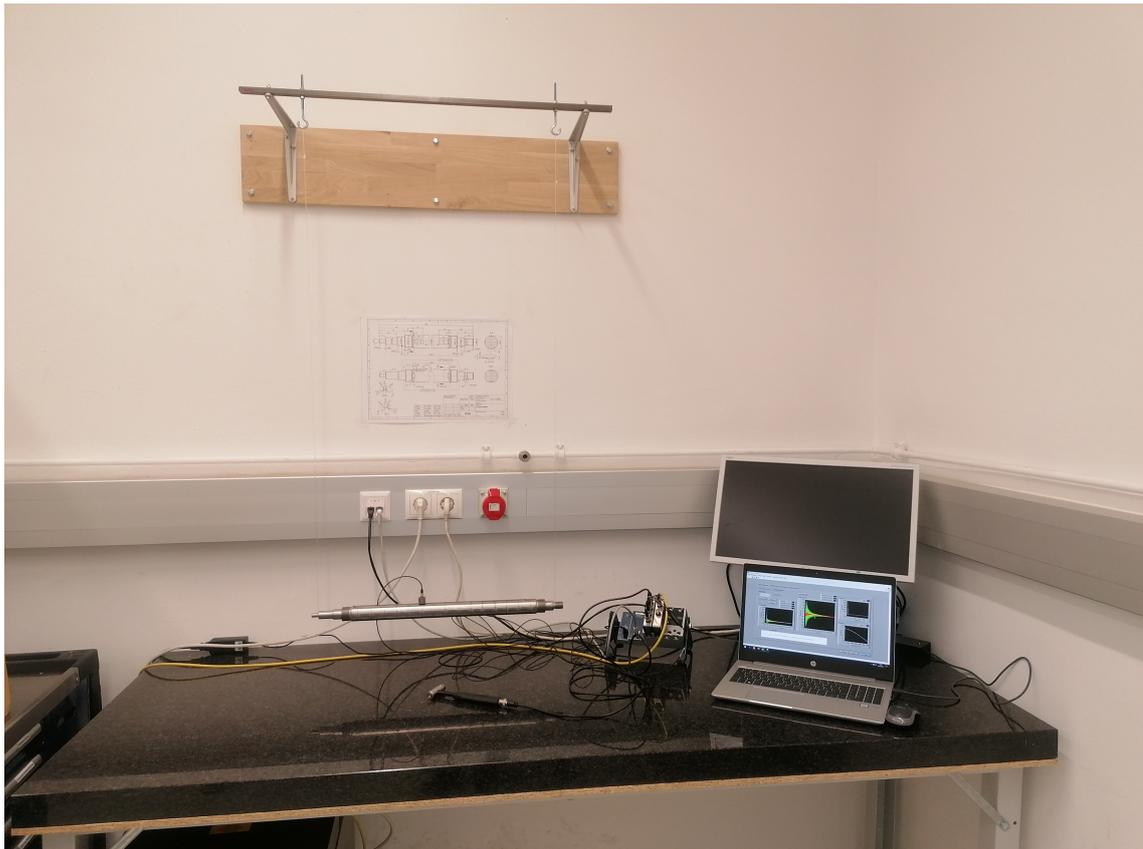


Abbildung 3.2: Impacttest

Testobjekt durch die Aufhängung und die Messgeräte nicht in seiner Masse bzw. Massenverteilung und Steifigkeit verändert wird [9].

3.1.2 Shakertest

Der Aufbau eines Shakertests ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Das Messprogramm generiert ein Signal, welches über einen analogen Ausgang des NI Moduls und einen Leistungsverstärker an den Shaker geleitet wird. Dieser ist über eine Druckstange mit einem Kraftsensor verbunden, welcher wiederum entweder mit Wachs oder Zahnzement (*dental cement*) an der zu testenden Struktur angebracht ist. An dieser ist ebenfalls mit Wachs ein Beschleunigungsmesser fixiert. Der Kraftsensor und der Beschleunigungssensor sind mit

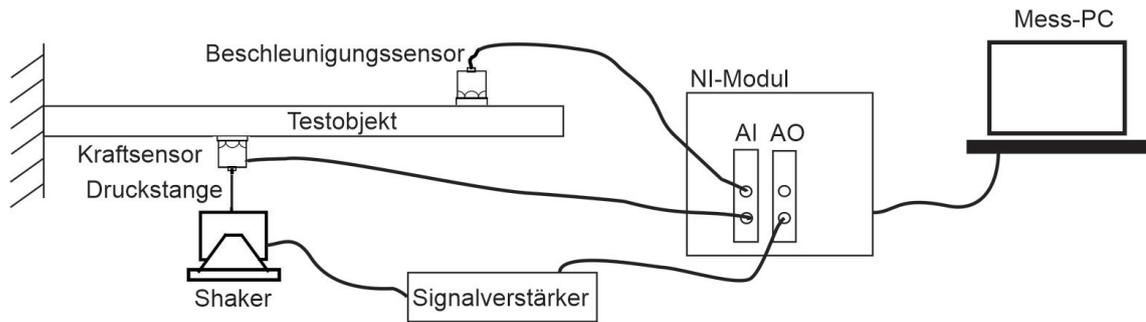


Abbildung 3.3: Layout des Shakertests

den analogen Eingängen des NI Moduls verbunden, wodurch das Messprogramm den Shaker ansteuert und die Messsignale des Kraft- und Beschleunigungssensors einliest. Um eine Anregung der Struktur in andere als die gewollte Koordinatenrichtung zu minimieren, wird der Shaker durch eine Druckstange an der Struktur angebracht. Diese ist in Anregungsrichtung sehr steif und in den anderen Richtungen nachgiebig. Dadurch soll die Anregung in andere Richtungen unterbunden werden [9]. Die richtige Ausrichtung des Shakers und der Druckstange ist dennoch wichtig, um eine Krümmung der Druckstange zu vermeiden und Verzerrungen der Messergebnisse zu verhindern. Auch die Länge der Druckstange hat einen Einfluss auf die Messergebnisse. Generell empfiehlt sich ein Vergleichstest mit einem Modalhammer, um das Shaker-setup zu verifizieren.

3.2 Messgeräte

Die im vorhergehenden Abschnitt angeführten Messgeräte werden hier genauer spezifiziert.

3.2.1 Beschleunigungssensor

Zur Messung der Beschleunigungen wird ein piezoelektrischer Beschleunigungssensor verwendet. Abbildung 3.4 zeigt den Aufbau eines solchen Sensors. Eine seismische Masse ist über Piezokristalle mit dem Gehäuse verbunden. Die auf die Kristalle wirkende Kraft ist die Trägheitskraft der seismischen Masse, welche proportional zur Beschleunigung ist [9]. Verwendet wird der Beschleunigungssensor High-sensitivity Triaxial CCLD Accelerometer Type 4506-B-003 von Brüel & Kjær. Die Messung mit diesem Sensor erfordert eine vorhergehende Kalibrierung. Dazu wird das Kalibriergerät von Brüel & Kjær Type 4294 verwendet.

3.2.2 Modalhammer

Zur Anregung der Welle wird beim Impacttest der Modalhammer 9722A500 von KISTLER verwendet. Die Hammerspitze verfügt über einen Kraftsensor, welcher wiederum nach dem Piezoprinzip funktioniert. In diesem Fall ist jedoch keine seismische Masse notwendig, da die aufgebrachte Kraft direkt auf die Piezokristalle wirkt und die Ladung q , welche proportional zur Kraft F ist, hervorruft. [9] Der Aufbau des Sensors ist in Abbildung 3.5

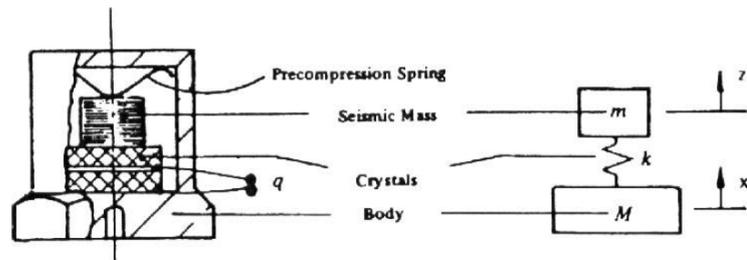


Abbildung 3.4: Funktion eines piezoelektrischen Beschleunigungssensors [9]

sichtbar. Das Kraftsignal eines typischen Hammerschlages sieht etwa so wie in Abbildung

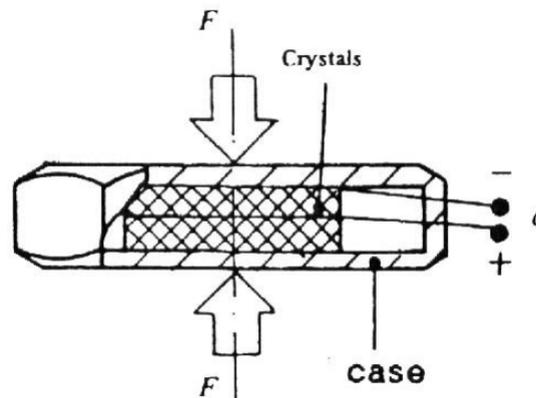


Abbildung 3.5: Funktion eines piezoelektrischen Kraftsensors [9]

3.6 (a) aus. Das Frequenzspektrum dieses Schlages ist in Abbildung 3.6 (b) dargestellt. Darin ist die Frequenz f_c markiert, bis zu welcher das Spektrum relativ konstant ist. Die mit dem Modaltest zu ermittelnden Eigenfrequenzen sollen also im gleichmäßigen Bereich bis f_c liegen. Die Grenzfrequenz f_c hängt von der Länge des Impulses T_c ab. Je kürzer der Impuls, desto höher wird die Grenzfrequenz. Die Länge des Impulses hängt wiederum von der Steifigkeit der sich berührenden Oberflächen und der Masse des Hammers ab. Je steifer die Materialien und je leichter der Hammer, desto kürzer ist der Impuls. Die in das System eingebrachte Energie verteilt sich auf den durch f_c bestimmten Frequenzbereich. Um ein möglichst gutes Resultat zu erlangen, sollte die Energie auf den Frequenzbereich, welcher für diese Messung von Interesse ist, beschränkt werden. Durch verschiedene Hammerspitzen und Zusatzmassen kann der Modalhammer auf die individuelle Messsituation angepasst werden [9]. Abbildung 3.7 zeigt die Variation des anregbaren Frequenzbereichs durch die verschiedenen, für diesen Modalhammer verfügbaren, Hammerspitzen.

3.2.3 Shaker

Für den Shakertest wird der elektrodynamische Permanentmagnet-Shaker LDS V406 von Brüel & Kjær in Kombination mit dem Leistungsverstärker LDS PA 100E von Brüel & Kjær verwendet. Der schematische Aufbau eines solchen Shakers ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Der bewegliche Kern des Shakers ist mit der Antriebsspule verbunden. Durch das

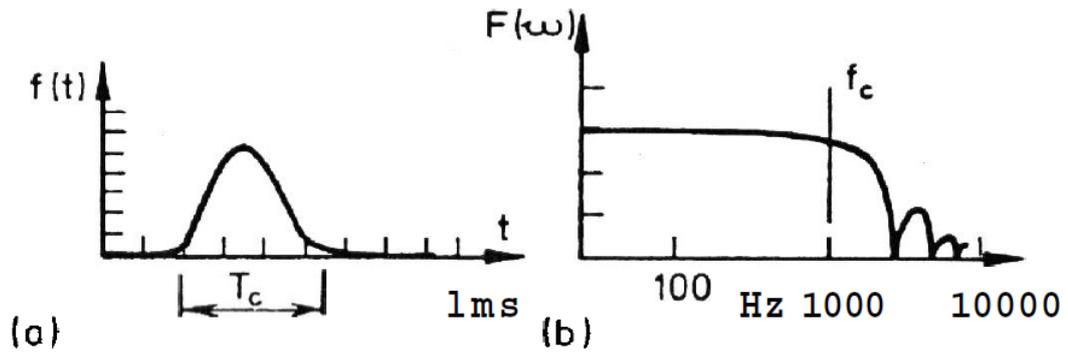


Abbildung 3.6: Typischer Hammerschlag (a) Zeitdiagramm (b) Frequenzspektrum [9]

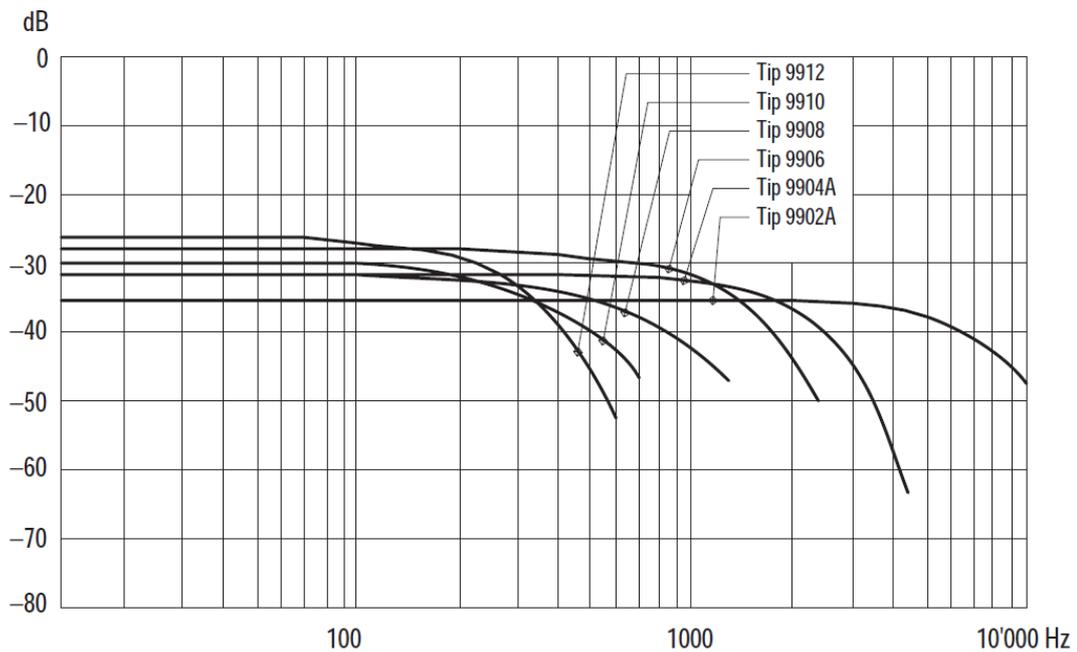


Abbildung 3.7: Frequenzbereiche unterschiedlicher Hammerspitzen [3]

magnetische Feld der Permanentmagnete und das bei Bestromung der Spule ausgebildete magnetische Feld entsteht eine Kraft, welche den Kern des Shakers bewegt.

3.2.4 Kraftsensor

Bei Anregung durch den Shaker wird ein Kraftsensor zwischen der Druckstange und dem Testobjekt angebracht. Er wird auf die Druckstange aufgeschraubt und ist mit Wachs auf dem Testobjekt befestigt. Eine Ableitung der Anregungskraft durch die Messung der Spannung am Shaker ist nicht möglich, da dadurch nicht nur die Kraft auf das Testobjekt, sondern auf das Testobjekt mit den beweglichen Teilen des Shakers gemessen wird. Obwohl die Differenz der beiden Kräfte klein ist, muss beachtet werden, dass nahe einer Resonanz durch eine sehr kleine Kraft erhebliche Schwingungen verursacht werden und in diesem Fall der Unterschied erheblich ist [9]. Verwendet wird der Kraftsensor Brüel & Kjær Type

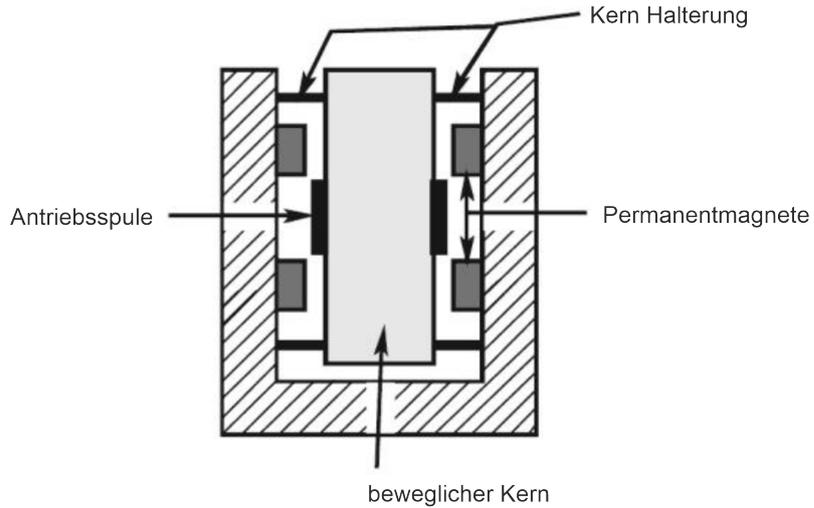


Abbildung 3.8: Schematischer Aufbau eines elektrodynamischen Shakers [11]

8230-001, welcher ebenfalls nach dem Piezoprinzip funktioniert.

3.2.5 Datenerfassungssystem

Als Datenerfassungssystem wird das NI cDAQ 9184 Chassis mit dem analogen Eingangsmodul NI 9234 und dem analogen Ausgangsmodul NI 9260 verwendet. Beim Impacttest wird teilweise statt dem Netzwerkchassis das NI cDAQ 9174 USB-Chassis verwendet. Die Software wird mit dem Programm LabVIEW von National Instruments entwickelt.

4 Messsoftware und Auswertung

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über den Funktionsumfang und den Ablauf eines Modaltests mit den erstellten Programmen, sowie die Möglichkeiten für die Auswertung der Daten.

4.1 Messsoftware

Die Messsoftware wird in LabVIEW programmiert, wobei je ein Programm für Impacttests und eines für Shakertests, erstellt wird. Für beide Programme werden als Grundlage die Beispiel-VIs (Virtuelle Instrumente) *Record Impact Testing FRF data* und *Modal Analysis*¹ von LabVIEW verwendet. Allerdings werden bei diesen Beispielprogrammen 2D-Strukturen untersucht, während hier eindimensionale Tests erforderlich sind.

4.1.1 Impacttest

Der Modaltest wird nach folgendem Ablauf durchgeführt: Struktur- und Testkonfiguration, Messung, Modalanalyse und Modenanimation. Die Programmoberfläche der Struktur- und Testkonfiguration ist in Abbildung 4.1 sichtbar. In der Strukturdefinition werden die Koordinaten der Messpunkte eingelesen und unter Testkonfiguration verschiedene Datenerfassungsparameter spezifiziert. Die Geometrie des Testobjekts muss in einem Textfile so spezifiziert werden, dass die Nummer des Messpunkts (aufsteigend) und die dazugehörige Position in einem Koordinatensystem festgelegt wird. Dieses Textfile kann in das Programm eingelesen werden. Die Geometrie ist für die Anzahl der Messpunkte und somit die Anzahl der Messungen entscheidend und wird bei der Animation der Moden verwendet. Im Vorschaubild *Nodes* werden die Messpunkte dargestellt.

Testkonfiguration

Die *Sampling Rate (Hz)* gibt an, wie viele Werte pro Sekunde aufgezeichnet werden sollen, während *Block Size (Points)* die Anzahl der Werte pro Messung angibt. Über die *Block Size* wird also indirekt die Messdauer festgelegt. Die *Sampling Rate* und die Messdauer haben Einfluss auf die Auflösung und die Bandbreite des Frequenzspektrums. Die Maximalfrequenz f_{max} ergibt sich aus der halben *Sampling Rate*, die Frequenzauflösung

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (4.1)$$

¹von <https://www.ni.com/de-at/innovations/white-papers/09/modal-analysis-in-labview.html>

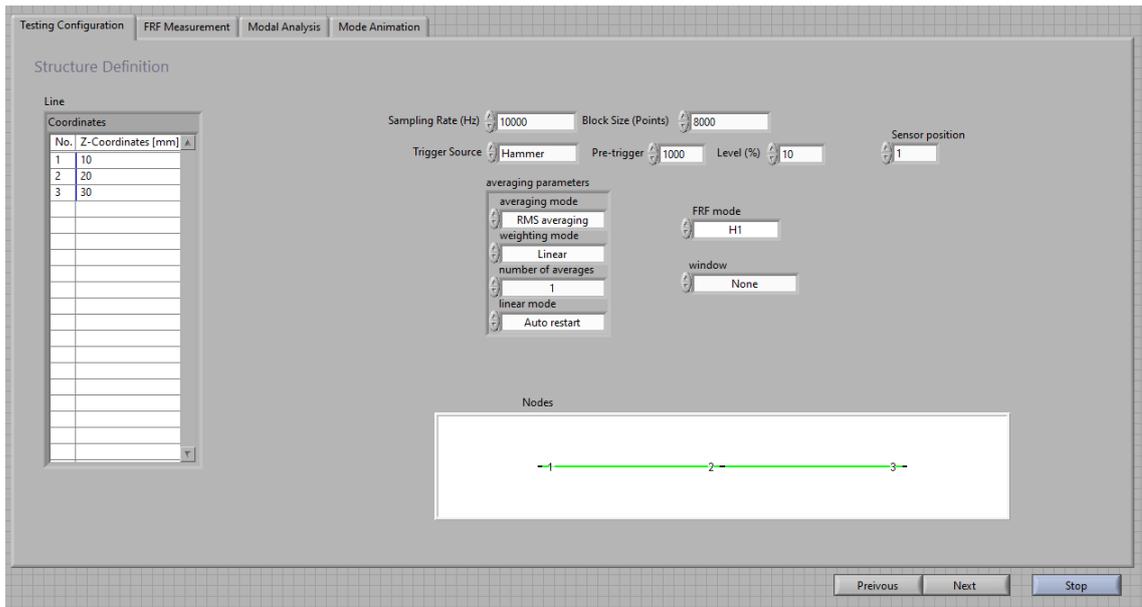


Abbildung 4.1: Frontpanel: Testing Configuration

durch die Messdauer T . Durch die Anforderungen an die FRF (Frequenzspektrum, Auflösung) müssen diese Parameter passend eingestellt werden. *Trigger-Source* legt fest, welcher Kanal für die Triggerung verwendet wird. Hier wird standardmäßig das Hammersignal verwendet. Die Triggerparameter *Pre-Trigger* und *Level(%)* sind in Abbildung 4.2 dargestellt. *Level* kennzeichnet die Größe der Signalamplitude, bei welcher der Trigger auslöst. *Pre-*

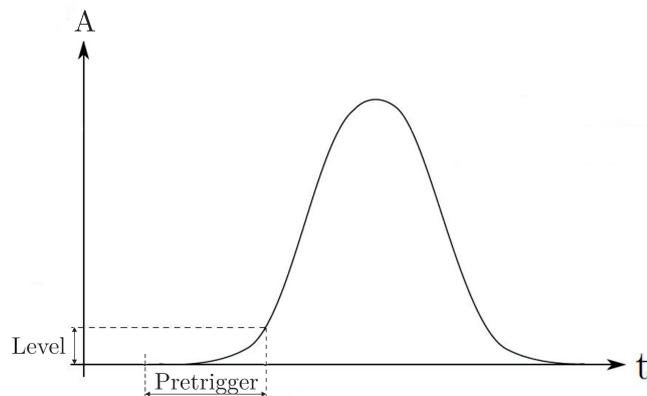


Abbildung 4.2: Triggerparameter

Trigger gibt an, wie viele Werte vor dem Auslösen des Triggers für die Messung verwendet werden. In *Sensor Position* wird eingetragen, an welchem Messpunkt der Beschleunigungssensor angebracht ist. Diese Angabe dient der Messdokumentation.

Averaging

In den *averaging parameters* wird festgelegt, ob eine Mittelung der Messungen stattfinden soll und wie diese durchgeführt wird. Der *averaging mode* kann auf *No averaging*, *Vector averaging*, *Peak hold* und *RMS averaging* eingestellt werden. Bei *Vector averaging* wird der Real- und der Imaginärteil der komplexen Zahl separat gemittelt. Diese Methode kann zu einer Verringerung von Grundrauschen bei Zufallssignalen führen. Bei *Peak hold* werden jeweils die Höchstwerte der Messungen verwendet und *RMS averaging* mittelt die Energie bzw. Leistung des Signals und reduziert damit Signalschwankungen, nicht jedoch Grundrauschen [8]. Bei *No averaging* wird nur eine Messung durchgeführt. In *weighing mode* kann zwischen *linear* und *exponential* gewählt werden. Der Unterschied besteht in den Gewichtungen der einzelnen Messungen. Während bei *linear* jede Messung gleich gewichtet wird, werden bei *exponential* spätere Messungen stärker gewichtet. Die Anzahl der Messungen kann in *number of averages* gewählt werden. Die statistische Zuverlässigkeit bei Zufallssignalen und die Entfernung von zufälligen Nebengeräuschen aus den Signalen sind die Gründe für eine Mittelung der Signale. Sie bestimmen auch die Anzahl der notwendigen Messungen [9]. Daraus ergibt sich die Anforderung, dass für Zufallssignale bedeutend mehr Messungen notwendig sind. *linear mode* muss auf *autorestart* gestellt werden, um mehrere Messläufe aufzuzeichnen. Mit *FRF mode* wird angegeben, nach welcher Methode die FRF berechnet werden soll. *H1*, *H2* und *H3* stehen zur Verfügung. Die FRF Estimators und ihre Anwendung sind in Kapitel 2 in Abschnitt 2.5 erläutert worden.

Windows

In Kapitel 2 ist bereits auf die Notwendigkeit zur Verwendung von Windows eingegangen worden. Sofern nicht anders angegeben, sind für diesen Abschnitt Informationen von National Instruments [5], [7] und [6] verwendet worden. Die im Programm zur Auswahl stehenden Fenster sind *None*, *Rectangle*, *Hanning*, *Hamming*, *Blackman-Harris*, *Exact Blackman*, *Blackman*, *Flat Top*, *4-Term B-Harris*, *7-Term B-Harris*, *Low Sidelobe*, *Blackman Nutall*, *Triangle*, *Bartlett-Hanning*, *Bohman*, *Parzen*, *Welch*, *Kaiser*, *Dolph-Chebyshev* und *Gaussian*. Abbildung 4.3 zeigt allgemein die Form eines Windows im Frequenzbereich. Neben dem mittleren Maximum (*Hauptkeule* oder *main lobe*) treten weitere lokale Maxima (*Nebenkeulen* oder *side lobes*) auf, welche generell unerwünscht sind. Die Breite der Hauptkeule, die relative Höhe der Nebenkeulen und die Roll-Off Rate der Nebenkeulen bestimmen die Charakteristik des Fensters. Durch Diskontinuitäten im Signal streut eine spektrale Einzellinie auf benachbarte Frequenzbereiche. Je schmaler die Hauptkeule des Fensters ist, desto besser ist die Frequenzauflösung. Je höher die Roll-Off Rate, desto besser ist die Kontinuität des Signals und desto weniger die spektrale Streuung. Auch eine niedrige Nebenkeulenhöhe reduziert die Streuung, sie erhöht aber auch die Breite der Hauptkeule. Soll eine einzelne Frequenz untersucht werden, ist für die Auswahl des geeigneten Fensters maßgeblich, wie weit Störfrequenzen von dieser entfernt sind. Bei weit entfernten Frequenzen ist eine hohe Roll-Off Rate wichtig, während bei nahen Störfrequenzen

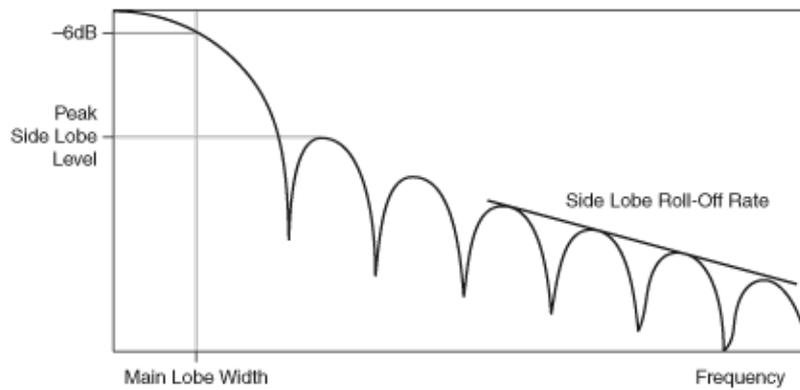


Abbildung 4.3: Frequenzspektrum eines Windows [6]

eine niedrige Nebenkeulenhöhe zum Ziel führt. Für die Identifikation von Signalen mit zwei oder mehreren nah beieinander liegenden Frequenzen ist die spektrale Auflösung zentral. Sie wird durch eine schmale Hauptkeule erhöht. Durch eine breite Hauptkeule hingegen wird die Amplitudengenauigkeit erhöht. Tabelle 4.1 zeigt die drei Parameter Main Lobe Width (MLW), Peak Side Lobe Level (PSLL) und Roll-Off Rate (RR) für die verfügbaren Fenster.

Tabelle 4.1: Fensterparameter

| Window | MLW [Δf] | PSLL [dB] | RR [f^{-n}] |
|---------------------------|--------------------|-----------|-----------------|
| Rectangular | 1 | 13,27 | 1 |
| Hanning | 2 | 31,47 | 3 |
| Hamming | 2 | 44,05 | 1 |
| Blackman-Harris | 3 | 71,48 | 1 |
| Exact Blackman | 3 | 68,3 | 1 |
| Flat Top (L=3) | 3 | 44,4 | 1 |
| 4-Term B-Harris | 4 | 92,0 | 1 |
| 7-Term B-Harris | 7 | 175 | 1 |
| Blackman Nuttall | 4 | 98,2 | 1 |
| Triangle | 2 | 26,53 | 2 |
| Bartlett-Hanning | 2 | 35,9 | 2 |
| Bohman | 3 | 46,01 | 4 |
| Parzen | 4 | 53,05 | 4 |
| Welch | 1,43 | 21,3 | 2 |
| Kaiser ($\alpha = 3$) | 3,16 | 69,6 | 1 |
| Dolph-Chebyshev (s=-50dB) | 2,14 | 50 | 0 |
| Gaussian ($\alpha = 3$) | 3,48 | 55,9 | 1 |

Für das *Low Sidelobe* Fenster konnten keine Werte gefunden werden. Das *Hanning Fens-*

ter oder auch *Hann Fenster* stellt ein Standardfenster dar, welches meist zu annehmbaren Resultaten führt. Das *Hamming Fenster* ist eine Modifizierung des *Hanning Fensters* mit dem Unterschied, dass das *Hamming Fenster* an den Rändern nicht Null wird. Einen Vergleich einiger häufig verwendeter Fenster zeigt Abbildung 4.4. Das *4-term B-Harris*

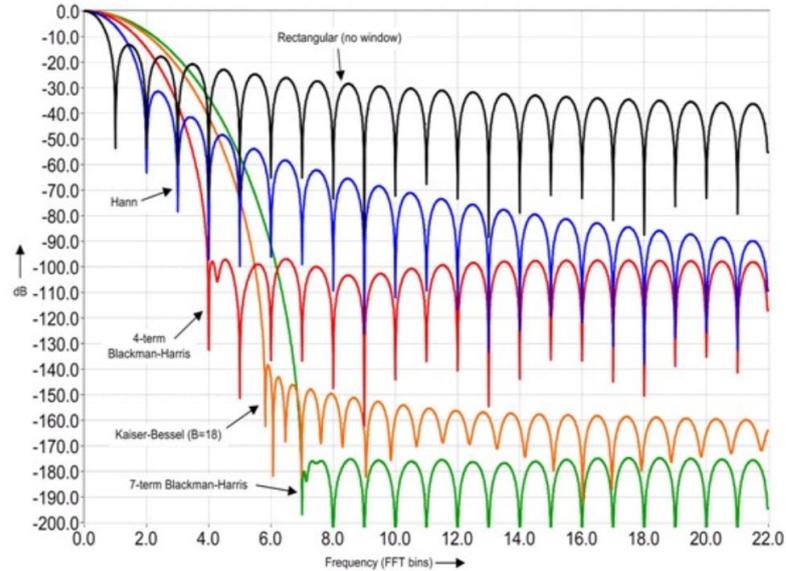


Abbildung 4.4: Frequenzspektrenvergleich häufig verwendeter Fenster [7]

Fenster stellt mit seinen niedrigen Nebenkeulen und moderat breiter Hauptkeule ein gutes Allzweck Fenster dar. Das *7-term B-Harris Fenster* ist gut geeignet um Frequenzen mit stark unterschiedlicher Amplitude zu identifizieren, allerdings ist die Hauptkeule sehr breit. Das *Kaiser-Besser Fenster* oder auch *Kaiser Fenster* ist den *Blackman-Harris Fenstern* ähnlich, mit einem skalierbaren Parameter β , welcher die Höhe der Nebenkeulen auf Kosten der Hauptkeulenbreite minimiert. Die Frequenzspektren der *Blackman Fenster* sind in Abbildung 4.5 dargestellt. [7] Sie sind Modifizierungen des *Exact Blackman Fensters*. Das

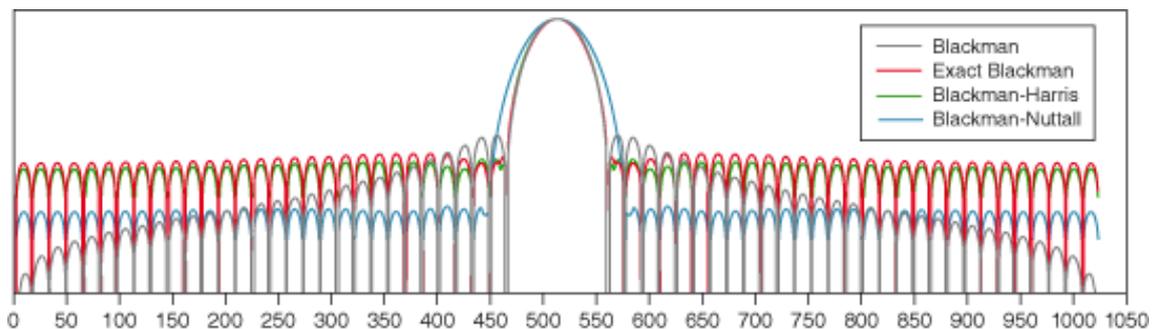


Abbildung 4.5: Frequenzspektren der *Blackman-Windows* [6]

Blackman-Nuttall Fenster hat die breiteste Hauptkeule und die niedrigsten maximalen Nebenkeulen. Das *Blackman Fenster* hat niedrige maximale Nebenkeulen und eine gute Roll-Off Rate. Das *Flat Top Fenster* eignet sich durch seine extrem breite Hauptkeule

um eine Einzelfrequenz mit hoher Amplitudengenauigkeit zu messen. Es wird für Kalibrierzwecke verwendet. [1] Das *Low Sidelobe Fenster* reduziert die Höhe der Nebenkeulen durch eine Verbreiterung der Hauptkeule. Das *Triangle-Window* entspricht in seiner Form einem Dreieck und wird auch *Bartlett-Window* genannt. Das *Bartlett-Hanning-Window* ist eine Kombination aus *Triangle-* und *Hanning-Window*. Ihre Frequenzspektren sind in Abbildung 4.6 dargestellt.

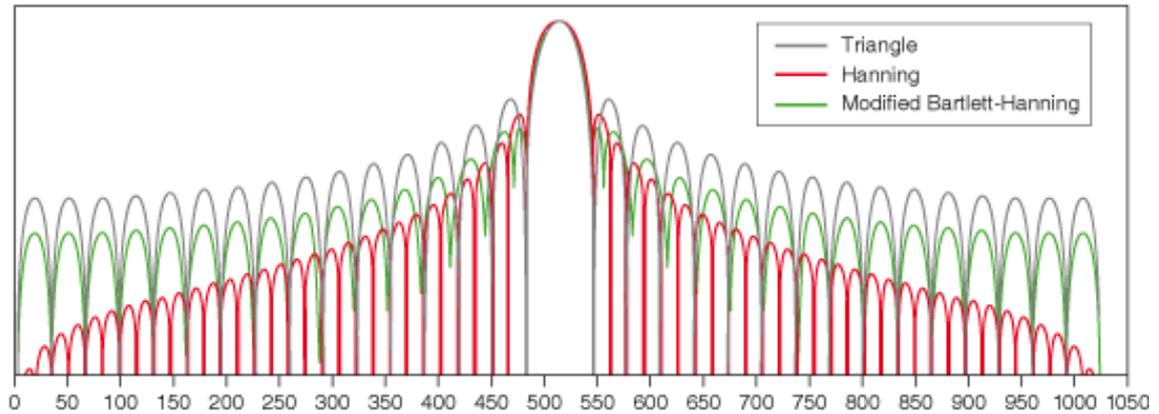


Abbildung 4.6: Frequenzspektren der *Bartlett-Hanning-Windows* [6]

Das *Dolph-Chebyshev Fenster* ist ein parametrierbares Fenster, wobei für gegebene Nebenkeulenhöhe die Hauptkeulenbreite minimiert wird. Das *Bohman Fenster* hat eine sehr hohe Roll-Off Rate bei mittlerer maximaler Nebenkeulenhöhe und mittlerer Hauptkeulenbreite. Das *Parzen Fenster* hat eine sehr breite Hauptkeule und hohe Roll-Off Rate. Die Nebenkeulenhöhe ist im mittleren Bereich. Das *Gaussian Fenster* besteht aus einer an den Enden abgeschnittenen Gaußschen Glockenkurve. Durch den Parameter α ändert sich die Breite der Glockenkurve. Dadurch wird die Diskontinuität an den Enden verringert, aber auch die Hauptkeulenbreite erhöht. Somit verringern sich aber auch die Nebenkeulenhöhen [16]. Das *Welch Fenster* kann durch den Parameter α verändert werden, sodass der Fokus zwischen Amplitudengenauigkeit und spektraler Auflösung variiert werden kann [15]. Das *Exponential-Window* wird beim Impacttest verwendet, wenn die Systemantwort nicht innerhalb der Messdauer abklingt. Dadurch kann Periodizität sichergestellt werden [9]. Das *Rectangular-Window* kann verwendet werden, um bei einem transienten Signal, welches kürzer als die Messdauer ist, Rauschen zu minimieren. National Instruments gibt mit Tabelle 4.2 eine erste Übersicht zur Verwendung von Windows.

Tabelle 4.2: Übersicht zur Verwendung von Glättungsfenstern [5]

| Signalinhalt | Window |
|---|----------------------|
| Transiente Signale, deren Dauer kürzer als die Messdauer ist | Rectangular |
| Transiente Signale, deren Dauer länger als die Messdauer ist | Exponential, Hanning |
| Allzweck Anwendung | Hanning |
| Spektralanalyse (FRF Messung: Zufallsanregung) | Hanning |
| Spektralanalyse (FRF Messung: Pseudozufallsanregung) | Rectangular |
| Sinusschwingung oder Kombination von Sinusschwingungen | Hanning |
| Sinusschwingung (Amplitudengenauigkeit wichtig) | Flat Top |
| Schmalband Zufallssignal (Vibrationsdaten) | Hanning |
| Breitband Zufallssignal (Weißes Rauschen) | Rectangular |
| Eng beieinander liegende Sinuswellen | Rectangular, Hamming |
| Anregungssignal Hammerschlag | Force |
| Anwortsignale | Exponential |
| Unbekannter Inhalt | Hanning |
| 2 Schwingungen mit ähnlichen Frequenzen aber sehr unterschiedlichen Amplituden | Kaiser-Bessel |
| 2 Schwingungen mit ähnlichen Frequenzen und fast gleichen Amplituden | Rectangular |

FRF Measurement

Im Frontpanelfenster *FRF Measurement* in Abbildung 4.7 findet die Messung statt. In

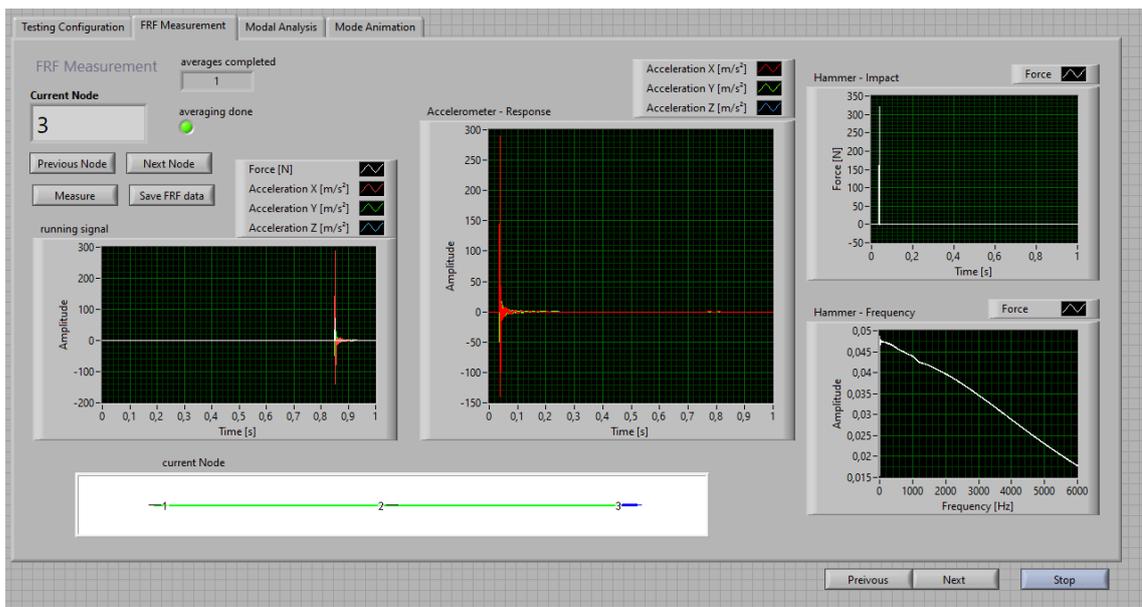
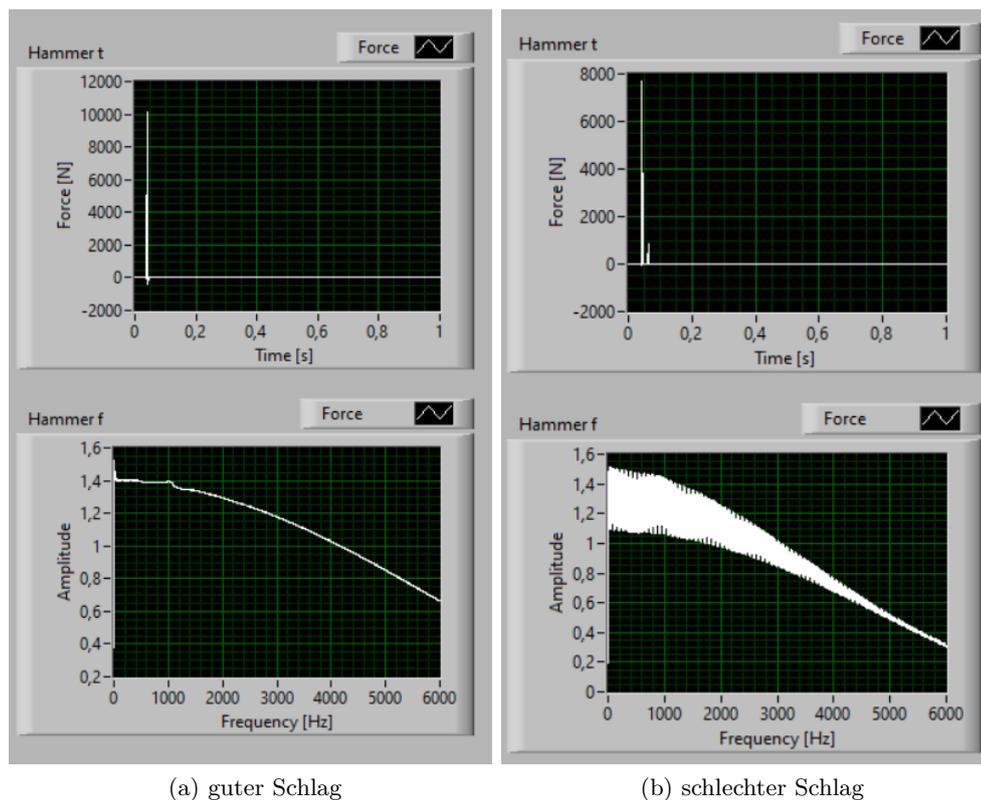


Abbildung 4.7: Frontpanel: FRF Measurement

Current Node wird der momentane Messpunkt angezeigt, dieser ist in der Animation links unten auch grafisch dargestellt, wobei hier der aktive Messpunkt blau gekennzeichnet ist. Mit *Measure* kann eine Messung gestartet werden. In *running signal* wird das aktuelle Signal an den Sensoren angezeigt. Die anderen Diagramme werden erst mit einem gültigen Triggerimpuls aktualisiert. In *Accelerometer-Response* sieht man das Zeitsignal der Beschleunigungssensoren, in *Hammer-Impact* das Zeitsignal des Hammers und in *Hammer-Frequency* die Fouriertransformation des Hammer-Signals. Diese soll bei der Beurteilung der Schlagqualität helfen. In den Abbildungen 4.9 werden die Diagramme eines guten und eines schlechten Schlages gezeigt. Links ist ein guter Schlag zu sehen. Das Hammersi-



(a) guter Schlag

(b) schlechter Schlag

Abbildung 4.9: guter und schlechter Hammerschlag

gnal über der Zeit zeigt einen einzelnen Diracimpuls, das Frequenzspektrum eine leicht abfallende Tendenz. Rechts ist ein schlechter Schlag abgebildet, ein Doppelschlag. Neben dem ersten (großen) Diracimpuls ist ein weiterer (kleinerer) Schlag erkennbar. Das Frequenzspektrum ist mit einer Schwingung überlagert. Zudem soll kontrolliert werden, ob die Welle gerade angeschlagen worden ist. Aus den durchgeführten Tests lässt sich die Vermutung aufstellen, dass bei geradem Anschlag die Beschleunigungsverläufe symmetrisch um Null sind. Erfüllt ein Schlag diese Kriterien, kann er bestätigt werden. Dann zählt *averages completed* nach oben und wenn dies mit der Anzahl der Schläge pro Messpunkt übereinstimmt, leuchtet *averaging done*. Mit *Next Node* kann zum nächsten Messpunkt weitergeschaltet und mit *Measure* erneut die Messung gestartet werden. Mit *Previous Node* kann ein Messpunkt erneut aufgenommen werden. *Save FRF data* speichert die Daten

in einer *.mat-Datei für weitere Berechnungen in MATLAB ab.

Modal Analysis

Im Reiter Modal Analysis können die Daten in FRF-Diagrammen dargestellt und Eigenmoden identifiziert werden. Dies ist in Abbildung 4.10 sichtbar. Es kann zwischen den

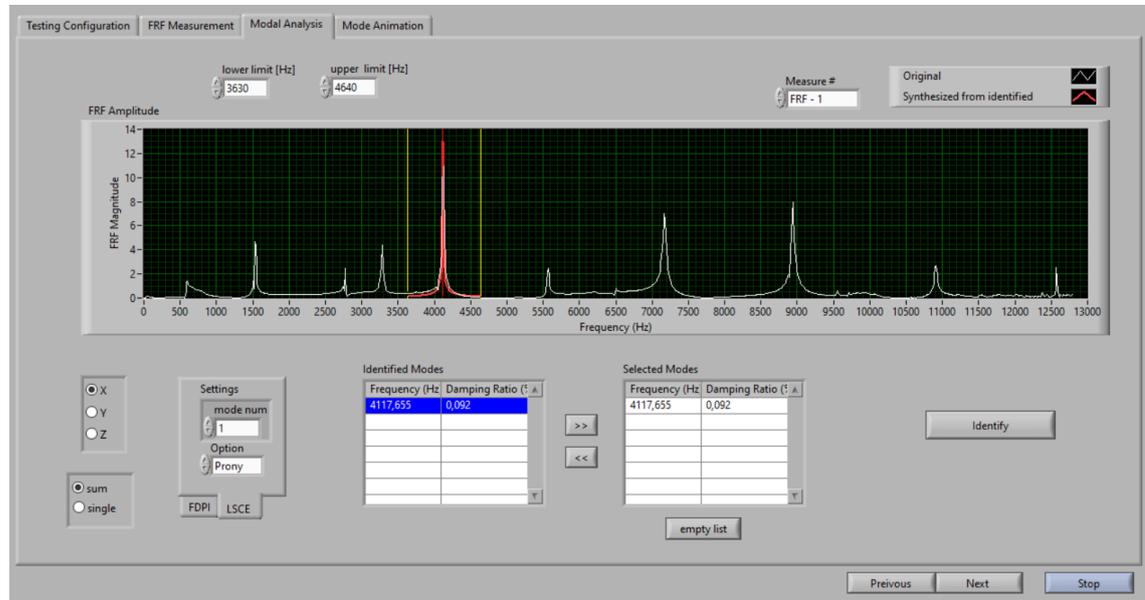


Abbildung 4.10: Frontpanel: Modal Analysis

Koordinatenrichtungen umgeschaltet und Einzel- oder Summenkurven dargestellt werden. Für die Berechnung der Eigenmoden muss zuerst der Frequenzbereich ausgewählt werden. Dann lassen sich mit den Methoden *LSCE- Least Square Complex Exponential* oder *FDPI- Frequency Domain Parameter Identification* Eigenfrequenzen, Dämpfungen und Residuen bestimmen. Die Grundlagen der Methoden sind bereits in Kapitel 2 vorgestellt worden. Aus den berechneten Daten wird eine FRF regeneriert, welche mit den Messdaten an den betrachteten Eigenfrequenzen möglichst gut übereinstimmen soll.

Mode Animation

Dieser Reiter dient zur Darstellung der Moden. Für jeden Messpunkt werden an jeder Eigenfrequenz Residuen ermittelt, welche die Auslenkung des Messpunktes und seine Phaseninformation bei der jeweiligen Eigenfrequenz beinhalten. Abbildung 4.11 zeigt die Animation einer 2. Biegemode. In *Selected Modes* muss dazu die darzustellende Eigenfrequenz ausgewählt werden. Mit *save mode data* können die in Selected Modes angezeigten Daten in einer *.txt-Datei gespeichert werden.

Grundaufbau soll hier kurz erläutert werden. Die Ablaufsteuerung des Programms ist so aufgebaut, dass die unterschiedlichen Programmteile als Teile einer Casestruktur erstellt worden sind. In eine sogenannte Queue (Warteschlange) können Cases eingereiht werden, welche der Reihe nach abgearbeitet werden. Nachfolgend wird mit (•) auf Bausteine in den Abbildungen verwiesen. In (1) wird die Queue erstellt und danach der Case *initialize* eingereiht. Wird am Frontpanel die Schaltfläche *start daq* betätigt, so wird in (2) der Case *data acquisition* in die Queue eingereiht. In (4) wird der Case aus der Queue entnommen und ausgeführt. (5) zeigt an, welcher Case momentan sichtbar ist. Nachdem die Ausführung des Cases beendet ist, wird der nächste Case in der Queue abgearbeitet. Die Einreihung kann entweder durch die logische Folge auf einen Programmteil (5) oder durch eine Aktion im Frontpanel (2) passieren. Die Ereignisstruktur ordnet jeder möglichen Aktion im Frontpanel einen Programmteil zu und reiht diesen in die Queue ein. Eine Bedienungsanleitung des Programms findet sich im Anhang. Die zentralen Cases Data Acquisition, Modal Analysis und Mode Animation werden hier kurz erklärt.

Data Acquisition

Das Blockdiagramm der Datenerfassung wird in Abbildung 4.13 gezeigt. In NI MAX (ein

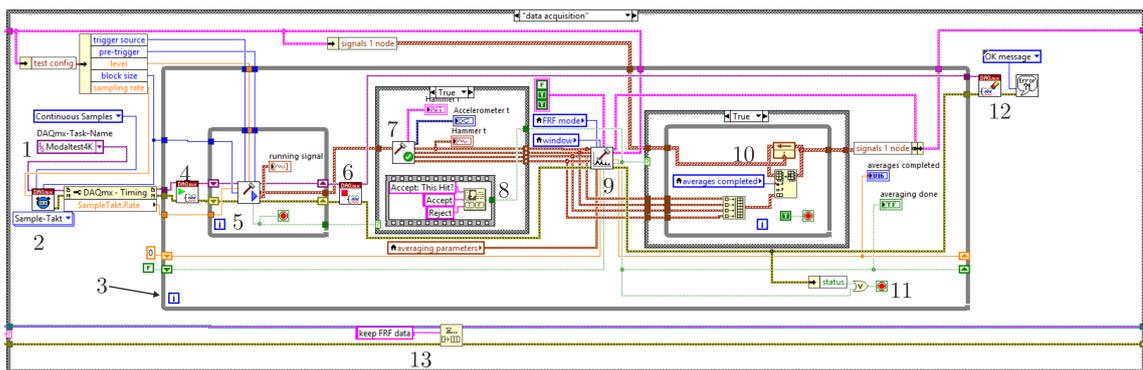


Abbildung 4.13: Blockdiagramm: Datenerfassung

Zusatzprogramm von LabVIEW, in welchem Messkanäle konfiguriert und kalibriert werden können) werden die Messkanäle für den Modalhammer und den Beschleunigungssensor konfiguriert und in einem Task zusammengefasst. Dieser Task wird im Blockdiagramm aufgerufen (1). Die Funktion DAQmx-Timing (2) bestimmt die Datenerfassung des Tasks. Dazu werden die Abtastrate und der Samplemodus eingestellt. Letzterer gibt an, ob die Signale kontinuierlich, mit einer endlichen Anzahl an Werten oder ob nur Einzelwerte erfasst werden sollen. Eine While-Schleife (3) umfasst die Messung eines Messpunkts mit mehreren Messläufen. Innerhalb dieser wird die Messung gestartet (4). Im Baustein (5) werden die Messwerte mit DAQmx-Lesen eingelesen und im Diagramm *running signal* dargestellt. Hier findet auch die Umrechnung der Einheit des Modalhammers von Pfund in Newton statt. Falls die Messeinheit des Hammers nicht Pfund beträgt, muss dies hier angepasst werden. Mit einem Softwaretrigger werden die Hammerschläge identifiziert. Die eingesetzte Hardware unterstützt Hardwaretriggerung nicht, daher wird der Software Analog Trigger

aus einem Beispielprogramm von NI³ implementiert. Hier wird das für die Triggerung verwendete Signal (das Hammersignal), der Triggerlevel sowie die Anzahl der Pre-Trigger-Werte eingestellt. Der Eingang *Trigger Armed* muss auf *True* geschaltet werden, um den Trigger aktiv zu schalten. Der Ausgang *Analog Trigger Condition satisfied* wird bei einem Hammerschlag *True* und die aktuellen Messwerte in der Anzahl *Block Size* werden weitergeleitet, die Messung gestoppt (6) und die Casestruktur (7) aktiviert. Darin werden die Messwerte in den Diagrammen *Hammerimpact*, *Accelerometer-Response* und nach einer FFT-Transformation auch in *Hammer-Frequency* angezeigt. Durch (8) erscheint ein Dialogfenster zum Bestätigen des Schlags. Wird der Schlag mit *Reject* verworfen, beginnt die Messaufnahme sofort erneut. Wird mit *Accept* bestätigt, werden in (9) die FRFs erstellt und gespeichert und in (10) die Messwerte in einem Array für die MATLAB-Datei gespeichert. Die Variable *averages completed* wird nach Beenden des Cases inkrementiert und die Messaufzeichnung startet erneut. Der Baustein zur FRF Ermittlung übernimmt hier die Mittelung mehrerer Messläufe und auch die Fensterung wird hier durchgeführt. Zusätzlich kann eingestellt werden, ob die FRF nach dem Verfahren nach H1, H2 oder H3 berechnet werden soll und ob die Amplitude in Dezibel und die Phase in Grad ausgegeben wird. Sind alle Messläufe eines Messpunktes beendet, wird *averaging done* *True* und die *While-Schleife* beendet (11). Der Task wird gelöscht und eventuelle Fehler mittels Dialog ausgegeben (12). Schließlich wird in die Queue *keep FRF data* eingereiht (13).

Modal Analysis

In Abbildung 4.14 ist das Blockdiagramm der Modalanalyse sichtbar. Die Case-Schleife

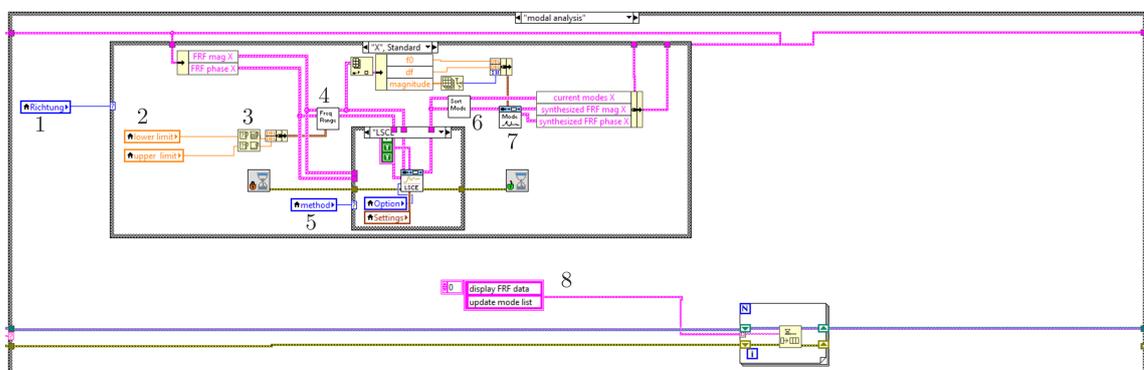


Abbildung 4.14: Blockdiagramm: Modalanalyse

legt fest, für welche Koordinatenrichtung (1) die Modalanalyse durchgeführt werden soll. Mit den Variablen *lower und upper limit* (2) wird der Frequenzbereich der Analyse festgelegt. Der Baustein (3) kontrolliert, ob die Obergrenze höher als die Untergrenze ist und tauscht sie gegebenenfalls. Der Baustein *Freq Range* (4) bearbeitet die FRF-Daten, sodass nur mehr dieser Frequenzausschnitt weiterbetrachtet wird. In einer Case-Schleife wird die

³ von <https://forums.ni.com/t5/Example-Programs/Archived-Analog-Level-Trigger-with-Pre-Trigger-Samples-in/ta-p/3996092?profile.language=en>

Methode der Ermittlung abgefragt (5). Hier kann FDPI oder LSCE ausgewählt werden. Die ermittelten Moden sind in *Sort Modes* (6) aufsteigend sortiert und in *current modes* abgespeichert. Zusätzlich werden durch den Baustein *Modes* (7) mit den berechneten Daten synthetische FRFs erzeugt, welche im Diagramm zum Vergleich angezeigt werden. In die Queue werden die Cases *display FRF data* und *update mode list* eingereicht (8), um das Frontpanel zu aktualisieren.

Modenanimation

Der zentrale Baustein der Modenanimation ist in Abbildung 4.15 abgebildet. Für die in

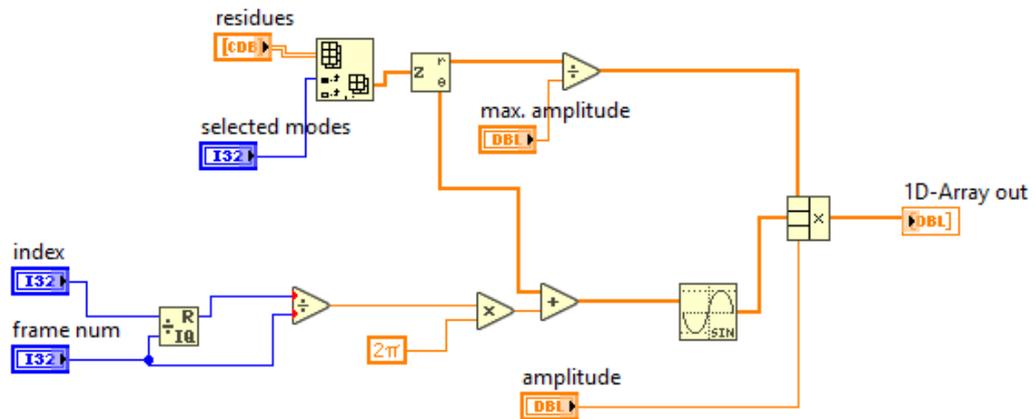


Abbildung 4.15: Blockdiagramm: Animation der Residuen

selected modes ausgewählten Moden werden die komplexen Residuen in Betrag und Phase umgerechnet. Da die Skalierung der Residuen zufällig ist, werden sie auf die Maximalamplitude skaliert. Dazu wird der Betrag durch die *max. amplitude* dividiert. Da dieser Baustein in einer for-Schleife angewendet wird, beschreibt *index* einen sich mit jedem Durchlauf erhöhenden Integer. *frame num* ist hier mit 60 festgelegt und bestimmt die Auflösung der Animation. Durch die Division von *index* durch *frame num*, wobei der Rest des Ergebnisses abgefragt wird, ergeben sich jeweils sich wiederholende Wertfolgen von 0 bis 59. Diese werden erneut durch *frame num* dividiert, um eine Skalierung auf 1 zu erreichen. Mit der Multiplikation mit 2π wird eine Skalierung auf eine volle Schwingung erreicht. Die Phaseninformation des Residuums wird addiert und für die vertikale Auslenkung der Sinus des Wertes bestimmt. Der Betrag und die Phaseninformation sowie eine vom Benutzer steuerbare Amplitude werden schließlich multipliziert und in der Animation angezeigt.

4.1.3 Shakertest

Der Aufbau des Programms Shakertest ist grundsätzlich gleich wie der des Impacttests. Es werden die drei Anregungsarten, welche in Kapitel 2 auf Seite 31 vorgestellt worden sind,

realisiert. Die Unterschiede bei der Testkonfiguration und bei der Messung werden hier gezeigt. Da die Modalanalyse und die Animation genau gleich erfolgt wie beim Impacttest wird hier nicht mehr darauf eingegangen.

Testing Configuration

Abbildung 4.16 zeigt die Struktur- und Testkonfiguration des Shakertests. Die Struktur-

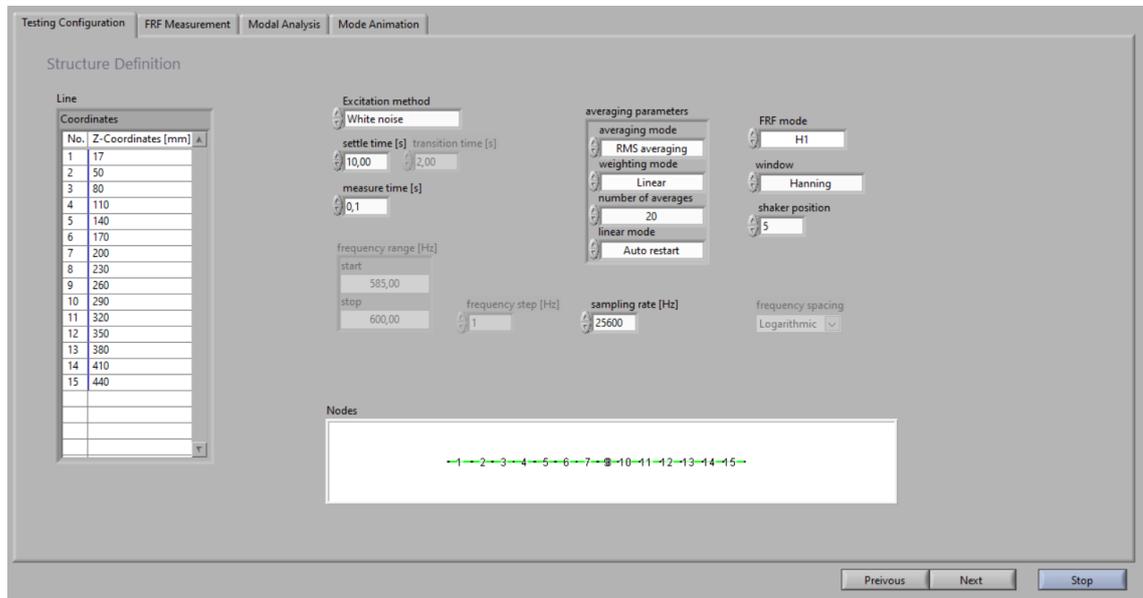


Abbildung 4.16: Frontpanel: Testing Configuration

konfiguration funktioniert gleich wie beim Impacttest. Für die Testkonfiguration muss zuerst ausgewählt werden, welche Anregungsart durchgeführt werden soll. Die für diesen Test nicht notwendigen Konfigurationsfelder werden ausgegraut. In Abbildung 4.16 ist *White noise* als Anregungsmethode ausgewählt worden. Es sind eine *settle time* für das einmalige Einschwingen des Systems am Messbeginn und eine *measure time* einzutragen. Die Messzeit bestimmt hier die Auflösung der FRF. In *shaker position* kann die Messpunktposition des Shakers zur Messdokumentation eingetragen werden. Die anderen Angaben sind bereits in Abschnitt 4.1.1 behandelt worden, wobei bei einem Test mit Zufallsanregung deutlich mehr Averages notwendig sind. Für einen Stepped Sine Test müssen mit *frequency range* ein Frequenzbereich und mit *frequency step* eine Auflösung für die Anregung festgelegt werden. Die *settle time* bestimmt die Einschwingzeit bei jedem Anregen mit neuer Frequenz, die *measure time* die Messzeit und die *transition time* eine Übergangszeit nach der Messung zur Anregung mit einer neuen Frequenz. Da die Messzeit die Auflösung bestimmt, muss sie mit *frequency step* zusammenpassen. Möglichkeiten zur Mittelung sind hier nicht vorgesehen und eine Fensterung nicht notwendig, da die Messwerte periodisch sind. Beim Sine Chirp Test wird wiederum der Frequenzbereich festgelegt, wobei dieser hier sehr groß gewählt wird. Mit *frequency spacing* wird eingestellt, ob die Steigerung der Frequenz linear oder logarithmisch geschehen soll. Hier ist keine *settle time*

erforderlich, da im Programm später die Messung als eingeschwingen klassifiziert wird. Um Signalstörungen zu minimieren kann hier eine Mittelung durchgeführt werden.

FRF Measurement

In Abbildung 4.17 wird die Messerfassung beim Shakertest gezeigt. Bei den Breitband-

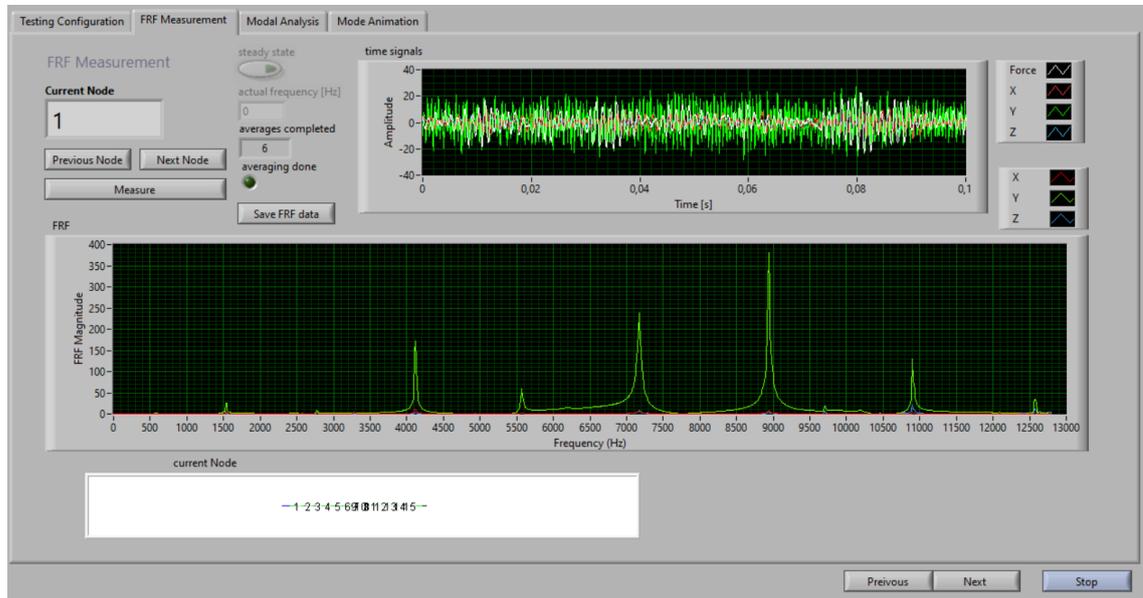


Abbildung 4.17: Frontpanel: FRF measurement

messungen (White noise und Sine Chirp) werden in *time signals* direkt die Messwerte der Sensorsignale angezeigt. Nach dem Einschwingen wird im FRF-Diagramm die Entwicklung der FRF gezeigt, bis die Mittelung beendet ist. Beim Sine Chirp Test wird das Einschwingen mit dem Knopf *steady state* beendet. Beim Stepped Sine Test kann die Messung im *time signals* Diagramm beobachtet werden. Die FRF wird hier erst am Ende der Messung erstellt. Die aktuelle Anrefrequenz ist in *actual frequency* angezeigt.

4.1.4 Programm-Aufbau: Shakertest

Im Programmteil *data aquisition* wird zwischen den drei Anregungsarten unterschieden. Für jeden erfolgt die Datenerfassung unterschiedlich. In den folgenden drei Abschnitten werden die jeweiligen Datenerfassungen vorgestellt.

Zufallssignal

Das Blockdiagramm der Erfassung mit der Anregung White Noise wird in Abbildung 4.18 gezeigt. Der in MAX definierte Task *shaker*, sowie die im Programm einstellbare *settle time* sind die Eingangsparameter für den Funktionsblock *wn out*. Hier wird das Anregesignal näher spezifiziert und die Ausgabe gestartet. Die *settle time* läuft in diesem Baustein ab. Nach Ablauf der Einschwingzeit startet die Whileschleife. Darin wird mit dem Task

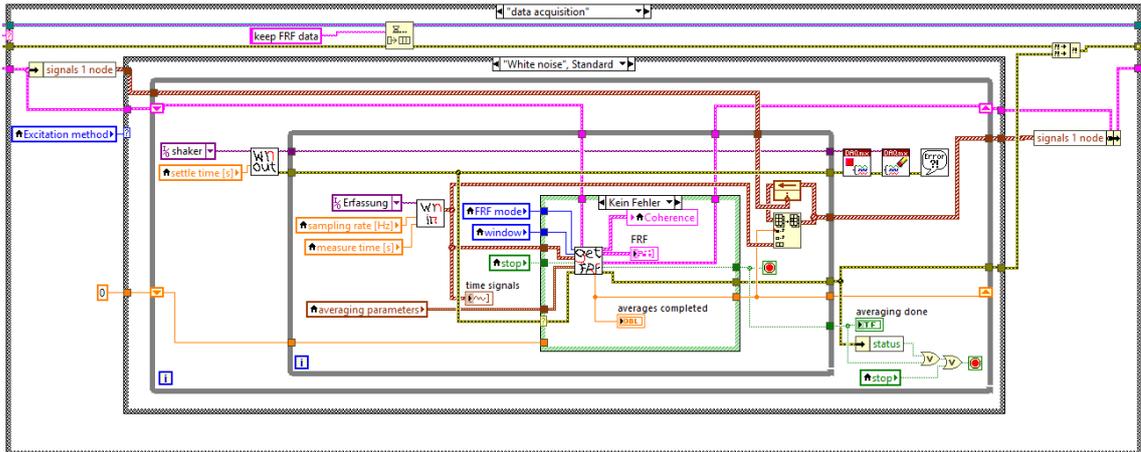


Abbildung 4.18: Blockdiagramm: Datenerfassung-White Noise

Erfassung im Baustein *wn in* die Erfassung der Sensorsignale gestartet. Nach Ablauf der Messzeit werden im Baustein *get FRF* die FRFs für die drei Richtungen ermittelt und im Programm gespeichert. Danach wird *averages completed* inkrementiert, die Sensordaten für die MATLAB-Datei gespeichert und die Sensorsignalerfassung in *wn in* erneut gestartet. Wenn die Mittelung aller Messungen durchgeführt worden ist, wird die Generierung des Sensorsignals gestoppt.

Sine Chirp

Die Datenerfassung mit Sine Chirp ist grundsätzlich ähnlich. Jedoch muss die Erfassung synchronisiert mit der Anregung erfolgen, um jeweils genau die Zeitspanne des Chirps zu erfassen. Zusätzlich wird hier die Möglichkeit geschaffen, den Einschwingprozess zu beobachten und jeweils selbst das System als eingeschwingen einzustufen. Abbildung 4.19 zeigt die Datenerfassung der Sine Chirp Messung. Aus der Messdauer, dem Frequenzbereich,

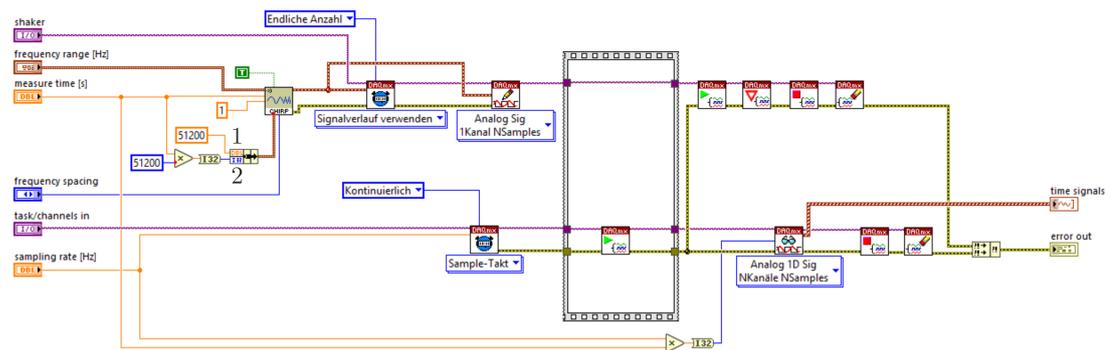


Abbildung 4.19: Blockdiagramm: Datenerfassung-Sine Chirp

dem *frequency spacing*, welches die Information enthält ob der Chirp linear oder logarithmisch sein soll, einer Samplerate (1) und einer Wertanzahl (2) wird das Chirpsignal

erstellt. Der Timingbaustein verwendet die Samplerate und die Wertanzahl des Chirpsignals für die Timingeinstellungen und der Ausgabebaustein erstellt die Ausgabewerte. Für die Erfassung wird die Samplerate aus der Testkonfiguration verwendet und eine kontinuierliche Erfassung der Messwerte festgelegt. Sofort nach dem Start der Erfassung wird die Ausgabe des Shakersignals begonnen. Es werden nun so lange Messwerte aufgezeichnet und dann im Diagramm *time signals* ausgegeben, wie dies in der Messdauer spezifiziert worden ist. Bei Betätigen des Knopfes *steady state* beginnt die Erstellung der FRFs. Diese werden genau gleich wie beim White Noise Test erstellt und gespeichert.

Stepped Sine

Im Stepped Sine Modus wird das Testobjekt jeweils mit einer Einzelfrequenz angeregt und daraus ein Punkt in der FRF bestimmt, bevor die Frequenz erhöht wird und die nächste Messung stattfindet. Die Auflösung der FRF wird also durch die Anregefrequenzen festgelegt. Eine Messung dient hier im Gegensatz zu den anderen Methoden lediglich zur Bestimmung eines Punktes. Dies impliziert, dass für diese Methode der Zeitaufwand wesentlich höher ist bzw. nur kleine Frequenzausschnitte (z.B. um eine Eigenfrequenz) damit betrachtet werden. In Abbildung 4.20 wird die Datenerfassung gezeigt. Eine Si-

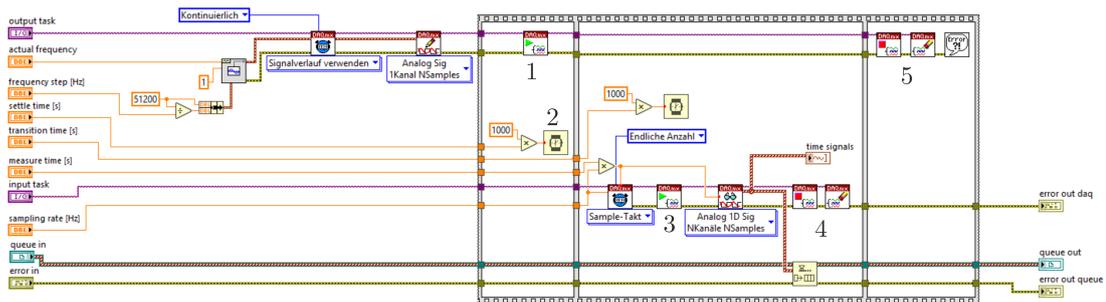


Abbildung 4.20: Blockdiagramm: Datenerfassung Stepped Sine

nusschwingung mit der Frequenz *actual frequency* und der Amplitude 1 wird generiert. Sobald die Ausführung beginnt (1), beginnt der Timer mit *settle time* zu laufen (2). Nach Ablauf der Einschwingzeit wird die Erfassung gestartet (3). Dabei wird die in *measure time* spezifizierte Messdauer lang aufgezeichnet und die erfassten Signale im Diagramm *time signals* dargestellt. Erst wenn die Aufzeichnung der Messwerte beendet ist (4), wird die Ausführung beendet (5). Danach werden die Messwerte in einer Queue gespeichert, die *actual frequency* um *frequency step* erhöht, und die Aufzeichnung erneut gestartet. Nach der Erfassung aller Messwerte wird die FRF erstellt. Abbildung 4.21 zeigt den Code zur Erstellung der FRF aus diesen Daten. In (1) werden die Daten für den ersten Punkt aus der Queue entnommen. In (2) werden die Daten so zusammengefügt, dass sie in der MATLAB-Datei gespeichert werden können. In (3) wird ein möglicher konstanter Anteil des Signals entfernt und nur der alternierende Anteil betrachtet. Dann werden jeweils Kraft und ein Beschleunigungssignal im Gain-Baustein (4) analysiert. Dieser Baustein liefert das Amplitudenverhältnis sowie die Phasenverschiebung. Zusätzlich detektiert er die

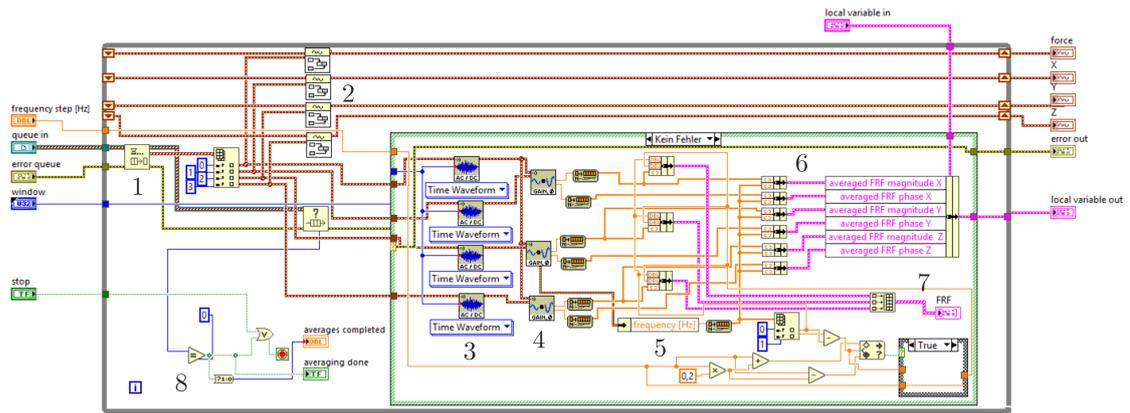


Abbildung 4.21: Blockdiagramm: FRF-Erstellung Stepped Sine

Frequenz. Diese ermittelten Parameter werden in (6) gespeichert. Für die Ausgabe im FRF-Diagramm wird neben einer Startfrequenz auch ein *frequency step* benötigt. Dieser wird rechts unten ermittelt. Die While-Schleife wird beendet, wenn Stop gedrückt wird oder die Queue leer ist (8). Die Werte *averages completed* und *averaging done* werden zur Steuerung der übergeordneten While-Schleife verwendet. Sobald die Queue leer ist, wird *averaging done* TRUE und *averages completed* von 0 auf 1 gesetzt.

4.2 Auswertung

Für die weitere Auswertung der Daten soll MATLAB verwendet werden. Dazu wird in den LabVIEW-Programmen jeweils die Möglichkeit vorgesehen, die Messdaten in einer *.mat-Datei abzuspeichern. Als Teil dieser Arbeit wird eine beispielhafte Auswertung der Daten in MATLAB erstellt. Dafür wird ein Programm für die Breitband-FRFs aus dem Impacttest, dem White-noise Test und dem Chirp Test programmiert und eines für die Auswertung der Daten aus dem Stepped Sine Test.

4.2.1 Auswertung Breitband-FRF

Der Code zu diesem Programm findet sich in Anhang C. Zuerst wird das Messdatenarray aus Labview in Arrays für jeden Sensor aufgeteilt und so umgeordnet, dass sie für die Modalanalysefunktionen (es werden die Funktionen *modalfit*,⁴ *modalfrf*⁵ und *modalsd*⁶ von MATLAB für Modalanalyse verwendet) von Matlab verwendet werden können. Dazu werden die Daten aller Messläufe eines Messpunkts aneinandergereiht und für jeden Messpunkt in einer Reihe des Arrays abgespeichert. Mit der Funktion *modalfrf* wird für jeden Messpunkt eine FRF erzeugt. Dabei werden die Messdaten (Kraft- und Beschleunigung), die Samplerate, die Datenzahl einer Messung und die Berechnungsmethode als

⁴<https://de.mathworks.com/help/signal/ref/modalfit.html>

⁵<https://de.mathworks.com/help/signal/ref/modalfrf.html>

⁶<https://de.mathworks.com/help/signal/ref/modalsd.html>

Eingangsparameter benötigt. Da MATLAB die FRF als Rezeptanz berechnet, muss sie nun in eine Akzeleranz transformiert werden um sie mit den LabVIEW-FRFs vergleichen zu können. Die Funktion *modalsd* wird nun verwendet, um Eigenfrequenzen zu bestimmen und zwischen realen und rechnerischen Moden zu unterscheiden. Die Moden werden als *instabil*, *stabil in der Frequenz* oder *stabil in Frequenz und Dämpfung* kategorisiert und im Stabilitätsdiagramm, wie in Abbildung 4.22, angezeigt. Die Y-Achse zeigt die Anzahl der

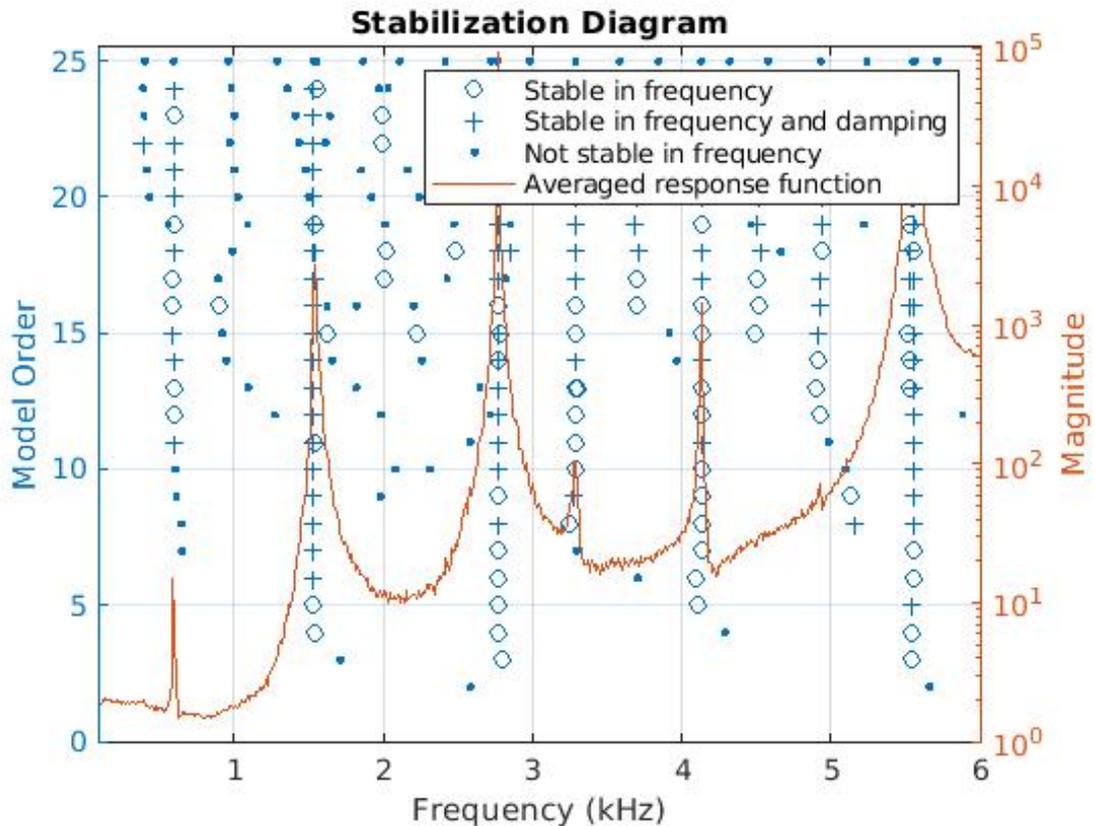


Abbildung 4.22: Stabilitätsdiagramm

Moden bzw Freiheitsgrade, welche der Berechnung zugrunde gelegt worden ist. Ein Freiheitsgrad, in welchem die vermuteten Eigenfrequenzen stabil sind, wird ausgewählt und die ermittelten Frequenzen als physikalische Frequenzen abgespeichert. Für jede Modalanalyse muss dieser Schritt der Auswahl der Frequenzen jeweils manuell durchgeführt werden. Die Funktion *modalfit* bestimmt nun mit der FRF-Matrix und diesen physikalischen Frequenzen die Dämpfungen und Eigenformen zu den Eigenfrequenzen sowie synthetische FRFs. Die Übereinstimmung der Summen-FRF mit der synthetischen Summen-FRF soll kontrolliert werden und gegebenenfalls die Analyseparameter (Frequenzbereich, Freiheitsgrad) angepasst werden. Zuletzt werden die berechneten Eigenformen animiert. Dabei wird analog zur Berechnung in LabVIEW in Abschnitt 4.1.2 vorgegangen.

4.2.2 Auswertung Stepped Sine Daten

Bei der Stepped Sine Auswertung wird die Berechnung der FRF für einen Messpunkt realisiert. Der Code dazu findet sich ebenfalls in Anhang C. Im Zuge dieser Auswertung werden die benötigten Daten (eine Koordinatenrichtung, ein Messpunkt) für die zwei Sensoren (Kraft, Beschleunigung) in Arrays gespeichert. Durch die Samplerate, die Messzeit und die Anzahl der Daten im Array wird bestimmt, wie viele Messdurchläufe aufgenommen worden sind. Die Arrays werden so regroupiert, dass jeder Messdurchlauf in eine Datenreihe gespeichert wird. Jede Datenreihe wird schließlich fouriertransformiert. Das Maximum des Frequenzspektrums liegt bei der Anregfrequenz. Dieses Wertepaar wird für jeden Messlauf ermittelt und daraus die FRF erstellt. Für die Dämpfungsbestimmung im Stepped Sine Test wird ein bereits am Institut für Mechanik vorhandener Code zur Bestimmung nach der Wurzel2-Methode verwendet. Dazu wird die FRF mit einer spline-Kurve mit höherer Auflösung gefittet und der Maximalwert ermittelt. Die Frequenz des Maximalwerts ist die Eigenfrequenz. Die gefittete FRF wird in 2 Teile aufgeteilt, vor und nach der Eigenfrequenz. Die Werte, welche den Wurzel2-Werten ($Amplitude_{max}/\sqrt{2}$) am nächsten sind und ihre zugehörigen Frequenzen, werden ermittelt. Die Dämpfung wird nach Gleichung (2.49) aus den ermittelten Werten berechnet. Abbildung 4.23 zeigt die Original-FRF, die gefittete Kurve, die Wurzel2-Werte und die Eigenfrequenz.

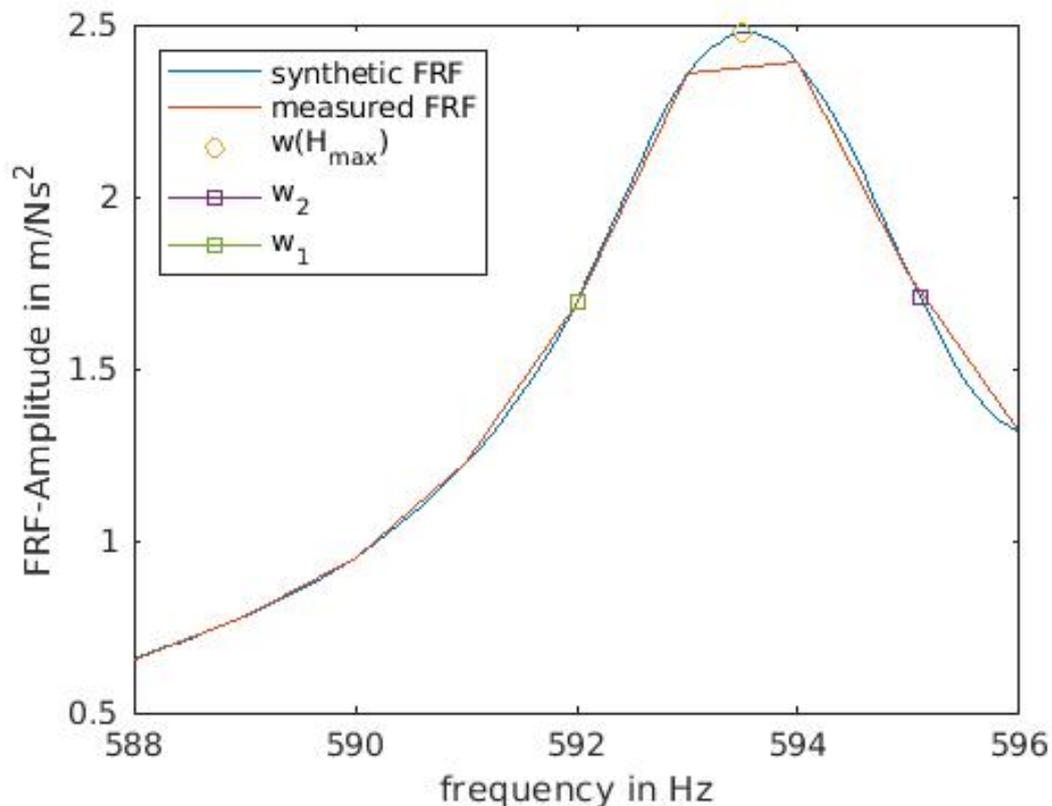


Abbildung 4.23: Dämpfungsbestimmung in MATLAB

5 Ergebnisse und Verifikation

Im Zuge dieser Arbeit werden die erstellten Programme zur Testung einer Rotorwelle eines Elektromotors eingesetzt. Die gewonnenen Ergebnisse werden in diesem Kapitel präsentiert und einer Verifikation unterworfen.

5.1 Ergebnisse

Mit den in Kapitel 3 vorgestellten Versuchsaufbauten werden an der Welle Modaltests durchgeführt. Aufgrund der einfacheren Implementierung werden zunächst Impacttests durchgeführt. Danach werden White-Noise-Tests und schließlich Stepped-Sine-Tests durchgeführt. Die Ergebnisse jeweils eines repräsentativen Tests werden hier kurz präsentiert.

Ergebnisse Impacttest

Aus den Messdaten des Impacttests werden mit LabVIEW FRF-Diagramme erstellt, daraus Eigenfrequenzen und zugehörige Dämpfungen ermittelt und schließlich Mode Shape Animationen durchgeführt. An der Welle werden 15 Messpunkte markiert. Pro Messpunkt werden 3 Schläge ausgeführt. Abbildung 5.1 zeigt die erstellte FRF und die synthetische FRF, welche bei der Modalanalyse generiert worden ist. Bei der 2., 4. und 6. Mode stim-

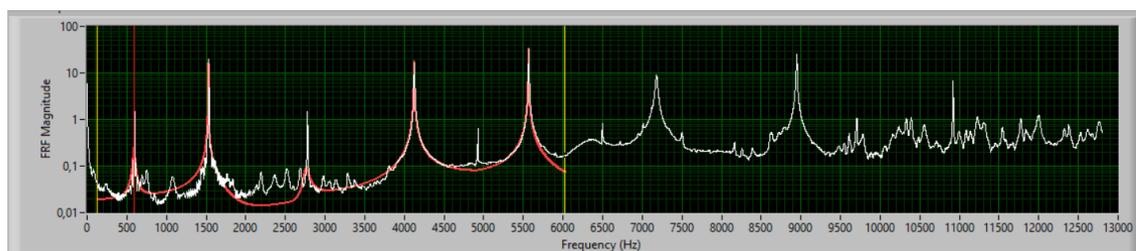


Abbildung 5.1: Modalanalyse Impacttest Welle

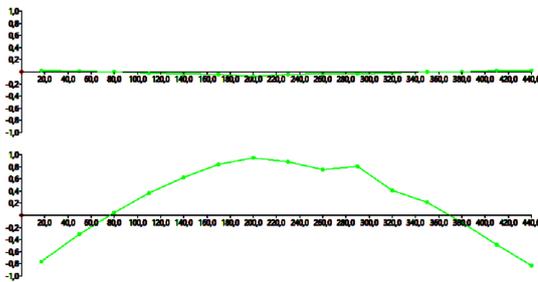
men die FRFs gut überein, somit erscheinen die Werte plausibel. Die anderen ermittelten Moden weisen sehr hohe Dämpfungen auf und sind somit keine guten Ergebnisse. Durch verändern des Frequenzbereichs und der Berechnungsparameter können auch hier plausible Werte ermittelt werden. Die 5. Mode ist durch die Animation als Torsionsmode identifiziert worden. Da hier nur Biegemoden betrachtet werden sollen, wird diese verworfen und

die 6. Mode im Weiteren als 5. bezeichnet. Die Ergebnisse der Messung zeigt Tabelle 5.1. Die Abbildung 5.3 zeigt die Ergebnisse der Animation. Oben ist jeweils die XZ- und unten

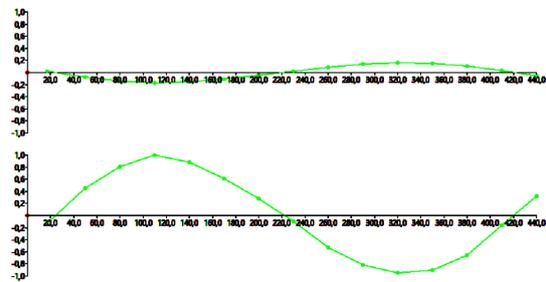
Tabelle 5.1: Ergebnisse Impacttest

| Eigenfrequenz [Hz] | Dämpfung [%] |
|--------------------|--------------|
| 593,9 | 0,015 |
| 1531,6 | 0,046 |
| 2773,9 | 0,036 |
| 4127,9 | 0,037 |
| 5570,6 | 0,018 |

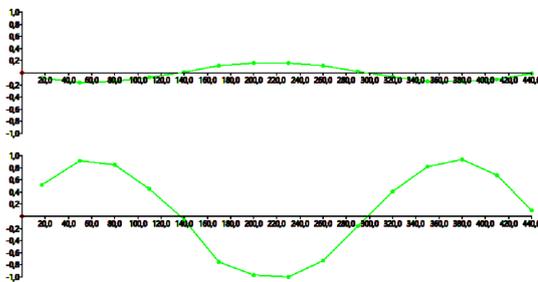
die YZ-Ansicht dargestellt. Anschlagrichtung ist die Y-Richtung und Z zeigt in Wellenlängsrichtung.



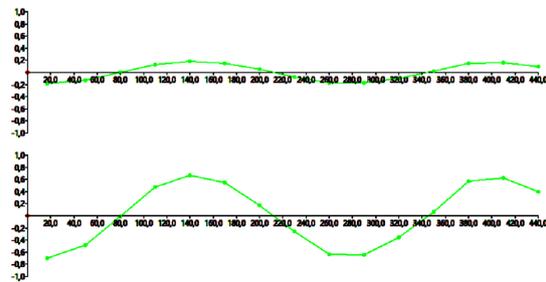
(a) Eigenform der 1. Eigenfrequenz



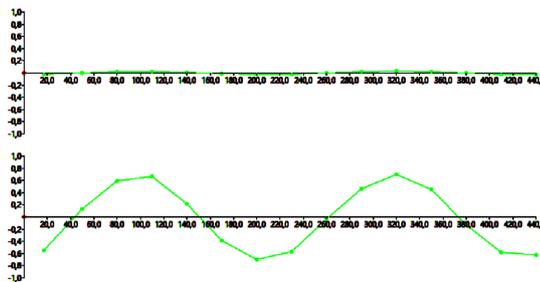
(b) Eigenform der 2. Eigenfrequenz



(c) Eigenform der 3. Eigenfrequenz



(d) Eigenform der 4. Eigenfrequenz



(e) Eigenform der 5. Eigenfrequenz

Abbildung 5.3: Eigenformen der Welle

Ergebnisse Shakertests

Mit dem Shakeraufbau sind Random und Stepped Sine Tests durchgeführt worden, deren Ergebnisse hier präsentiert werden. Die Auswertung der Daten wird in diesem Fall mit MATLAB durchgeführt. Es wird wiederum die in Kapitel 1 erwähnte Welle getestet. Für den Random Test werden je Messpunkt 40 Averages durchgeführt. Der Shaker wird am Messpunkt 3 an die Welle angebracht. Die ermittelten FRFs sind in Abbildung 5.4 gezeigt. Eine Modalanalyse liefert die in Tabelle 5.2 enthaltenen Werte. Die Eigenfrequenzen

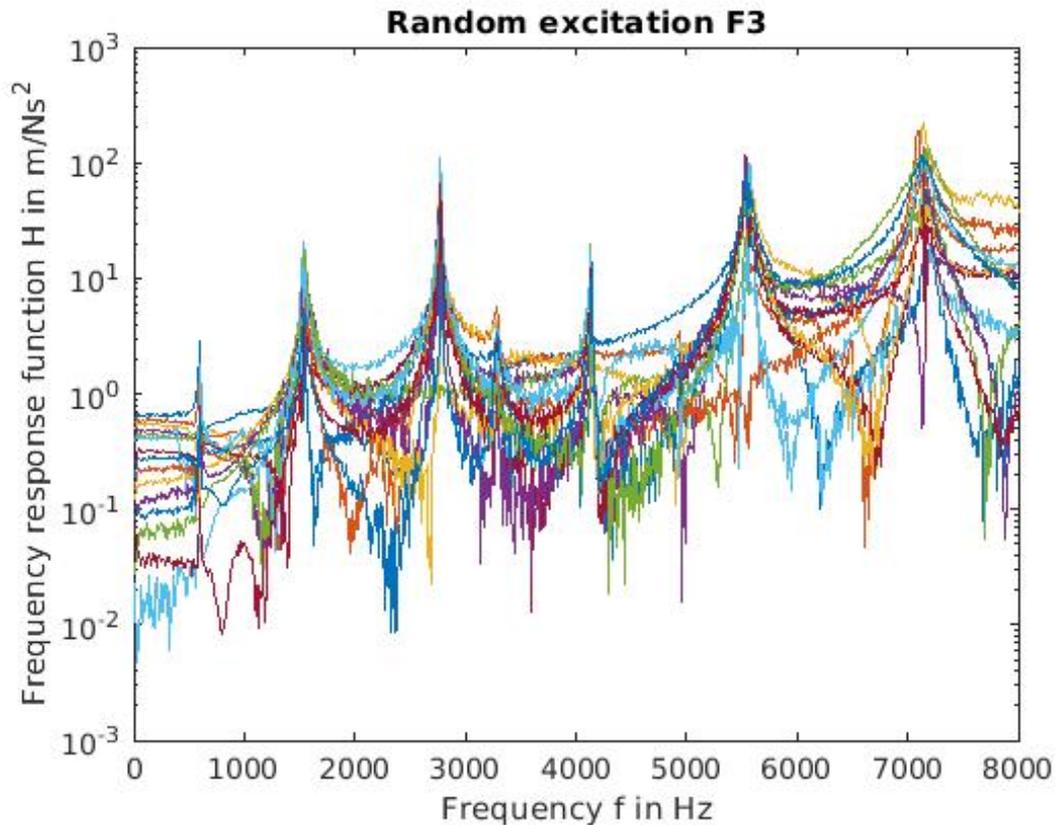


Abbildung 5.4: Modaltest Random: FRFs

stimmen gut mit denen aus dem Impacttest überein. Die Dämpfungen sind im Shakertest deutlich niedriger. Die Unterschiede im Testaufbau können laut Avitable [1] auch zu Unterschieden in den Ergebnissen führen. Dabei ist beim Shakertest problematisch, dass die Zusatzmasse des Beschleunigungssensors während dem Test an verschiedenen Positionen der Struktur angebracht wird, während sie im Impacttest an einer Stelle bleibt. Auch Massen- und Steifigkeitsänderungen durch die Druckstange des Shakers können einen Einfluss auf die ermittelten Moden haben. Um die Bestimmung der Dämpfung von MATLAB zu verifizieren, sollten Vergleiche der selben Messung von LabVIEW und MATLAB durchgeführt werden.

Tabelle 5.2: Ergebnisse Shakertest Random

| Eigenfrequenz [Hz] | Dämpfung [%] |
|--------------------|--------------|
| 591,0 | 0,0049 |
| 1532,2 | 0,0022 |
| 2720,1 | 0,0016 |
| 4038,9 | 0,0020 |
| 5494,9 | 0,0012 |

Den Vergleich der durch die Modalanalyse erstellten synthetischen FRF mit der Summen-FRF zeigt Abbildung 5.5. Die 4. und 6. Mode sind als Nicht-Biegemoden identifiziert

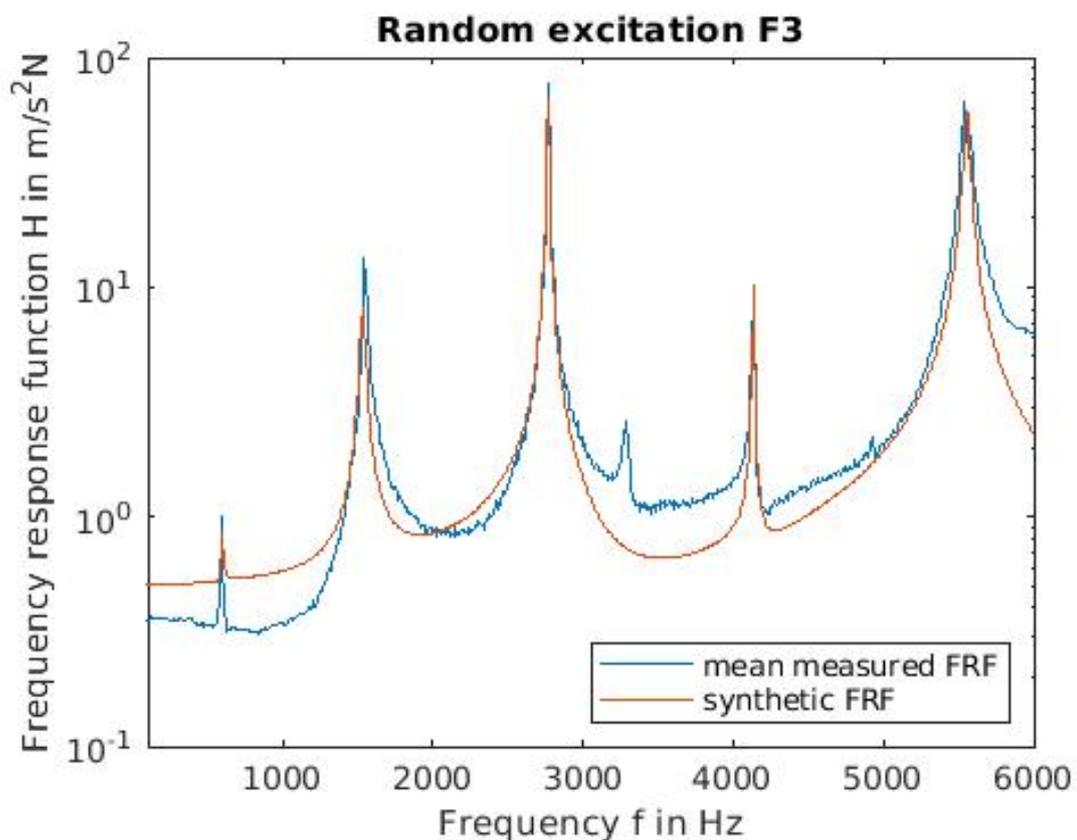
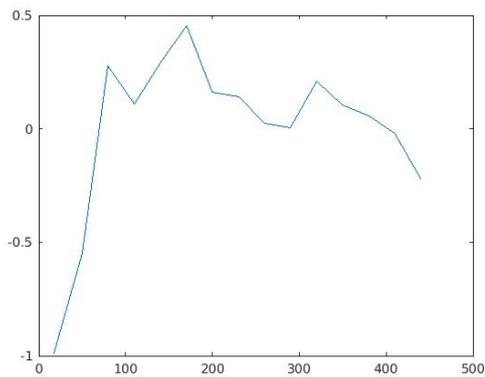
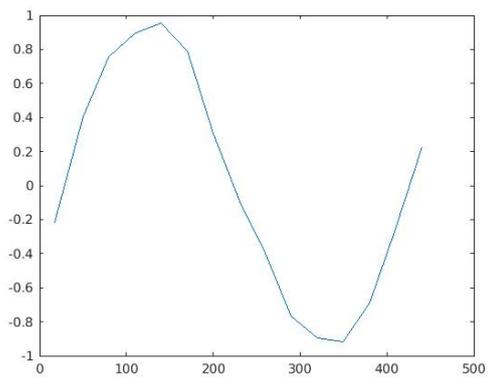


Abbildung 5.5: Modaltest Random: Summen-FRF und synthetische FRF

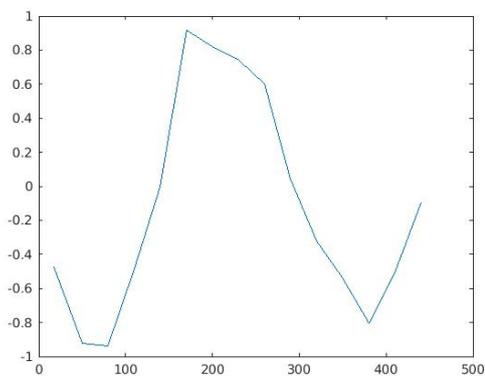
worden und deshalb in der Tabelle nicht angeführt. Die Abbildungen 5.7 zeigen die mit MATLAB erstellten Animationen. Hier wird nur die YZ-Ansicht dargestellt und eine Bewegung in X-Richtung ignoriert. Da an der Messposition 3 angeregt worden ist und die 1. Mode an dieser Position einen Knoten besitzt, kann diese nicht aus diesen Daten bestimmt werden (ist im Kapitel 2 gezeigt worden). Man sieht im Diagramm, dass sie im FRF-Diagramm eine weit geringere Amplitude (im Vergleich zum Impacttest) zeigt und aus der Animation, dass die Eigenform nicht bestimmt werden kann.



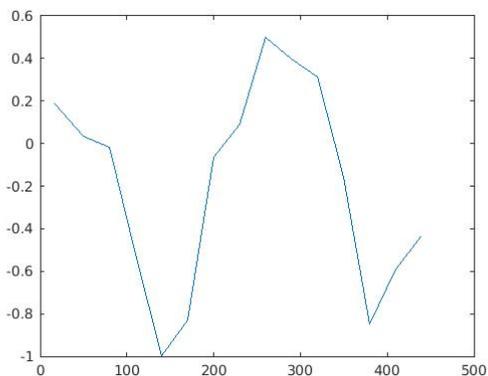
(a) Eigenform der 1. Eigenfrequenz



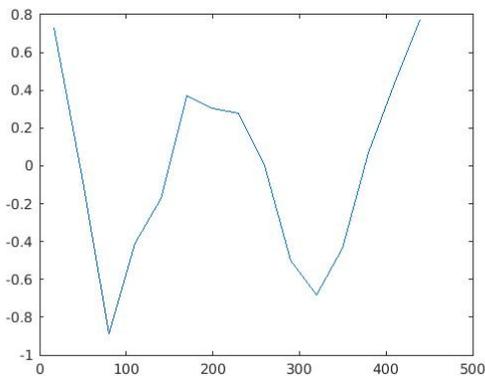
(b) Eigenform der 2. Eigenfrequenz



(c) Eigenform der 3. Eigenfrequenz



(d) Eigenform der 4. Eigenfrequenz



(e) Eigenform der 5. Eigenfrequenz

Abbildung 5.7: Eigenformen der Welle

Ergebnisse Stepped Sine Test

Mit dem Stepped Sine Test wird der Bereich der 1. Eigenfrequenz näher untersucht. Abbildung 4.23 zeigt die aus den gemessenen Werten erstellte FRF und eine gefittete Kurve für die Parameterbestimmung. Tabelle 5.3 zeigt die Ergebnisse der Parameterbestimmung

mit der Wurzel-2-Methode. Beim Beobachten der Stepped-Sine-Messung kann man meist

Tabelle 5.3: Ergebnisse Shakertest Stepped Sine

| Eigenfrequenz [Hz] | Dämpfung [%] |
|--------------------|--------------|
| 593,5 | 0,0026 |

gut erkennen, bei welcher Frequenz die Eigenfrequenz liegt. Beim Anregen mit einer Frequenz nahe der Eigenfrequenz sinkt die Amplitude des Kraftsignals, bis sie bei der Eigenfrequenz ein Minimum erreicht. Die Amplitude des Beschleunigungssignals ändert sich hingegen nur minimal. Wie in Kapitel 2 gezeigt, berechnet sich die FRF mit $\alpha(\omega) = X/F$. Durch das Absinken der Kraftamplitude bei der Eigenfrequenz ergibt sich der Peak an der Eigenfrequenz im FRF-Diagramm [9]. Die Eigenfrequenz stimmt gut mit den Werten aus dem Impacttest und jenen aus dem Random-Shakertest überein. Die Dämpfung ist deutlich niedriger als im Impacttest. Hier werden wiederum die von Avitable [1] gezeigten Unterschiede als mögliche Gründe angeführt. Auch im Vergleich mit dem Random Test ist die Dämpfung hier geringer. Hier muss angemerkt werden, dass für die Bestimmung der Dämpfungen unterschiedliche Berechnungsmethoden verwendet wurden. Laut Avitable [1] können durch Stepped Sine Tests sehr genaue Ergebnisse erwartet werden, während Ergebnisse aus Random Tests durch Leakage beeinflusst werden.

5.2 Verifikation

Zur Verifikation der Messergebnisse werden die LabVIEW Impacttest Messergebnisse mit Messergebnissen eines Impacttests mit dem LMS-System verglichen. Die Daten der LMS-Messungen und einer LabVIEW-Impactmessung finden sich in den Tabellen 5.4 und 5.5. Da die Welle durch zwei Nuten nicht vollständig rotationsymmetrisch ist, werden hier Tests mit zwei unterschiedlichen Anschlagrichtungen durchgeführt. Die Richtungen sind im Weiteren mit 0° und 90° bezeichnet.

Tabelle 5.4: Ergebnisse LMS und LabVIEW: Welle 0°

| Eigenfrequenz LMS [Hz] | Eigenfrequenz LabVIEW [Hz] | Dämpfung LMS [%] | Dämpfung LabVIEW [%] |
|------------------------|----------------------------|------------------|----------------------|
| 592,3 | 593,1 | 0,07 | 0,32 |
| 1525,2 | 1522,9 | 0,04 | 0,05 |
| 2724,9 | 2720,9 | 0,04 | 0,09 |
| 4045,7 | 4036,7 | 0,14 | 0,09 |

Die Eigenfrequenzen dieser Vergleichsmessungen stimmen gut überein. Es zeigt sich, dass die leichte Asymmetrie der Welle eine Verschiebung der zweiten und der vierten Eigenfrequenz hervorruft. In LMS ist die Verschiebung der vierten Eigenfrequenz nicht sichtbar, allerdings wird die FRF hier nur bis 4095Hz erstellt und diese Frequenz ist

Tabelle 5.5: Ergebnisse LMS und LabVIEW: Welle 90°

| Eigenfrequenz LMS [Hz] | Eigenfrequenz LabVIEW [Hz] | Dämpfung LMS [%] | Dämpfung LabVIEW [%] |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------|
| 592,4 | 593,6 | 0,08 | 0,16 |
| 1525,2 | 1540,2 | 0,04 | 0,05 |
| 2774,9 | 2771,8 | 0,04 | 0,05 |
| 4045,4 | 4128,0 | 0,12 | 0,12 |

somit darin nicht mehr enthalten. Die Dämpfungen weisen im Gegensatz zu den Eigenfrequenzen im Vergleich von LMS zu LabVIEW große Unterschiede auf. Die Dämpfung der ersten Eigenfrequenz ist jeweils in LabVIEW deutlich höher. In der eingangs vorgestellten LabVIEW-Messung war die Dämpfung der ersten Eigenfrequenz deutlich niedriger, daher wird die Plausibilität dieses Wertes kritisch betrachtet. Gründe für den hohen Dämpfungswert können eine ungünstige Position des Beschleunigungssensors oder auch ein zu groß gewählter Frequenzbereich bei der Modalanalyse sein. Es ist daher im LabVIEW-Programm besonders darauf zu achten, dass die Höhe der synthetischen Kurve mit jener der gemessenen Daten übereinstimmt und gegebenenfalls die Frequenzbandbreite für die Modalanalyse angepasst wird.

Für die in Abschnitt 5.1 gezeigten Ergebnisse wird die Messung mehrfach mit verschiedenen Parametern durchgeführt. Ziel ist es, herauszufinden, in wie weit eine Veränderung der Auflösung die Ergebnisse beeinflusst. Einerseits wird durch eine niedrige Auflösung das Maximum des Peaks abgeschwächt, andererseits steigt bei höherer Auflösung die Datenmenge sehr stark an. Abbildung 5.8 zeigt die FRF der Messung, sowie die gefittete Kurve für die Parameterbestimmung mit doppelt so hoher Auflösung im Vergleich zu Abschnitt 5.1. Aus der Berechnung ergeben sich die exakt selben Werte wie in Abschnitt 5.1. Auch bei noch höherer Auflösung ändern sich die Werte nicht bzw. nur sehr gering. Ist die Auflösung niedriger als 1 Hertz, kann die Höhe des Peaks unter Umständen sehr schwer schätzbar sein, daher ist es in der Nähe einer Eigenfrequenz ratsam, zumindest 1 Hertz Auflösung zu wählen.

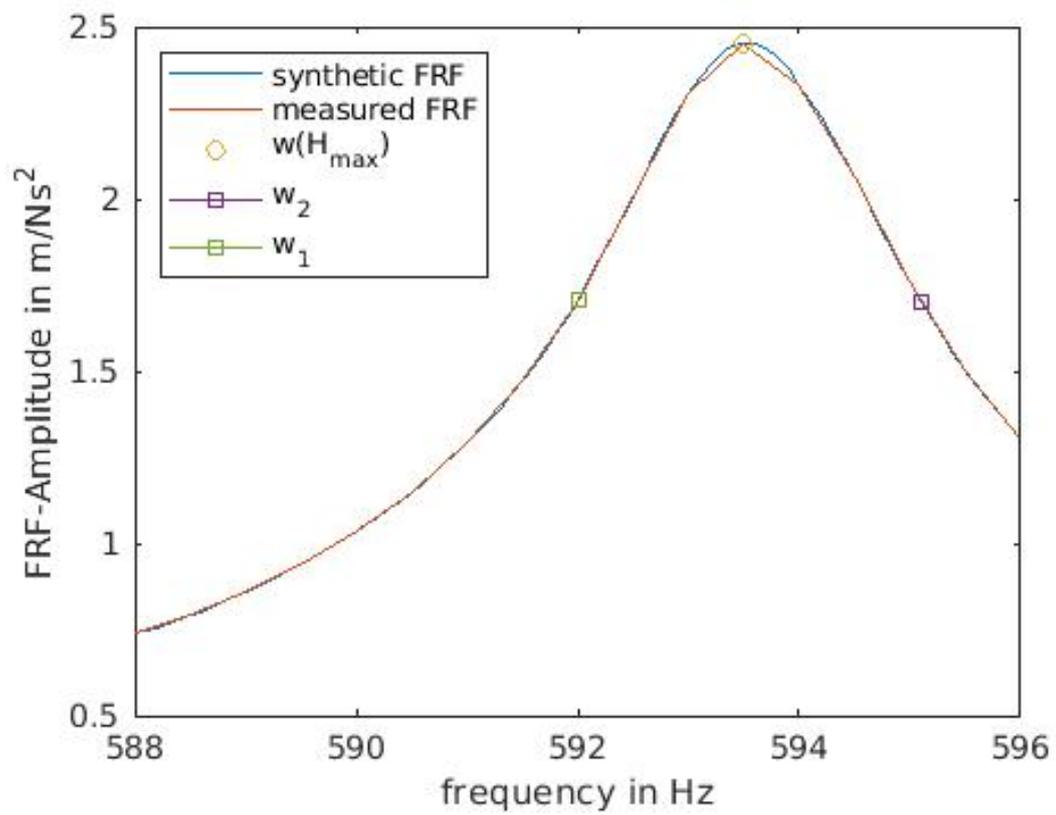


Abbildung 5.8: Modaltest Stepped Sine FRF mit höherer Auflösung

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit sind Programme für die Durchführung von Modaltests erstellt worden. Ein am Institut vorhandenes, veraltetes System ist dadurch ersetzt und zusätzliche Funktionalitäten sind implementiert worden. Die erstellten Programme ermöglichen Modaltests mit einem Modalhammer, sowie mit einem Shaker. Beim Shakertest stehen für die Anregung des Testobjektes drei verschiedene Signalarten zur Auswahl. Nach der Messung der notwendigen Daten kann eine Modalanalyse durchgeführt und die Moden animiert werden. Zusätzlich können die Daten für eine weitere Auswertung in MATLAB exportiert werden.

Die Ergebnisse der Modalanalysen zeigen eine gute Übereinstimmung bei den Eigenfrequenzen. Bei den Dämpfungen sind jedoch große Abweichungen zwischen den Messungen und auch den Analysen festgestellt worden. Hier sind weitere Tests notwendig um festzustellen, woher diese Abweichungen stammen und wie vertrauenswürdige Dämpfungswerte ermittelt werden können. Da sowohl LMS, als auch MATLAB, die Modalanalyse mittels Stabilitätsdiagrammen durchführt, ist ein Vergleich von Impacttests mit beiden Systemen sinnvoll. In der Arbeit ist auch mehrfach darauf hingewiesen worden, dass die ermittelten Werte aus der Modalanalyse immer durch einen Vergleich der FRF aus den Messwerten mit der synthetischen FRF auf Plausibilität untersucht werden müssen und gegebenenfalls mehrere Analysen für unterschiedliche Frequenzbereiche (unter Umständen auch mit unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung) durchgeführt werden sollten. Tests mit der Sine Chirp Methode sind bisher kaum durchgeführt worden. Laut Avitable [1] könnten dadurch sehr gute FRFs ermittelt werden, daher ist es interessant, ob eine qualitative Steigerung im Vergleich zu den anderen Methoden erkennbar ist und ob die Implementierung der Methode fehlerfrei ist. Zudem sind Testungen mit unterschiedlichen Druckstangen von Interesse, um die Abstimmung des Messaufbaus zu optimieren. Hier sollten immer Vergleiche mit Impacttests stattfinden. Da diese Arbeit während der COVID-19 Pandemie und den damit einhergehenden Beschränkungen, im Speziellen dem nur eingeschränkt möglichen Zugang zur Technischen Universität Graz, fertiggestellt worden ist, konnten keine weiteren Untersuchungen und ergänzenden Daten zur These von Avitable [1] eingearbeitet werden. Bei Shakertests ist das Problem aufgetreten, dass sich bei längeren Messungen das Wachs bei der Befestigung des Shakers (Kraftsensors) an der Welle gelöst hat und die Messung dadurch neu gestartet werden musste. Vor allem bei zeitaufwändigen Stepped Sine Tests kann dies problematisch sein und zu einem erheblichen Mehraufwand führen. Dieses Problem könnte durch eine alternative Befestigung mit höherer Adhäsion (z.B. Zahnzement) gelöst werden. Bei Stepped Sine Tests müssen die Messdaten keiner Fensterung unterworfen wer-

den, jedoch sollten sie für die Fouriertransformation eine ganzzahlige Schwingungsanzahl beinhalten. Beim durchgeführten Auswertungsbeispiel der ersten Eigenfrequenz sind die Frequenzspektren kontrolliert worden und es ist eine sehr geringe Streuung festgestellt worden. Für eine höhere Frequenz bzw. eine andere Testkonfiguration könnte die Streuung aber deutlich höher ausfallen und eine Korrektur der Anzahl der zu betrachtenden Messwerte würde sich als notwendig erweisen.

Die im Zuge dieser Arbeit erstellten Programme werden am Institut für Mechanik an der Technischen Universität Graz für Modaltests für die Verifizierung von Parametern aus numerischen Modellen verwendet. Durch die Verifizierung mit dem vorhandenen LMS-System sind bei den ermittelten Eigenfrequenzen und Eigenformen sehr geringe Abweichungen festgestellt worden. Die Dämpfungen weisen größere Abweichungen auf, wobei die Gründe dafür noch näher untersucht werden müssen. Messungen können von nun an benutzerfreundlich und mit aktuellen Betriebssystemen durchgeführt werden, womit die Aufgabenstellung aus Kapitel 1 erfüllt worden ist.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | ungedämpfter Zweimassenschwinger | 10 |
| 2.2 | Freischnitt ungedämpfter Zweimassenschwinger | 10 |
| 2.3 | Dreidimensionale Darstellung einer FRF mit einem Freiheitsgrad [9] | 15 |
| 2.4 | Amplituden- und Phasengang (oben) und Real- und Imaginärteil (unten) einer FRF [17] | 16 |
| 2.5 | Nyquist Plot einer Rezeptanz FRF [12] | 17 |
| 2.6 | SDOF Akzeleranz FRF [9] | 17 |
| 2.7 | FRF mit Variation der Dämpfung [1] | 18 |
| 2.8 | FRF eines MDOF Systems (a) Gesamt-FRF (b) Anteil der einzelnen Moden an der Gesamt-FRF [1] | 18 |
| 2.9 | einseitig eingespannter Träger [1] | 18 |
| 2.10 | Aufbau der FRF-Matrix [1] | 19 |
| 2.11 | Admittanz Punkt-FRF (oben) und Transfer-FRF (unten) [9] | 20 |
| 2.12 | Eigenformen aus dem Imaginärteil der Frequenzgangsmatrix [1] | 21 |
| 2.13 | Peak Picking Methode [12] | 23 |
| 2.14 | Nyquist Graph zur Bestimmung der modalen Parameter [9] | 24 |
| 2.15 | Verdrehung und Verschiebung im Nyquist Graph [12] (modifiziert) | 25 |
| 2.16 | Rücktransformation mittels IFT von FRF zu IRF [1] | 25 |
| 2.17 | Aliasing [1] | 27 |
| 2.18 | Aliasing im Frequenzbereich; adaptiert nach [13] | 28 |
| 2.19 | Leakage [9] | 29 |
| 2.20 | Verschiedene Arten von Windows: [9] (a) Rechteck (b) Hanning (c) Cosine Taper (d) Exponential | 30 |
| 2.21 | Effekt des Hanning Fensters an einer diskreten Fouriertransformierten [9] | 30 |
| 2.22 | Anregungs- und Antwortsignal eines Hammerschlags mit Windowing mit exponentiellem Fenster [1] | 34 |
| 3.1 | Layout des Impacttests | 36 |
| 3.2 | Impacttest | 36 |
| 3.3 | Layout des Shakertests | 37 |
| 3.4 | Funktion eines piezoelektrischen Beschleunigungssensors [9] | 38 |
| 3.5 | Funktion eines piezoelektrischen Kraftsensors [9] | 38 |
| 3.6 | Typischer Hammerschlag (a) Zeitdiagramm (b) Frequenzspektrum [9] | 39 |
| 3.7 | Frequenzbereiche unterschiedlicher Hammerspitzen [3] | 39 |
| 3.8 | Schematischer Aufbau eines elektrodynamischen Shakers [11] | 40 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.1 | Frontpanel: Testing Configuration | 42 |
| 4.2 | Triggerparameter | 42 |
| 4.3 | Frequenzspektrum eines Windows [6] | 44 |
| 4.4 | Frequenzspektrenvergleich häufig verwendeter Fenster [7] | 45 |
| 4.5 | Frequenzspektren der <i>Blackman-Windows</i> [6] | 45 |
| 4.6 | Frequenzspektren der <i>Bartlett-Hanning-Windows</i> [6] | 46 |
| 4.7 | Frontpanel: FRF Measurement | 47 |
| 4.9 | guter und schlechter Hammerschlag | 48 |
| 4.10 | Frontpanel: Modal Analysis | 49 |
| 4.11 | Frontpanel: Mode Animation | 50 |
| 4.12 | Blockdiagramm: Programmaufbau | 50 |
| 4.13 | Blockdiagramm: Datenerfassung | 51 |
| 4.14 | Blockdiagramm: Modalanalyse | 52 |
| 4.15 | Blockdiagramm: Animation der Residuen | 53 |
| 4.16 | Frontpanel: Testing Configuration | 54 |
| 4.17 | Frontpanel: FRF measurement | 55 |
| 4.18 | Blockdiagramm: Datenerfassung-White Noise | 56 |
| 4.19 | Blockdiagramm: Datenerfassung-Sine Chirp | 56 |
| 4.20 | Blockdiagramm: Datenerfassung Stepped Sine | 57 |
| 4.21 | Blockdiagramm: FRF-Erstellung Stepped Sine | 58 |
| 4.22 | Stabilitätsdiagramm | 59 |
| 4.23 | Dämpfungsbestimmung in MATLAB | 60 |
| 5.1 | Modalanalyse Impacttest Welle | 61 |
| 5.3 | Eigenformen der Welle | 62 |
| 5.4 | Modaltest Random: FRFs | 63 |
| 5.5 | Modaltest Random: Summen-FRF und synthetische FRF | 64 |
| 5.7 | Eigenformen der Welle | 65 |
| 5.8 | Modaltest Stepped Sine FRF mit höherer Auflösung | 68 |
| A.1 | NI MAX: Netzwerkgerät reservieren | 71 |
| A.2 | NI MAX: Neuen Task erstellen | 72 |
| A.3 | NI MAX: Beschleunigungssensor konfigurieren | 73 |
| A.4 | NI MAX: Hammer konfigurieren | 74 |
| A.5 | Beschleunigungssensor kalibrieren | 75 |
| A.6 | Kalibrierassistent: allgemeine Einstellungen | 76 |
| A.7 | Kalibrierassistent: Kalibrierung | 76 |
| A.8 | Blockdiagramm Impacttest | 77 |
| A.9 | Beispiel Messpunktdatei | 78 |
| A.10 | Impacttest: Testing Configuration | 78 |
| A.11 | Triggerparameter | 79 |
| A.12 | Frontpanel: FRF Measurement | 80 |

| | |
|--|-----|
| A.13 Frontpanel: Modal Analysis | 82 |
| A.14 Frontpanel: Mode Animation | 83 |
| B.1 NI MAX: Netzwerkgerät reservieren | 86 |
| B.2 NI MAX: Neuen Task erstellen | 87 |
| B.3 NI MAX: Beschleunigungssensor konfigurieren | 88 |
| B.4 NI MAX: Kraftsensor konfigurieren | 89 |
| B.5 NI MAX: Shaker konfigurieren | 90 |
| B.6 Beschleunigungssensor kalibrieren | 91 |
| B.7 Kalibrierassistent: allgemeine Einstellungen | 92 |
| B.8 Kalibrierassistent: Kalibrierung | 92 |
| B.9 Blockdiagramm Shakertest | 93 |
| B.10 Beispiel Messpunktdatei | 94 |
| B.11 Stepped Sine: Testing Configuration | 94 |
| B.12 White Noise: Testing Configuration | 96 |
| B.13 White Noise: FRF Measurement | 98 |
| B.14 Sine Chirp: Testing Configuration | 99 |
| B.15 Sine Chirp: FRF Measurement | 101 |
| B.16 Frontpanel: Modal Analysis | 102 |
| B.17 Frontpanel: Mode Animation | 103 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Fensterparameter | 44 |
| 4.2 | Übersicht zur Verwendung von Glättungsfenstern [5] | 47 |
| 5.1 | Ergebnisse Impacttest | 62 |
| 5.2 | Ergebnisse Shakertest Random | 64 |
| 5.3 | Ergebnisse Shakertest Stepped Sine | 66 |
| 5.4 | Ergebnisse LMS und LabVIEW: Welle 0° | 66 |
| 5.5 | Ergebnisse LMS und LabVIEW: Welle 90° | 67 |

Literatur

- [1] P. Avitable. *Modal Testing - A Practitioner's Guide*. John Wiley & Sons Ltd, 2018.
- [2] M. Böswald u. a. „A Review of Experimental Modal Analysis Methods with respect to their Applicability to Test Data of Large Aircraft Structures“. In: *Proceedings of ISMA2006*. 2006.
- [3] Kistler Instrument Corporation. *Impulse Force Hammer; Low Force Range, Type 9722A500*. 2005.
- [4] National Instruments Corporation. *Modal Analysis in LabVIEW*. 2016. URL: <https://www.ni.com/de-at/innovations/white-papers/09/modal-analysis-in-labview.html> (besucht am 11.02.2020).
- [5] National Instruments Corporation. *Schnelle Fouriertransformation (FFT) und Fensterfunktion*. 2019. URL: <https://www.ni.com/de-at/innovations/white-papers/06/understanding-ffts-and-windowing.html> (besucht am 18.03.2020).
- [6] National Instruments Corporation. *Smoothing Windows*. 2018. URL: <http://zone.ni.com/reference/de-XX/help/371361R-0113/TOC105.htm> (besucht am 16.03.2020).
- [7] National Instruments Corporation. *Software filtering: Windowing - General Analog Concepts*. 2020. URL: <https://www.ni.com/de-at/support/documentation/supplemental/06/software-filtering---windowing---general-analog-concepts.html> (besucht am 09.03.2020).
- [8] National Instruments Corporation. *Sound and Vibration Toolkit User Manual*. 2004.
- [9] D. J. Ewins. *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. Research Studies Press LTD., 2000.
- [10] R. Gasch, K. Knothe und R. Liebich. *Strukturdynamik - Diskrete Systeme und Continua*. Hrsg. von Springer Vieweg. 2012.
- [11] C. Hansen u. a. *Active Control of Noise and Vibration*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
- [12] J. He und Z. F. Fu. *Modal Analysis*. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [13] L. B. Ibsen und M. Liingaard. *Experimental Modal Analysis*. Techn. Ber. 10. Aalborg University: Department of Civil Engineering, 2006.
- [14] F. Lembregts und J. Leuridan. „Frequency Domain Direct Parameter Identification for Modal Analysis: State Space Formulation“. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* (1990).

- [15] P. Mohindru, R. Khanna und S. S. Bhatia. „Spectral Analysis of Generalized Triangular and Welch Window Functions using Fractional Fourier Transform“. In: *Automatika* 57 (2016).
- [16] K. M. M. Prabhu. *Window Functions and Their Applications in Signal Processing*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2014. ISBN: 978-1-4665-1584-0.
- [17] Agilent Technologies. *Fundamentals of Modal Testing*. 2000. URL: <http://www.modalshop.com/techlibrary/Fundamentals%20of%20Modal%20Testing.pdf> (besucht am 11.02.2020).

A Betriebsanleitung Impacttest

Messaufbau

Zuerst muss der Messaufbau nach Abbildung 3.2 aufgebaut werden. Es kann entweder das NI cDAQ 9184 Ethernet-Chassis oder das NI cDAQ 9174 USB-Chassis mit dem analogen Eingangsmodul NI 9234 verwendet werden. Der Hammer muss am Kanal 1 angeschlossen werden und der Beschleunigungssensor mit X am Kanal 2, Y am Kanal 3 und Z am Kanal 4.

Netzwerkgerät reservieren

- NI MAX starten

Die Programmoberfläche von MAX ist in Abbildung A.1 sichtbar.

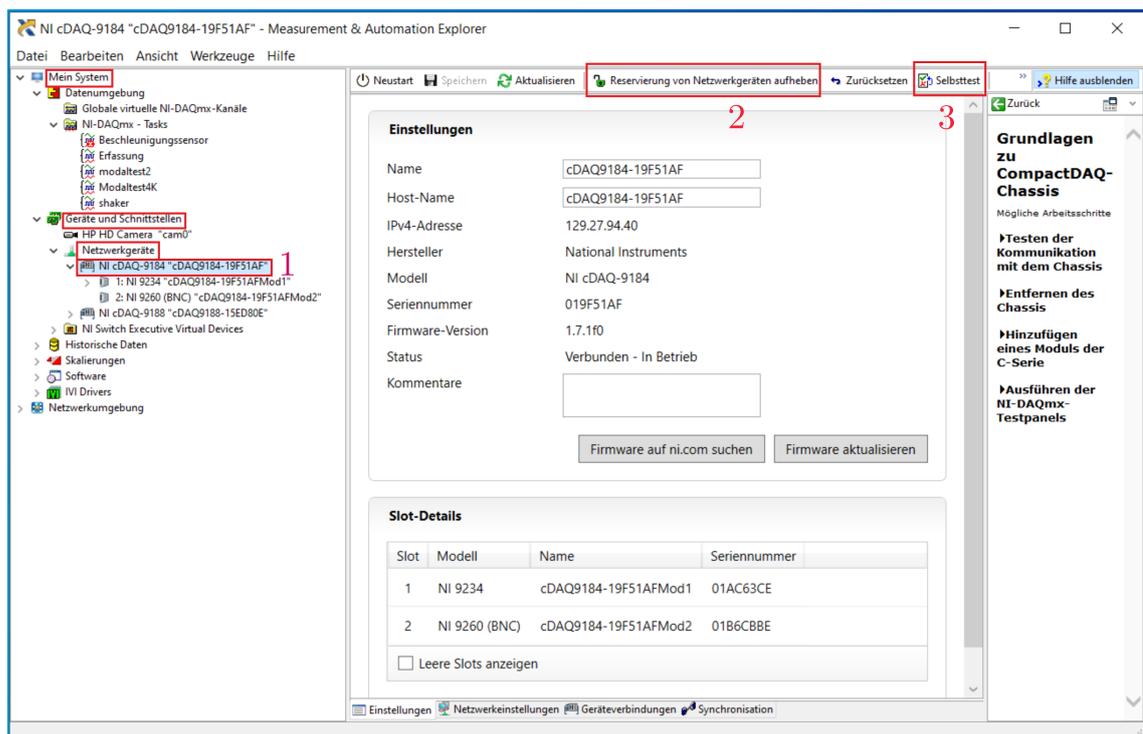


Abbildung A.1: NI MAX: Netzwerkgerät reservieren

Bei der Verwendung des Ethernet-Chassis muss dieses zuerst reserviert werden.

- Im Menübaum links zu **Mein System** → **Geräte und Schnittstellen** → **Netzwerkgeräte** → **NI cDAQ-9184** (1) navigieren

- rechts **Reservierung von Netzwerkgeräten aufheben (2)** auswählen

Es erscheint **Die Reservierung des Netzwerkgeräts wurde aufgehoben.**

- **Netzwerkgerät reservieren** wählen

Dies wird mit **Das Netzwerkgerät wurde reserviert** bestätigt. Bei Verwendung des USB-Chassis ist dieser Schritt nicht notwendig. Eine Prüfung ob das Gerät erreichbar ist, kann in beiden Fällen durch **Selbsttest (3)** erfolgen. **Der Selbsttest wurde erfolgreich durchgeführt** wird angezeigt, wenn das Gerät erreichbar ist.

Task erstellen

- Im Menübaum zu **Mein System** → **Datenumgebung** → **NI-DAQmx - Tasks** (1) navigieren
- entweder einen vorkonfigurierten Task auswählen oder **NI-DAQmx-Tasks** markieren und **Neuen NI-DAQmx-Task erzeugen...** (2) auswählen um einen neuen Task zu erstellen

Abbildung A.2 zeigt die Vorgehensweise.

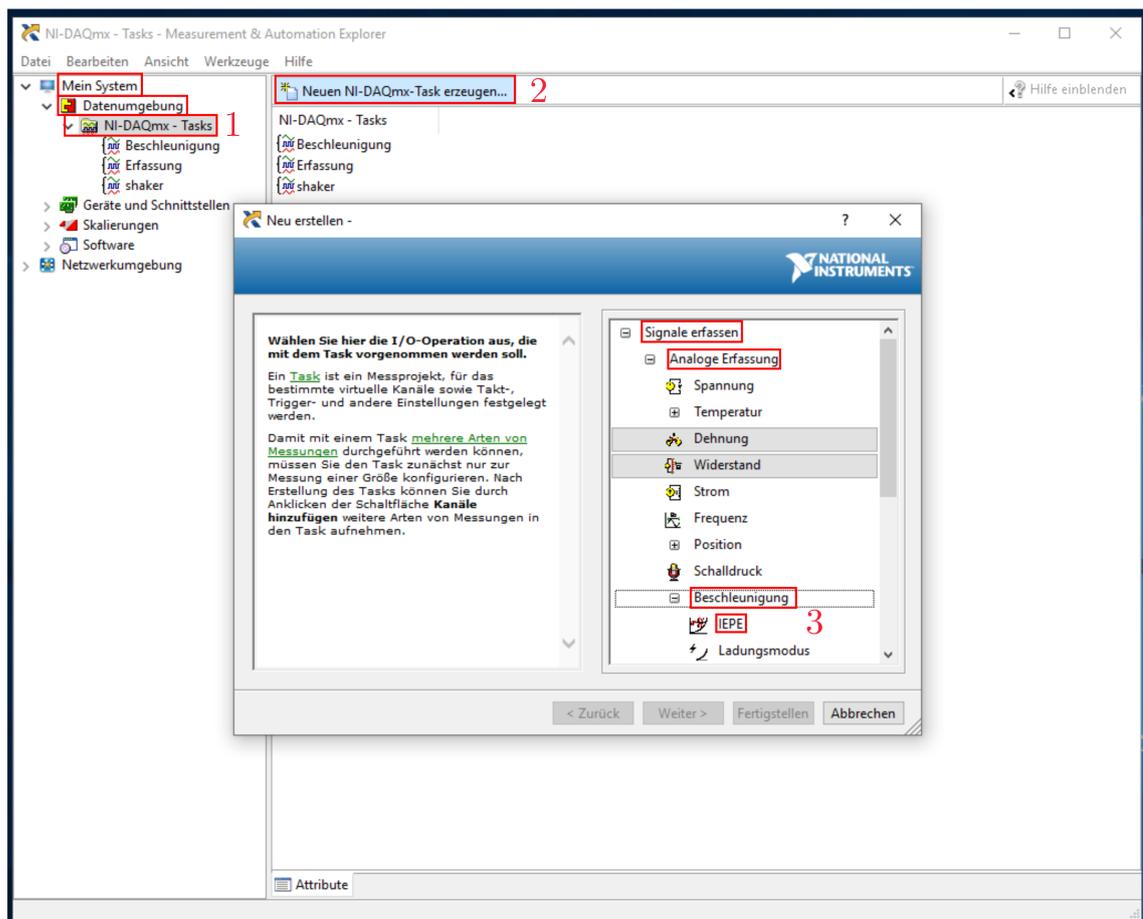


Abbildung A.2: NI MAX: Neuen Task erstellen

Ein Fenster zum Hinzufügen von Kanälen zum Task erscheint.

- In **Signale erfassen** → **Analoge Erfassung** → **Beschleunigung** → **IEPE (3)** auswählen
- Im nächsten Fenster den Kanal auswählen, an welchem der Sensor angeschlossen ist (für den Beschleunigungssensor können mehrere Kanäle gleichzeitig ausgewählt werden, hier: Kanäle 2-4)
- **Fertigstellen** wählen
- Den Task links umbenennen
- In Abbildung A.3 sind die Kanaleinstellungen für die drei Kanäle des Beschleunigungssensors sichtbar. Dazu muss der Kanal ausgewählt werden. Unter **Signaleingangsbereich** müssen die Werte aus dem Datenblatt eingetragen werden (Hier: Max.: 5, Min.: -5 und Skalierte Einheit: m/s^2). Die **Empfindlichkeit** wird hier nicht eingestellt, sie wird durch die Kalibrierung festgelegt.

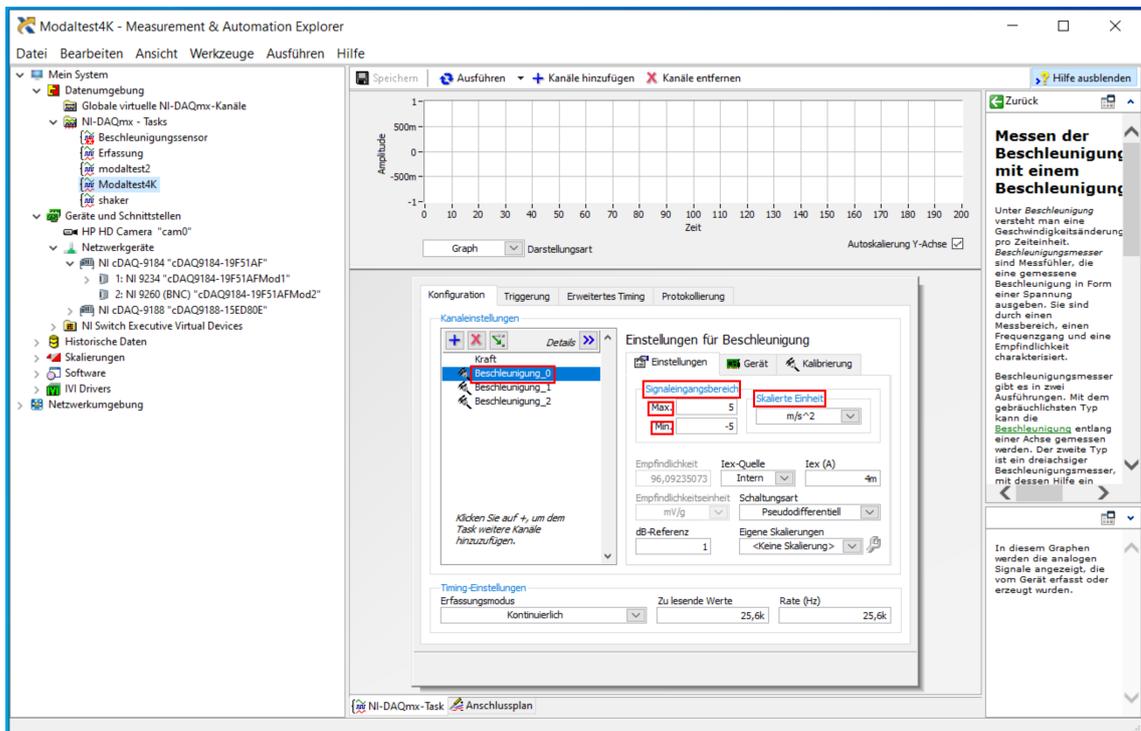


Abbildung A.3: NI MAX: Beschleunigungssensor konfigurieren

- Mit + (1) können weitere Kanäle zum Task hinzugefügt werden. Für den Modalhammer muss am Kanal 1 ein IEPE Krafteingang festgelegt werden. Abbildung A.4 zeigt die Kanaleinstellungen für den Hammer, dazu muss der Kanal ausgewählt sein (2). Unter **Signaleingangsbereich** (3) müssen die Werte aus dem Modalhammerdatenblatt eingetragen werden (Hier: Max.: 100, Min.: 0 und Skalierte Einheit: Pfund). Falls der verwendete Modalhammer in Newton misst, muss die Skalierung



Abbildung A.5: Beschleunigungssensor kalibrieren

- In MAX den zu kalibrierenden Kanal auswählen und unter **Einstellungen** → **Kalibrierung** eine eventuell vorhandene Kalibrierung löschen und eine neue Kalibrierung erstellen

Der Kalibrierassistent wird aufgerufen und ein Fenster nach Abbildung A.6 erscheint.

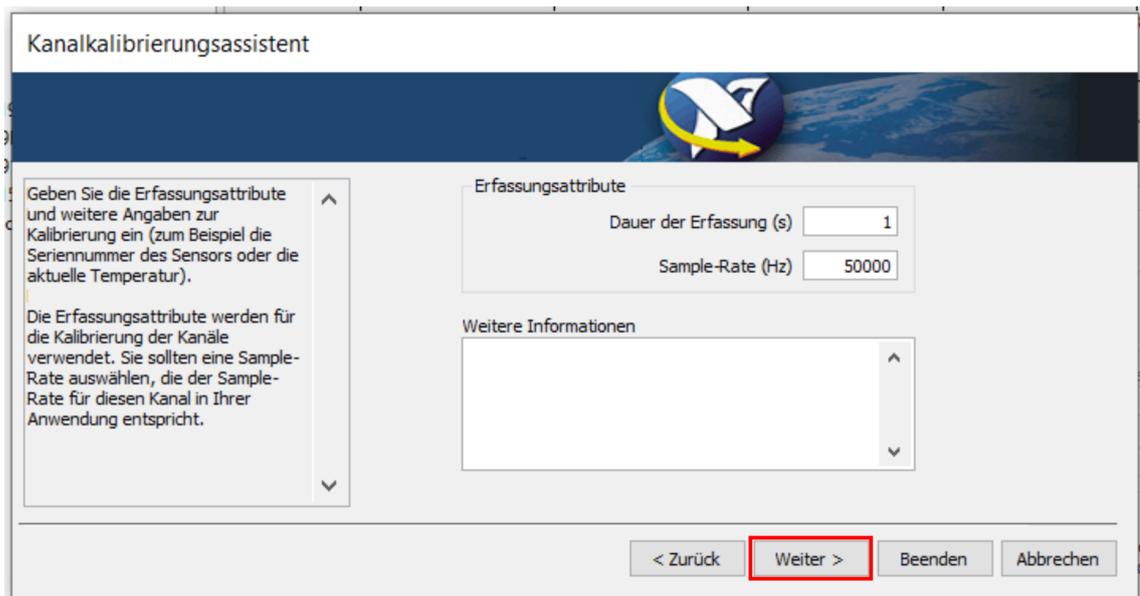


Abbildung A.6: Kalibrierassistent: allgemeine Einstellungen

- Standardwerte mit **weiter** übernehmen

Im nächsten Fenster startet die Kalibrierung.

- **Frequenz** und **Beschleunigung** laut Kalibriergerätvorgaben bzw nach Abbildung A.7 einstellen

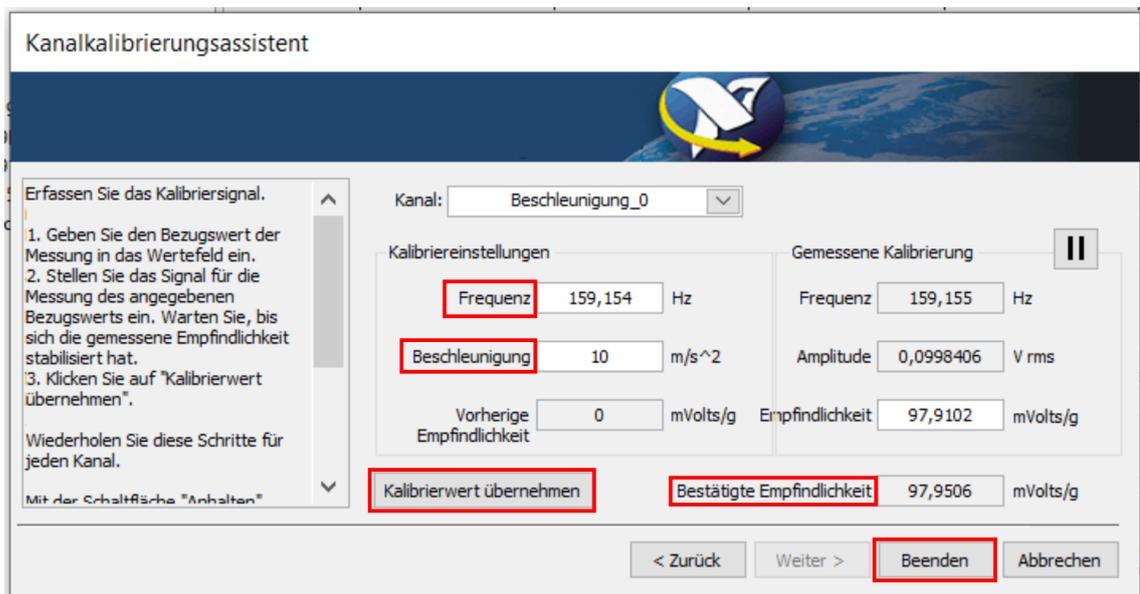


Abbildung A.7: Kalibrierassistent: Kalibrierung

- Startknopf am Kalibriergerät betätigen
- **Kalibrierwert übernehmen** mehrmals betätigen

| Line | Value |
|------|-------|
| 1 | 17 |
| 2 | 50 |
| 3 | 80 |
| 4 | 110 |
| 5 | 140 |
| 6 | 170 |
| 7 | 200 |
| 8 | 230 |
| 9 | 260 |
| 10 | 290 |
| 11 | 320 |
| 12 | 350 |
| 13 | 380 |
| 14 | 410 |
| 15 | 440 |

Abbildung A.9: Beispiel Messpunktdatei

Messung konfigurieren

- Programm starten (1)

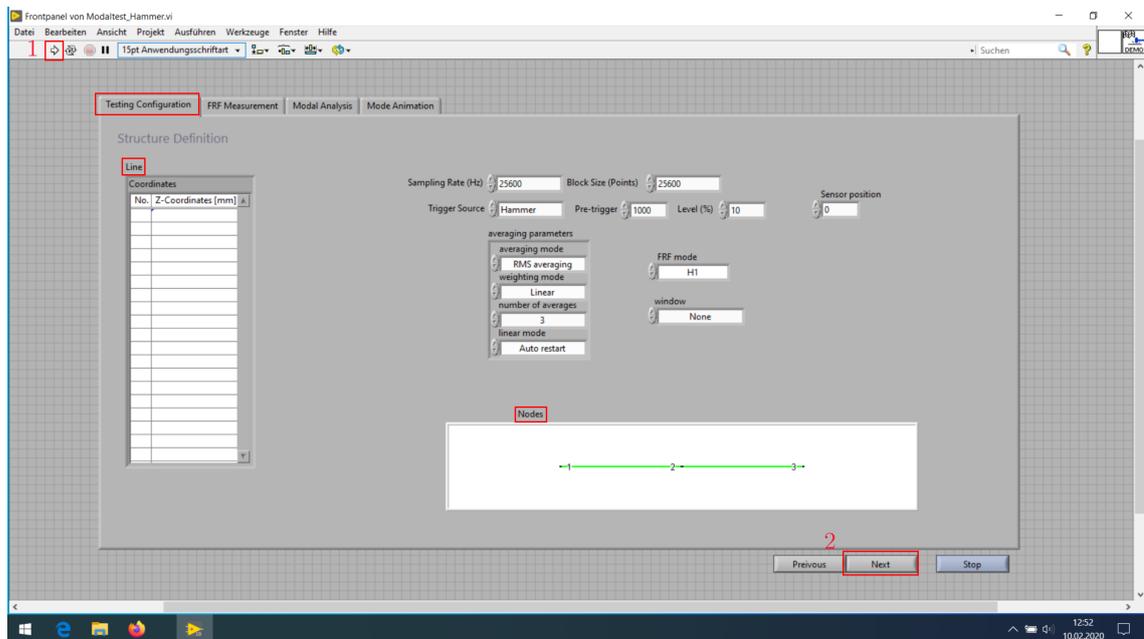


Abbildung A.10: Impacttest: Testing Configuration

Ein Fenster erscheint, in welchem die Datei mit den Messpunkten ausgewählt werden soll. In der Tabelle **Linie** wird der Inhalt der Datei angezeigt. Die Darstellung **Nodes** soll die Messpunkte zusätzlich visualisieren.

- Test konfigurieren
 - Standardmäßig können die Werte aus Abbildung A.10 eingetragen werden.
 - Eigene Werte können nach folgenden Gesichtspunkten ausgewählt werden:

- **Sampling Rate** ist die Abtastfrequenz. Diese wird durch das analoge NI Eingangsmodul vorgegeben. Die Masterfrequenz $f_M = 13,1072MHz$. Die Berechnung von möglichen Sample-Frequenzen

$$f_s = \frac{f_M/256}{n} \quad (A.1)$$

für $n = 1$ bis 31 . Damit ergeben sich Frequenzen von $51200Hz$, $25600Hz$, $17067Hz$ usw bis $1652Hz$.

- **Block Size** legt fest, wie viele Werte bei einem Schlag aufgenommen werden sollen. Entspricht Block Size der Sampling Rate, so werden 1 Sekunde lang Messwerte aufgezeichnet.
- **Trigger-Source** gibt an, welches Signal für den Trigger verwendet werden soll. Die Bedeutung von Pre-Trigger und Level ist in Abbildung A.11 dargestellt.
- **Level:** Ab dieser Signalthöhe wird der Trigger ausgelöst
- **Pre-Trigger:** Anzahl der Werte, welche vor dem Auslösen des Trigger abgetastet werden

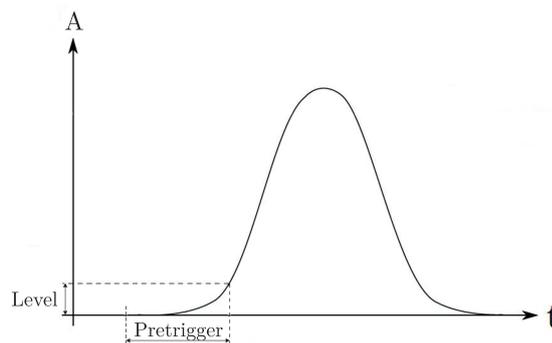


Abbildung A.11: Triggerparameter

- Bei **Sensorposition** wird angegeben, an welcher Messposition der Beschleunigungssensor aufgeklebt wurde.
- **Averaging Parameters**
 - **averaging mode**
 - **No averaging:** Nur ein Schlag
 - **Peak hold:** Der Maximalwert der Einzelmessungen wird verwendet
 - **Vector averaging:** Real- und Imaginärteil werden separat gemittelt (Verringerung von Grundrauschen bei Zufallssignalen)
 - **RMS averaging:** Energie bzw. Leistung des Signals wird gemittelt (reduziert Signalschwankungen, aber nicht Grundrauschen)

- weighing mode
 - **linear:** jede Messung wird gleich gewichtet
 - **exponential:** spätere Messungen werden stärker gewichtet
- **number of averages:** Anzahl der Schläge pro Knoten
- **linear mode**
 - **Auto restart:** Messung startet automatisch erneut
 - **No restart:** Messung startet nicht automatisch erneut
- **FRF mode**
 - **H1:** bei verrauschtem Ausgangssignal
 - **H2:** bei verrauschtem Eingangssignal
 - **H3:** Rauschen am Eingangs- und Ausgangssignal
- **window:** Bei Impactmessungen wird normalerweise kein Fenster verwendet. Klingt das Signal nicht innerhalb der Messdauer ab, kann das **exponential**-window verwendet werden.
- Mit **Next** weiterschalten

Messung starten

Durch weiterschalten wird der Reiter FRF Measurement (1) laut Abbildung A.12 im Programm angezeigt.

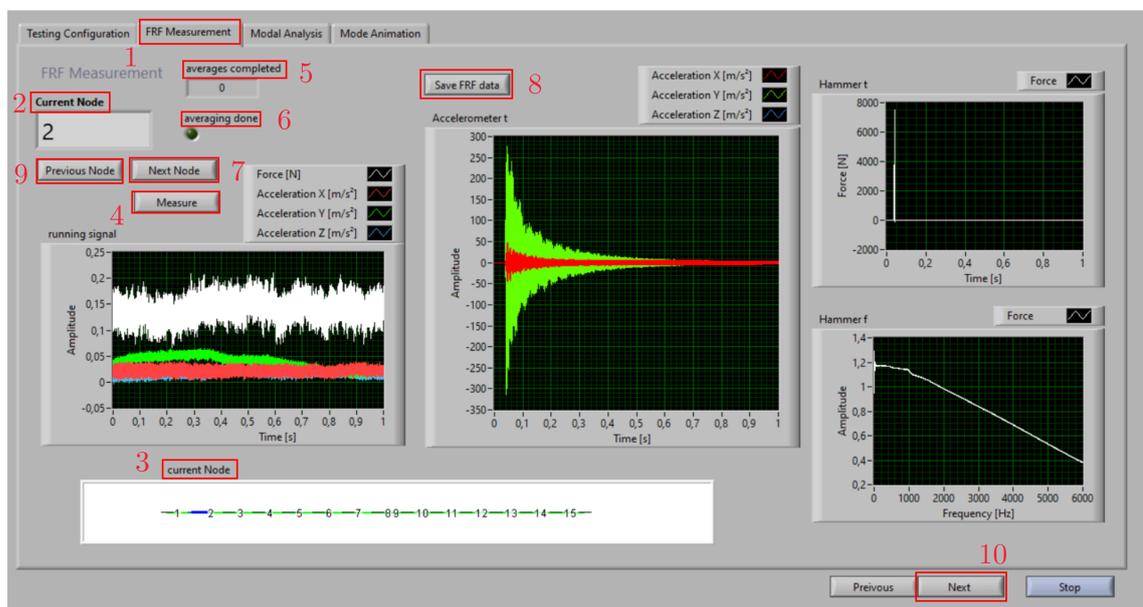


Abbildung A.12: Frontpanel: FRF Measurement

In **Current Node (2)** wird der momentan aktive Messpunkt angezeigt. An diesem Messpunkt wird die Welle mit dem Modalhammer angeschlagen. Zusätzlich gibt es eine

Visualisierung der Messpunkte (3), wobei der aktive Messpunkt farblich gekennzeichnet ist.

- Die Messung mit **Measure (4)** starten

In **running signal** sind die Sensorwerte dargestellt.

- Welle mit dem Modalhammer anschlagen

Wird ein Schlag detektiert, erscheinen in den Diagrammen unterschiedliche Darstellungen des Schlages. In **Accelerometer t** werden die Beschleunigungssignale in alle 3 Richtungen gezeigt. Kriterium hier ist, dass sie nach Möglichkeit symmetrisch sein sollen, was eine gerade Anschlagrichtung bedeutet. **Hammer t** zeigt den Zeitverlauf des Hammersignals. Hier sollen Doppelschläge erkannt werden. In **Hammer f** ist das Frequenzspektrum des Hammerschlags zu sehen. Dieses soll im Frequenzbereich, welcher analysiert werden soll, möglichst konstant sein. Eine detaillierte Erklärung über Kriterien für einen guten Schlag finden sich in Abschnitt 4.1.2.

- Schlag mit **Accept** akzeptieren oder mit **Reject** verwerfen

Das Feld **averages completed (5)** zählt die mit Accept bestätigten Schläge. Stimmt diese mit der eingestellten **Number of Averages** überein, leuchtet **averaging done (6)** und die Messaufzeichnung stoppt.

- Mit **Next Node (7)** zum nächsten Messpunkt weiterschalten
- **Measure (4)** startet die Messung des nächsten Messpunkts
- Vorgangsweise für alle Messpunkte wiederholen

Mit **Previous Node (9)** kann die Messaufnahme einzelner Knoten wiederholt werden. Dies kann auch nach einer ersten Inspektion der Daten in den Reitern **Modal Analysis** bzw **Mode Animation** geschehen. Durch **Save FRF data (8)** können die Messdaten in einem *.mat-File abgespeichert werden und für eine weitere Analyse der Daten in MATLAB verwendet werden.

- Mit **Next (10)** zu **Modal Analysis** weiterschalten

Modalanalyse

Abbildung A.13 zeigt den Reiter Modal Analysis (1) des Programms. Hier werden die aufgenommenen Messdaten als FRF dargestellt.

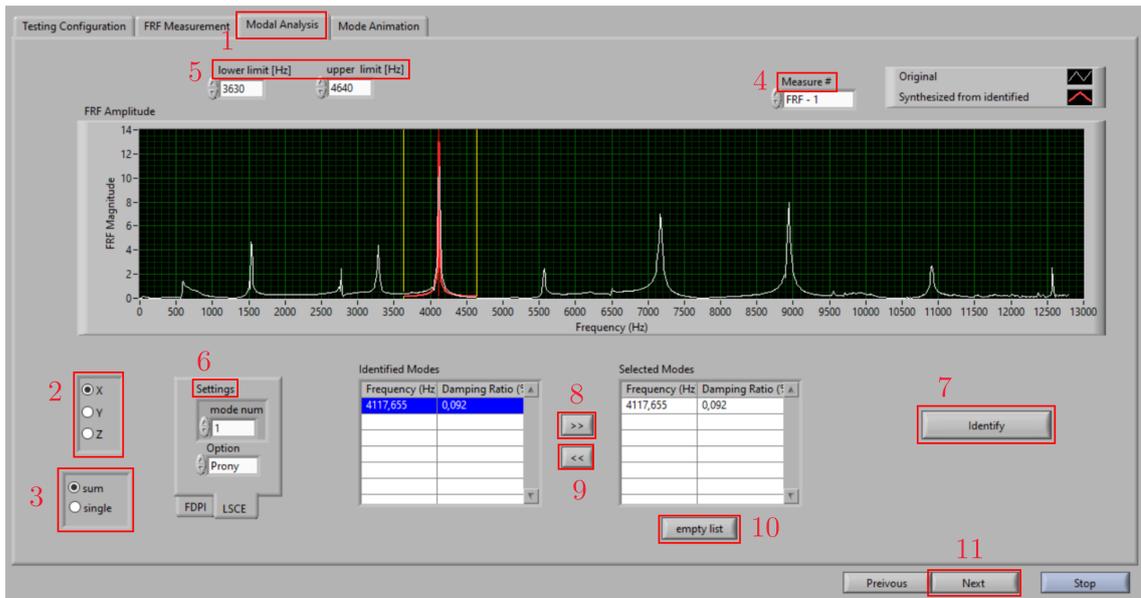


Abbildung A.13: Frontpanel: Modal Analysis

Links unten kann die zu betrachtende Koordinatenrichtung (2) eingestellt werden, sowie die Betrachtung der Summenkurve (alle Messpunkte gemeinsam) oder Einzelkurven (3). Mit **Measure#** (4) kann durch die Einzelkurven geklickt werden. Die Betrachtung der Einzelkurven kann hilfreich sein, um schlechte Messaufnahmen zu identifizieren und einen Messpunkt im Nachhinein erneut zu vermessen.

- Für die Modalanalyse auf Summenkurve und die Koordinatenrichtung auf die Anschlagrichtung des Modalhammers stellen
- Mit den gelben Linien und **lower limit** und **upper limit** (5) den Frequenzbereich für die Modalanalyse auswählen

Unter Settings kann entweder die FDPI- oder die LSCE-Methode für die Modalanalyse verwendet werden. Die Funktion sowie Anwendungshinweise für diese Methoden finden sich in Kapitel 2 im Abschnitt 2.3. Unter **mode num** wird die Anzahl der zu vermutenden Eigenfrequenzen im ausgewählten Bereich angegeben. Mit **extra term** wird die Anzahl der Moden außerhalb des gewählten Frequenzbandes angegeben, um so den Einfluss dieser Moden zu kompensieren. Mit **Option** kann der Berechnungsalgorithmus festgelegt werden. Vor allem für rauschende Signale kann der Matrix Pencil Algorithmus vorteilhaft sein.

- Berechnungsart in **Settings** (6) spezifizieren
- Modalanalyse mit **Identify** (7) starten

In **Identified Modes** werden die berechneten Moden angezeigt. Wird auf einen geklickt, zeigt die rote Linie an, wo er liegt. Im Diagramm wird eine aus den berechneten Eigenfrequenzen erstellte FRF angezeigt. Im Bereich der Eigenfrequenzen sollte sie gut mit der

Original-FRF übereinstimmen. Hohe Dämpfungswerte weisen auf sogenannte *Computational Modes* hin. Sie sind keine Eigenfrequenzen des Systems, sondern ergeben sich durch die Wahl der Berechnungsmethode. Dadurch und durch die rote Linie sollen die wahren Moden identifiziert werden.

- Wahre Moden mit » (8) in **Selected Modes** übernehmen
- Mit « (9) oder **empty list** (10) kann die Liste verändert werden
- Mit **Next** (11) zu **Mode Animation** weiterschalten

Mode Animation

Der Reiter **Mode Animation** (1) des Programms ist in Abbildung A.14 dargestellt.

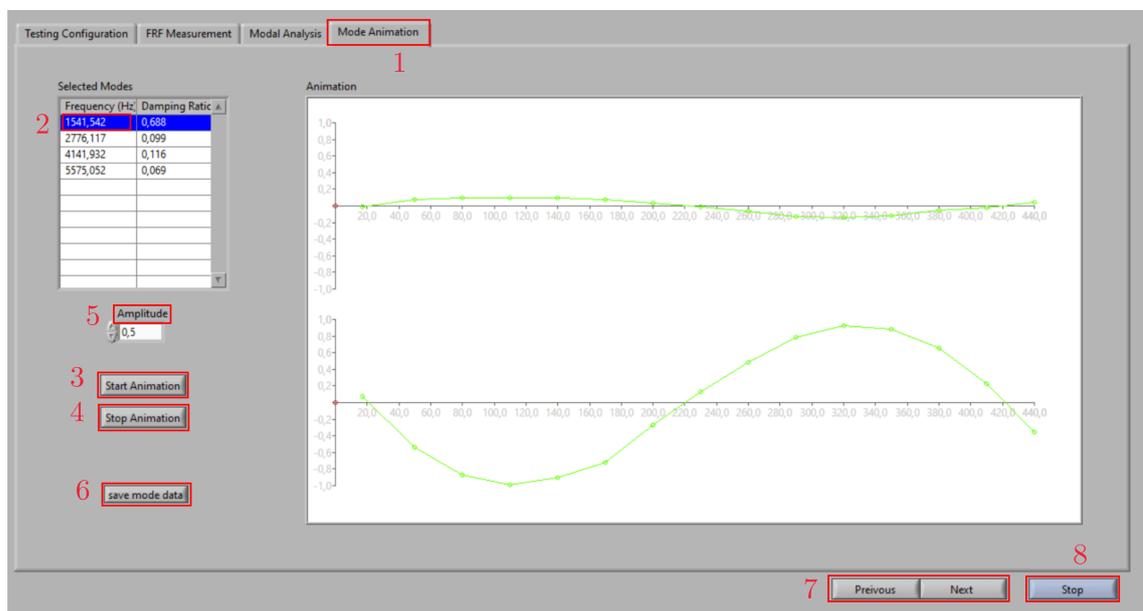


Abbildung A.14: Frontpanel: Mode Animation

Die vorhin ausgewählten Moden sind hier wiederum in **Selected Modes** sichtbar.

- Den zu animierenden Mode in **Selected Modes** auswählen (2)
- Durch **Start Animation** (3) die Animation starten
- Durch die Modes in Selected Modes klicken, um andere Modes zu animieren
- Mit **Stop animation** (4) die Animation beenden

Durch **Amplitude** (5) kann die Höhe des Ausschlag in vertikaler Richtung skaliert werden. Die Animation zeigt oben die xz-Richtung und unten die yz-Richtung der Welle. Die Messpunkte werden durch einen kleinen Kreis dargestellt. Mit **save mode data** (6) können die in Selected Modes angezeigten Daten in einer *.txt-Datei abgespeichert werden. Mit **Previous** und **Next** (7) kann zB zwischen Modal Analysis und Mode Animation hin- und

hergeschaltet werden, um andere Moden zur Animation berechnen zu lassen. Ist an einem Messpunkt ein *Ausreißer* in der Animation, so kann der Messpunkt in FRF Measurement erneut aufgenommen werden.

- **Stop** (8) beendet das Programm

Befindet sich das Programm in der Ausführung einer Berechnung, Darstellung oder Messung, kann es nicht mit Stop beendet werden. In diesem Fall kann es nur durch das Stoppen der LabVIEW-Anwendung abgebrochen werden.

B Betriebsanleitung Shakertest

Messaufbau

Zuerst muss der Messaufbau nach Abbildung 3.3 aufgebaut werden. Das NI cDAQ 9184 Ethernet-Chassis mit dem analogen Eingangsmodul NI 9234 und dem analogen Ausgangsmodul NI 9260 werden für den Shakertest verwendet. Der Kraftsensor am Shaker muss am Kanal 1 des analogen Eingangsmoduls angeschlossen werden und der Beschleunigungssensor mit X am Kanal 2, Y am Kanal 3 und Z am Kanal 4 des Eingangsmoduls. Der Shaker wird mit dem Signalverstärker verbunden und dieser an das analoge NI Ausgangsmodul angeschlossen. Am Shaker wird die Druckstange (Stinger) und darauf der Kraftsensor angebracht. Über den Kraftsensor wird der Shaker schließlich mit der Welle verbunden. Dies kann mit Wachs oder dental cement angebracht werden. Wichtig ist auf Rechtwinkeligkeit beim Positionieren des Shakers zu achten, da ansonsten Anregungen in andere Koordinatenrichtungen hervorgerufen werden.

Netzwerkgerät reservieren

- NI MAX starten

Die Programmoberfläche von MAX ist in Abbildung B.1 sichtbar.

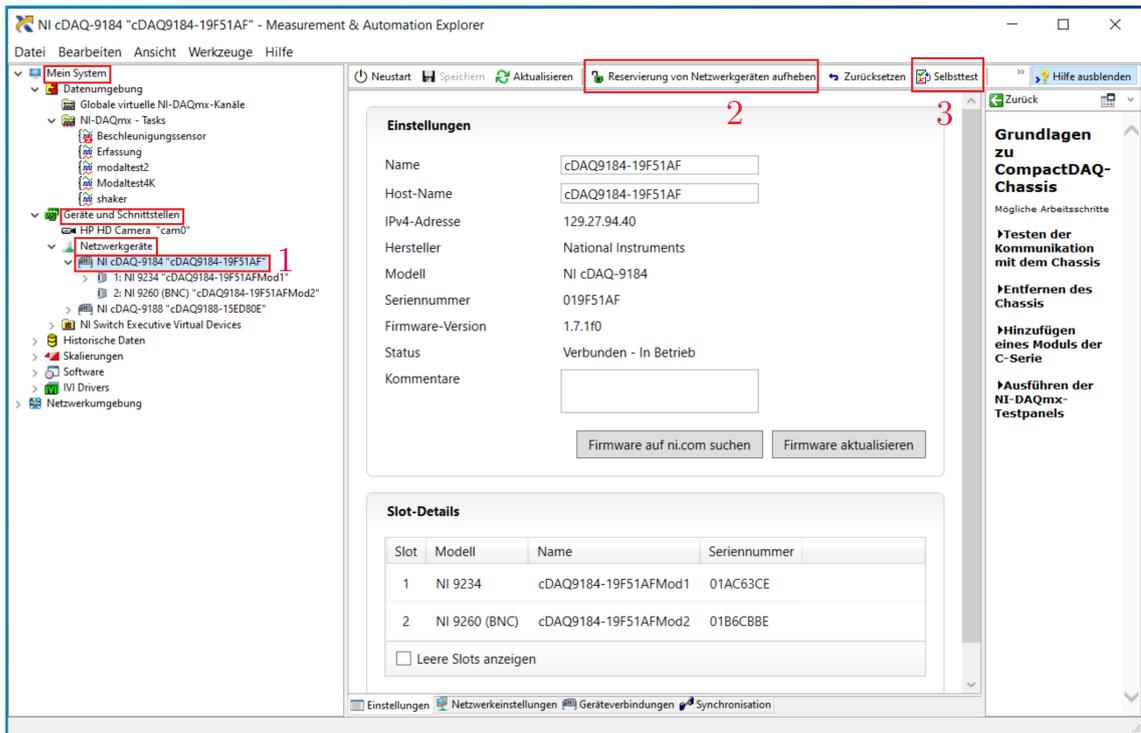


Abbildung B.1: NI MAX: Netzwerkgerät reservieren

Das Ethernet-Chassis muss zuerst für die Verwendung reserviert werden.

- Im Menübaum links zu **Mein System** → **Geräte und Schnittstellen** → **Netzwerkgeräte** → **NI cDAQ-9184** (1) navigieren
- rechts **Reservierung von Netzwerkgeräten aufheben** (2) auswählen

Es erscheint **Die Reservierung des Netzwerkgeräts wurde aufgehoben**.

- **Netzwerkgerät reservieren** wählen

Dies wird mit **Das Netzwerkgerät wurde reserviert** bestätigt. Eine Prüfung, ob das Gerät erreichbar ist, kann durch **Selbsttest** (3) erfolgen. **Der Selbsttest wurde erfolgreich durchgeführt** wird angezeigt, wenn das Gerät erreichbar ist.

Task erstellen

- Im Menübaum zu **Mein System** → **Datenumgebung** → **NI-DAQmx - Tasks** (1) navigieren

Für den Shakertest sind zwei Tasks erforderlich. Einer für die analogen Eingänge und einer für den analogen Ausgang.

- entweder einen vorkonfigurierten Task auswählen oder **NI-DAQmx-Tasks** markieren und **Neuen NI-DAQmx-Task erzeugen...** (2) auswählen um einen neuen Task zu erstellen

Abbildung B.2 zeigt die Vorgehensweise.

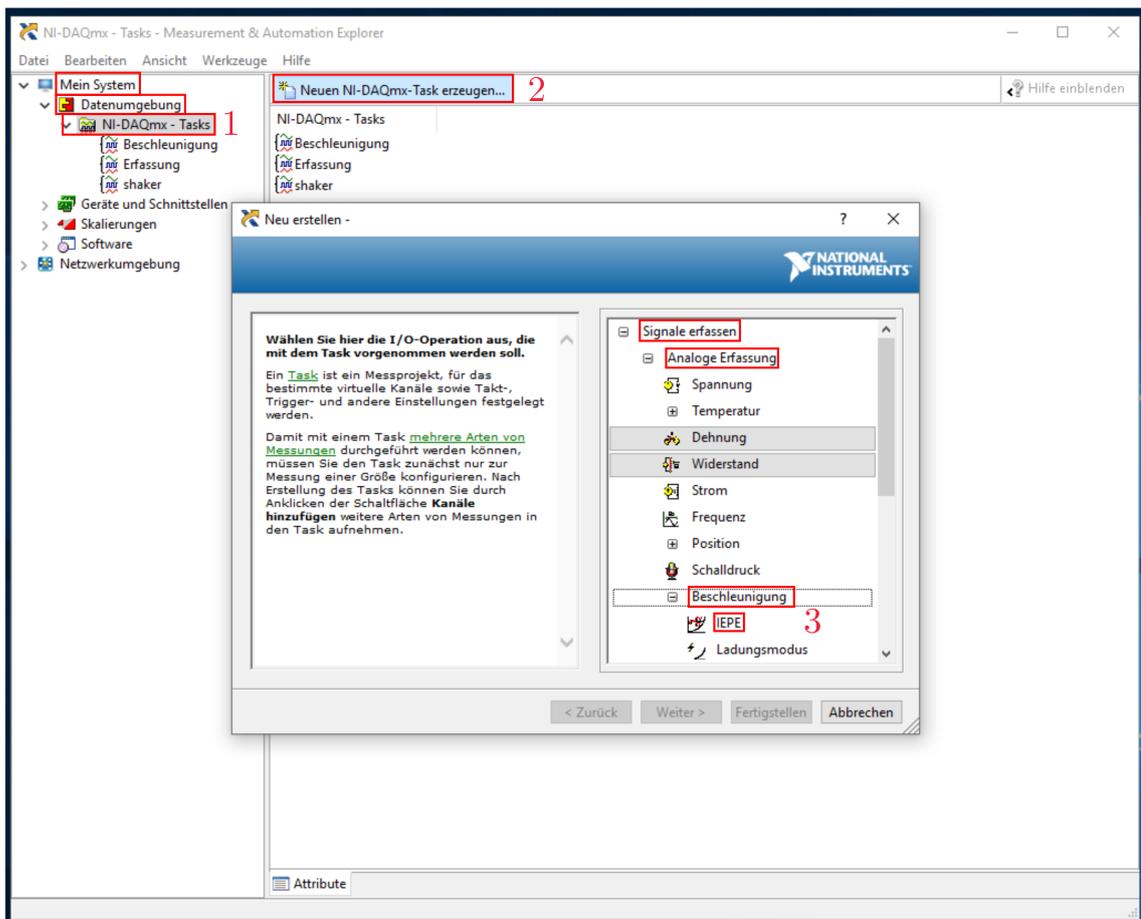


Abbildung B.2: NI MAX: Neuen Task erstellen

Ein Fenster zum Hinzufügen von Kanälen zum Task erscheint.

- In **Signale erfassen** → **Analoge Erfassung** → **Beschleunigung** → **IEPE** (3) auswählen
- Im nächsten Fenster den Kanal auswählen, an welchem der Sensor angeschlossen ist (für den Beschleunigungssensor können mehrere Kanäle gleichzeitig ausgewählt werden (hier: Kanäle 2-4))
- **Fertigstellen** wählen
- Den Task links umbenennen
- Für den Beschleunigungssensor müssen die Kanäle 2-4 (1) als IEPE Beschleunigungseingänge festgelegt werden. In Abbildung B.3 sind die Kanaleinstellungen die drei Kanäle des Beschleunigungssensors sichtbar. Unter **Signaleingangsbereich** (2) müssen die Werte aus dem Datenblatt eingetragen werden (Hier: Max.: 5, Min.: -5 und Skalierte Einheit: m/s^2). Die **Empfindlichkeit** wird hier nicht eingestellt, sie wird durch die Kalibrierung festgelegt.

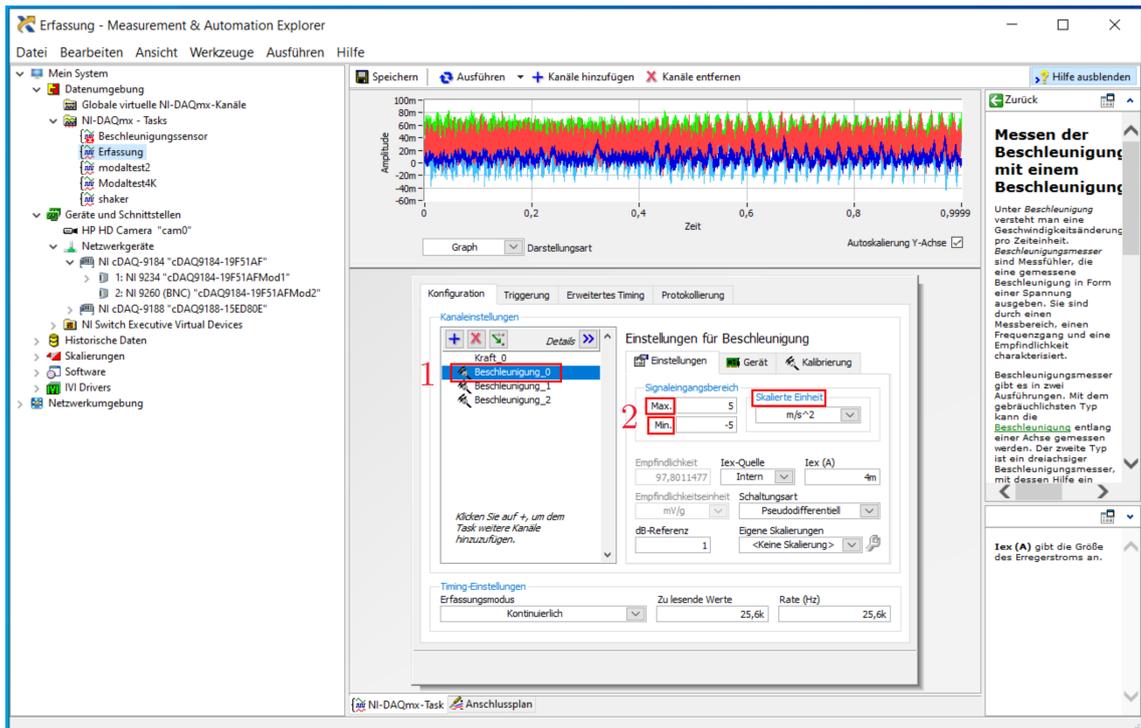


Abbildung B.3: NI MAX: Beschleunigungssensor konfigurieren

- Mit + (1) können weitere Kanäle zum Task hinzugefügt werden. Für den Kraftsensor muss am Kanal 1 ein IEPE Krafteingang (2) festgelegt werden. Abbildung B.4 zeigt die Kanaleinstellungen für den Hammer. Unter **Signaleingangsbereich** (3) müssen die Werte aus dem Datenblatt eingetragen werden (Hier: Max.: 196, Min.: -196 und Skalierte Einheit: Newton). Ebenso müssen die **Empfindlichkeitseinheit** und die **Empfindlichkeit** (4) laut Datenblatt eingestellt werden (Hier: mV/N und 21,89).

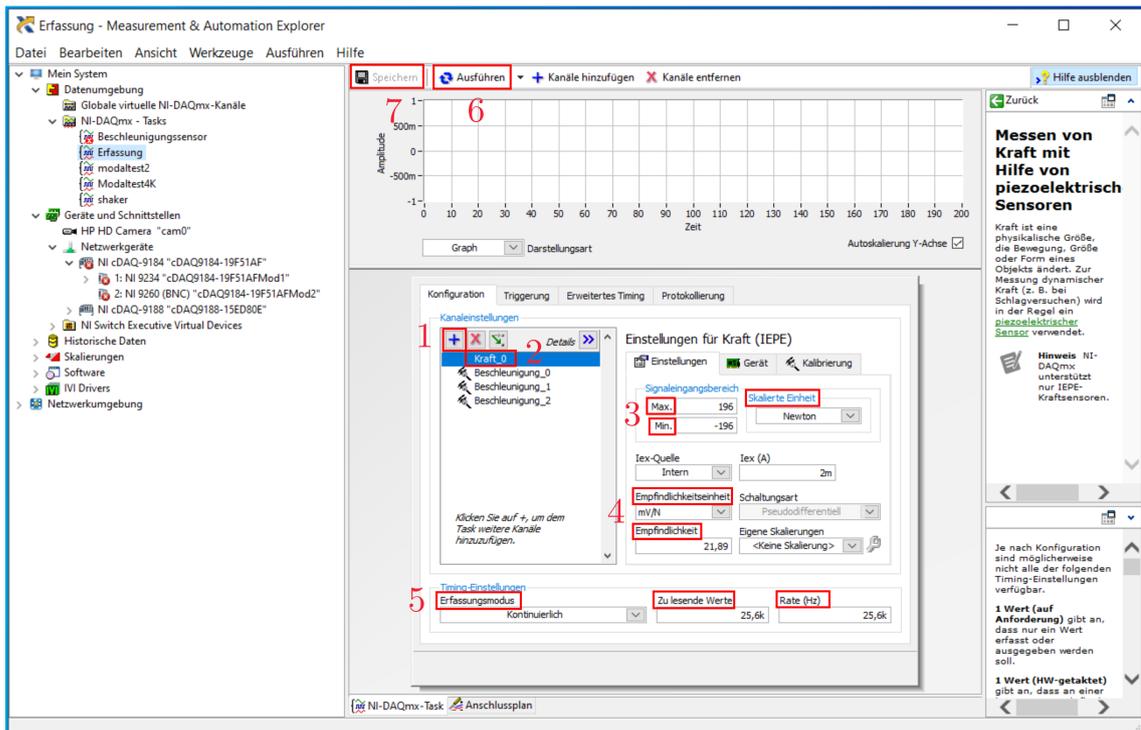


Abbildung B.4: NI MAX: Kraftsensor konfigurieren

- Timing-Einstellungen (5) festlegen: **Erfassungsmodus** → **kontinuierlich**, **zu lesende Werte** und **Rate** → **25,6k**
- **Ausführen** (6)

Im Diagramm sind die Signale der Sensoren sichtbar.

- **Stop** beendet die Ausführung
- **Speichern** (7)
- Für den Shaker einen Task (1) auswählen oder neu erstellen
- In **Signale erzeugen** → **Analoge Ausgabe** → **Spannung** auswählen
- Kanal 1 auswählen
- **Fertigstellen** wählen
- Werte aus Abbildung B.5 in die Konfiguration eintragen (2)
- Task ausführen (3)
- Task speichern (4)

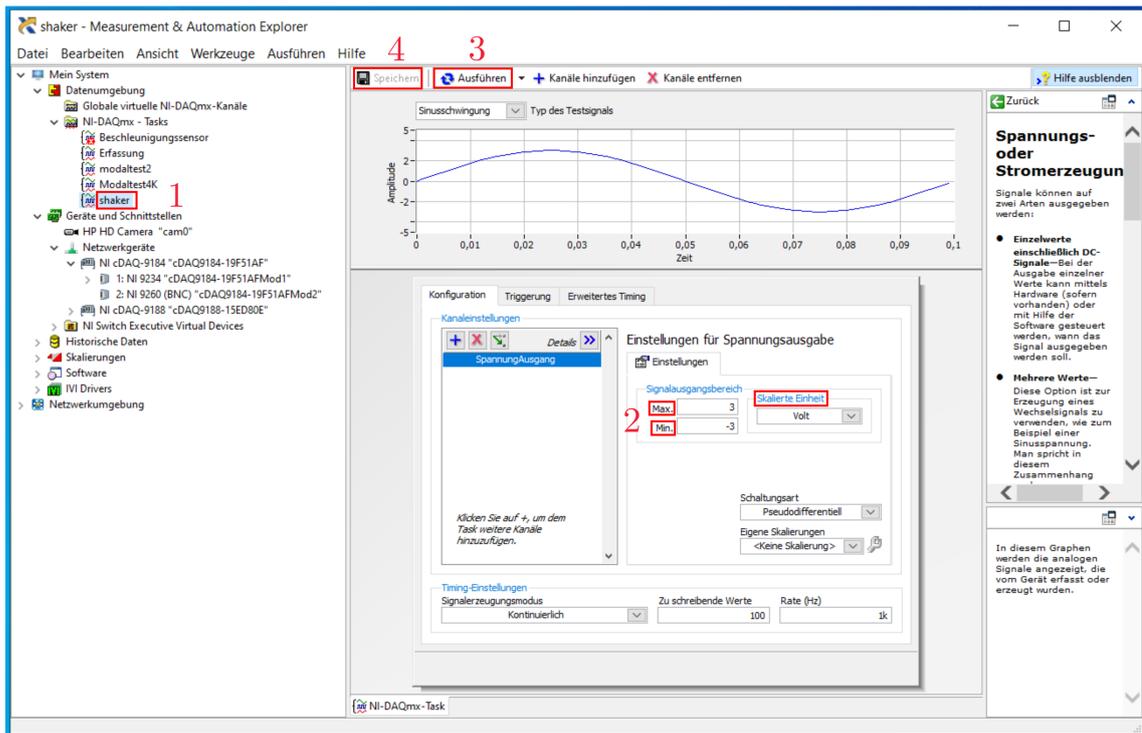


Abbildung B.5: NI MAX: Shaker konfigurieren

Beschleunigungssensor kalibrieren

- Beschleunigungssensor auf Kalibriergerät laut Abbildung B.6 für die jeweilige Richtung mittels dünner Wachsschicht aufkleben

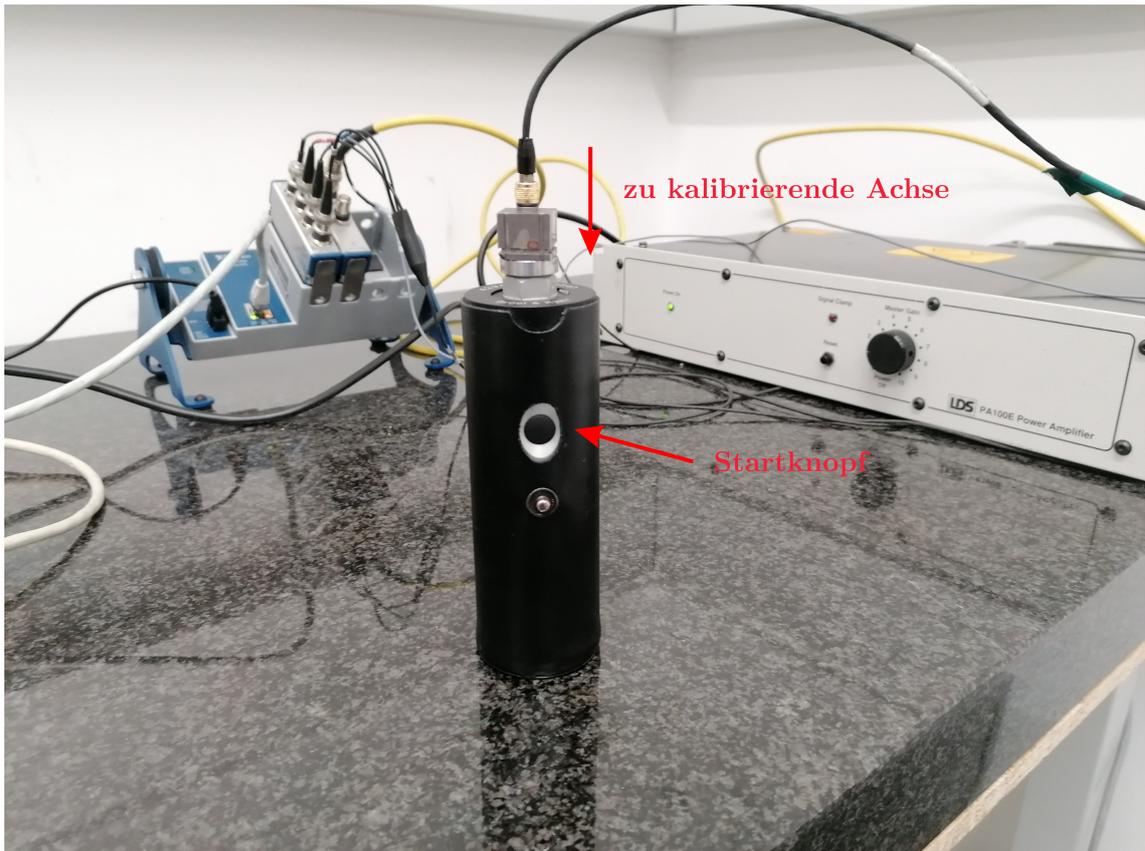


Abbildung B.6: Beschleunigungssensor kalibrieren

- In MAX unter **Einstellungen** → **Kalibrierung** eine eventuell vorhandene Kalibrierung löschen und eine neue Kalibrierung erstellen

Der Kalibrierassistent wird aufgerufen und ein Fenster nach Abbildung B.7 erscheint.

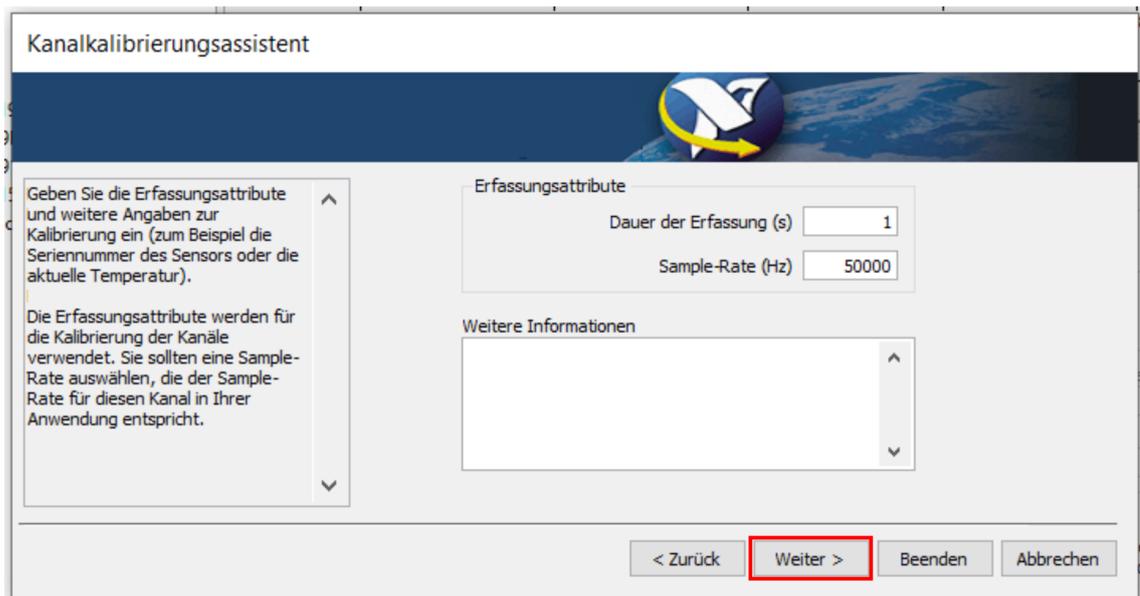


Abbildung B.7: Kalibrierassistent: allgemeine Einstellungen

- Standardwerte mit **weiter** übernehmen

Im nächsten Fenster startet die Kalibrierung.

- **Frequenz** und **Beschleunigung** laut Kalibriererätvorgaben bzw nach Abbildung B.8 einstellen

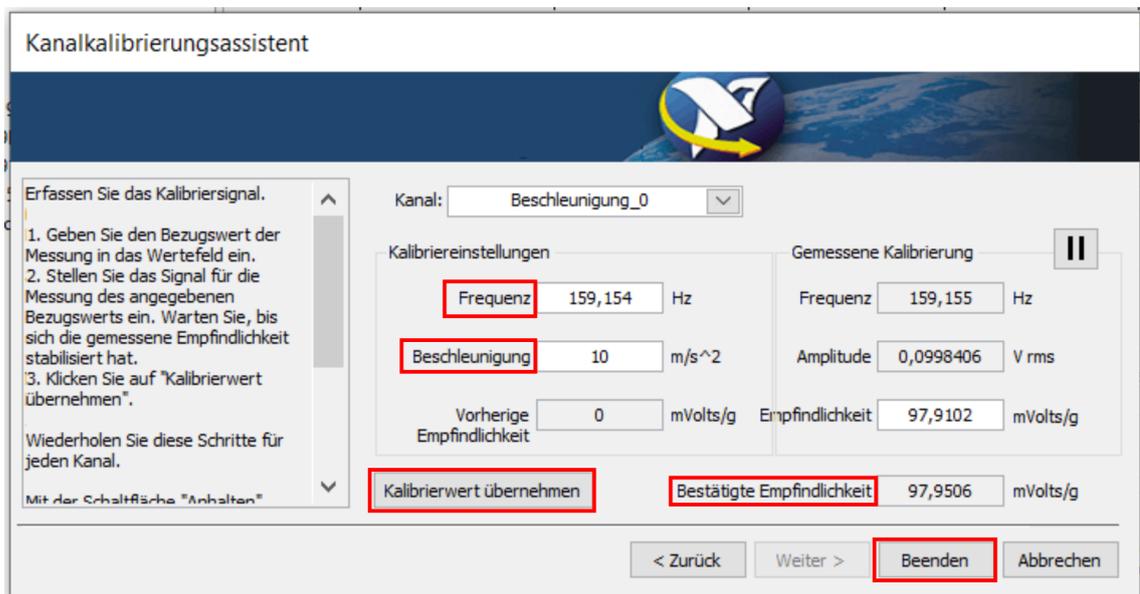


Abbildung B.8: Kalibrierassistent: Kalibrierung

- Startknopf am Kalibriererät betätigen
- **Kalibrierwert übernehmen** mehrmals betätigen

Die **Empfindlichkeit** sollte in etwa mit dem Wert im Kalibrierchart des Sensors übereinstimmen. Dann kann die Kalibrierung abgeschlossen werden.

- **Beenden**
- Vorgang für alle Koordinatenrichtungen des Sensors wiederholen
- mit **Speichern** den Task abspeichern

Task im Programm einstellen

- Programm **shakertest.proj** öffnen
- **main.vi** öffnen

Bei der Verwendung eines eigens erstellten Tasks, muss dieses im Blockdiagramm angegeben werden. Dazu mit **Strg + E** vom Frontpanel zum Blockdiagramm umschalten. Das Blockdiagramm wird in Abbildung B.9 gezeigt. Bei der Auswahl auf **data acquisition** (1) umschalten. Dort müssen für alle 3 Anregungsarten (2) die neu erstellten Tasks (3) eingestellt werden. Mit **Strg + E** wieder zum Frontpanel umschalten.

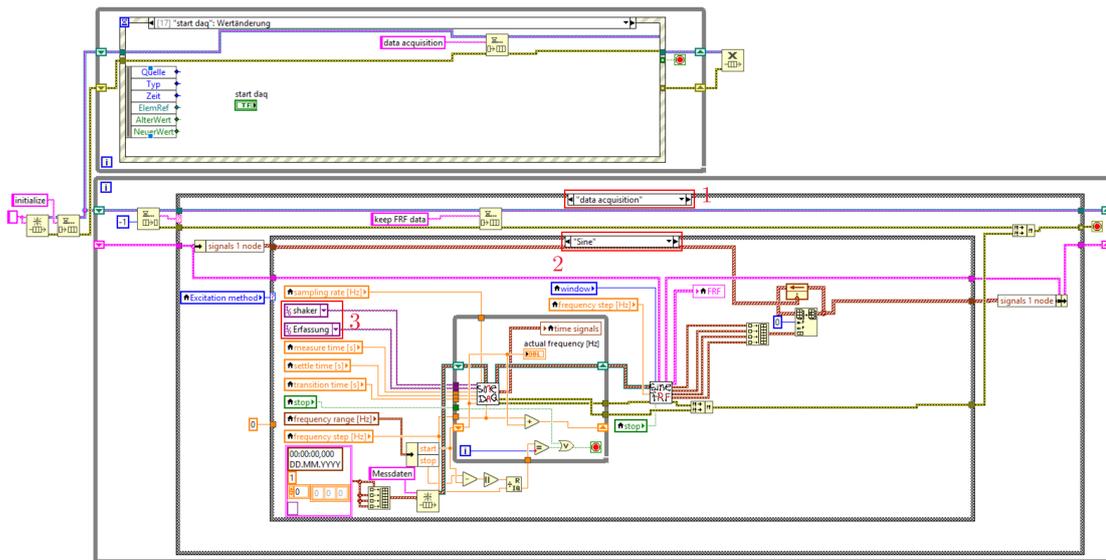


Abbildung B.9: Blockdiagramm Shakertest

Messpunktdatei erstellen

Die Messpunkte müssen in einer .txt-Datei folgend definiert werden: **Knotennr.** (aufsteigend, beginnend bei 1) → **Tabstopp** → **absolute Position des Messpunktes**. Eine Beispieldatei zeigt Abbildung B.10. Eine solche Datei muss erstellt und gespeichert werden.

| Line | Z-Coordinates [mm] |
|------|--------------------|
| 1 | 17 |
| 2 | 50 |
| 3 | 80 |
| 4 | 110 |
| 5 | 140 |
| 6 | 170 |
| 7 | 200 |
| 8 | 230 |
| 9 | 260 |
| 10 | 290 |
| 11 | 320 |
| 12 | 350 |
| 13 | 380 |
| 14 | 410 |
| 15 | 440 |

Abbildung B.10: Beispiel Messpunktdatei

B.1 Stepped Sine Testing

Die Messkonfiguration und die Messung werden hier für Stepped Sine Testing gezeigt.

Messung konfigurieren

- Programm starten

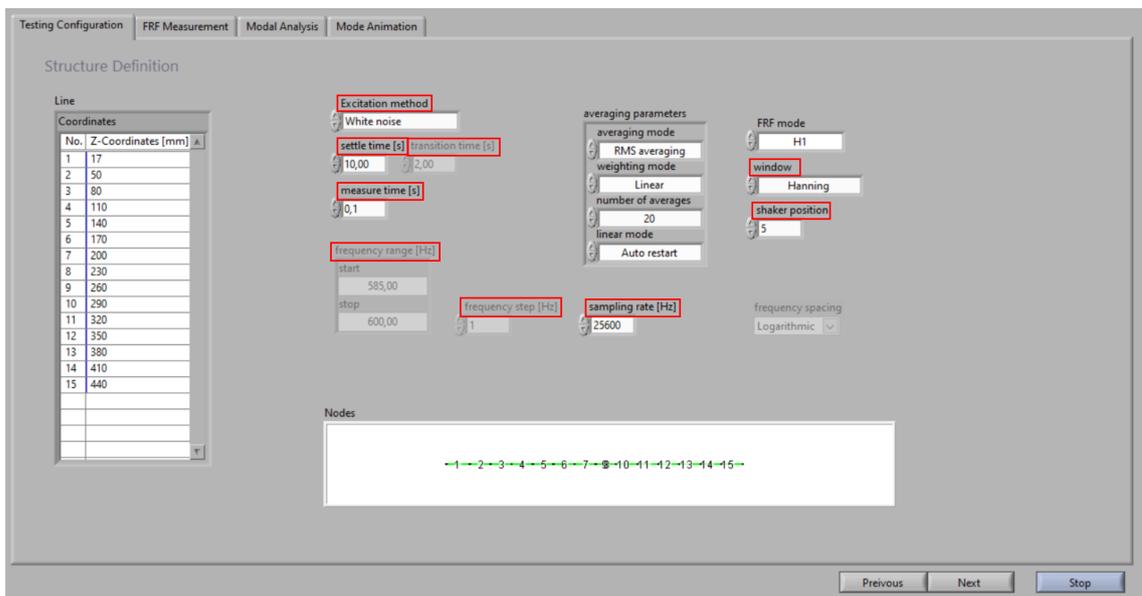


Abbildung B.11: Stepped Sine: Testing Configuration

Ein Fenster erscheint, in welchem die Datei mit den Messpunkten ausgewählt werden soll. In der Tabelle **Linie** wird der Inhalt der Datei angezeigt. Die Darstellung **Nodes** soll die Messpunkte zusätzlich visualisieren. Die Oberfläche des Programms ist in Abbildung B.11 dargestellt.

- Test konfigurieren

- Wähle für Stepped Sine Testing: **Excitation method** → **Sine**
- **settle time** [s]: Einschwingdauer festlegen
- **transition time** [s]: Übergangszeit nach dem Ende einer Messung und dem erneuten Anregen mit einer anderen Frequenz
- **measure time**[s]: Messdauer
- **frequency range** [Hz]: Frequenzbereich der Messung festlegen
- **frequency step** [Hz]: Auflösung festlegen
- **shaker position**: Position des Shakers (für Dokumentationszwecke)
- **sampling rate**: ist die Abtastfrequenz. Diese wird durch das analoge NI Eingangsmodul vorgegeben. Die Masterfrequenz $f_M = 13,1072MHz$. Damit lassen sich mögliche Sample-Frequenzen

$$f_s = \frac{f_M/256}{n} \quad (\text{B.1})$$

für $n = 1$ bis 31 berechnen. Es ergeben sich Frequenzen von $51200Hz$, $25600Hz$, $17067Hz$ usw bis $1652Hz$.

- Mit **Next** weiterschalten

Messung starten

Durch weiterschalten wird der Reiter FRF Measurement im Programm angezeigt. In **Current Node** wird der momentan aktive Messpunkt angezeigt. An diesem Messpunkt wird der Beschleunigungssensor angebracht. Zusätzlich gibt es eine Visualisierung der Messpunkte, wobei der aktive Messpunkt blau gekennzeichnet ist.

- Die Messung mit **Measure** starten

In **actual frequency** wird die aktuelle Anregfrequenz angezeigt und in **time signals** sind die Sensorwerte dargestellt. Nach der Einschwingdauer werden die Messwerte aufgenommen und die Anregung gestoppt. Die Anregfrequenz wird erhöht und wieder Messwerte aufgezeichnet. Erst nachdem der gesamte in der Konfiguration spezifizierte Frequenzbereich vermessen wurde, wird die FRF im Diagramm angezeigt. Die Signalleuchte **averaging done** kennzeichnet das Ende des Vorgangs.

- Mit **Next Node** zum nächsten Messpunkt weiterschalten
- Den Beschleunigungssensor am nächsten Messpunkt anbringen
- **Measure** startet die Messung des nächsten Messpunkts
- Vorgangsweise für alle Messpunkte wiederholen

Mit **Previous Node** kann die Messaufnahme einzelner Knoten wiederholt werden. Dies kann auch nach einer ersten Inspektion der Daten in den Reitern **Modal Analysis** bzw. **Mode Animation** geschehen. Durch **Save FRF data** können die Messdaten in einem *.mat-File abgespeichert werden und für eine weitere Analyse der Daten in MATLAB verwendet werden.

- Mit **Next** zu **Modal Analysis** weiterschalten

B.2 White Noise Testing

Die Messkonfiguration und die Messung werden hier für White Noise Testing gezeigt.

Messung konfigurieren

- Programm starten

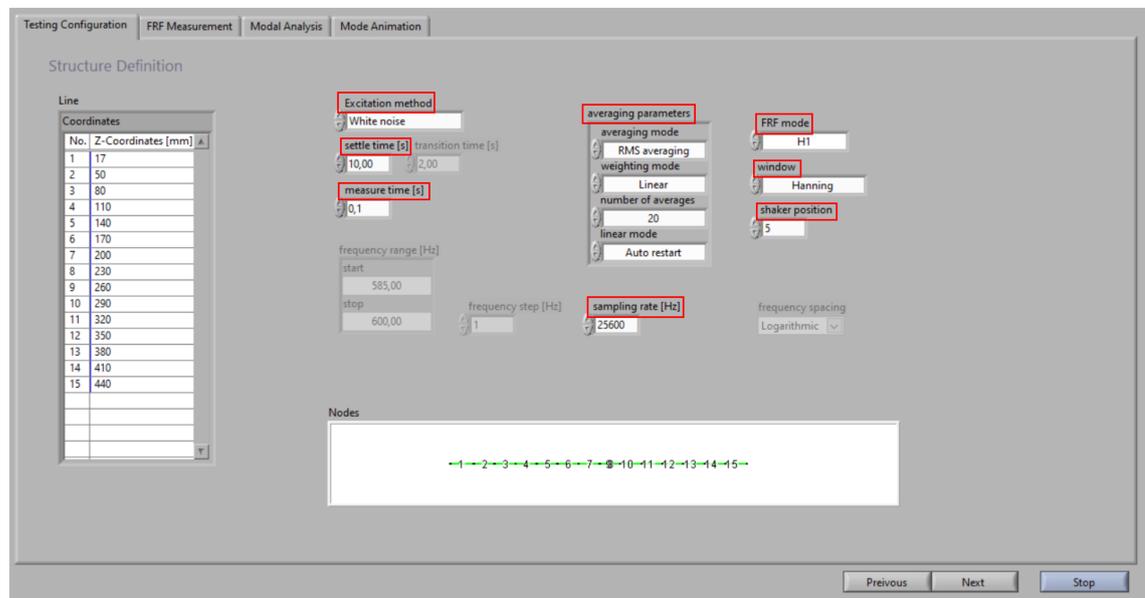


Abbildung B.12: White Noise: Testing Configuration

Ein Fenster erscheint, in welchem die Datei mit den Messpunkten ausgewählt werden soll. In der Tabelle **Linie** wird der Inhalt der Datei angezeigt. Die Darstellung **Nodes** soll die Messpunkte zusätzlich visualisieren. Die Oberfläche des Programms ist in Abbildung B.12 dargestellt.

- Test konfigurieren
 - Wähle **Excitation method** → **White noise**
 - **settling time [s]**: legt die Einschwingdauer fest
 - **measure time [s]**: legt die Messdauer fest, dadurch wird auch die Auflösung der FRF bestimmt

- **Averaging Parameters**
 - **averaging mode**
 - **No averaging:** Nur eine Messung
 - **Peak hold:** Der Maximalwert der Einzelmessungen wird verwendet
 - **Vector averaging:** Real- und Imaginärteil werden separat gemittelt (Verringerung von Grundrauschen bei Zufallssignalen)
 - **RMS averaging:** Energie bzw. Leistung des Signals wird gemittelt (reduziert Signalschwankungen, aber nicht Grundrauschen)
 - weighing mode
 - **linear:** jede Messung wird gleich gewichtet
 - **exponential:** spätere Messungen werden stärker gewichtet
 - **number of averages:** Anzahl der Messungen pro Messpunkt
 - **linear mode**
 - **Auto restart:** Messung startet automatisch erneut
 - **No restart:** Messung startet nicht automatisch erneut
- **FRF mode**
 - **H1:** bei verrauschtem Ausgangssignal
 - **H2:** bei verrauschtem Eingangssignal
 - **H3:** Rauschen am Eingangs- und Ausgangssignal
- **window:** bei White noise Testing wird meist ein **Hanning-Window** verwendet
- **shaker position:** Position des Shakers (für Dokumentationszwecke)
- **sampling rate:** ist die Abtastfrequenz. Diese wird durch das analoge NI Eingangsmodul vorgegeben. Die Masterfrequenz $f_M = 13,1072MHz$. Damit lassen sich mögliche Sample-Frequenzen

$$f_s = \frac{f_M/256}{n} \quad (\text{B.2})$$

für $n = 1$ bis 31 berechnen. Es ergeben sich Frequenzen von $51200Hz$, $25600Hz$, $17067Hz$ usw bis $1652Hz$.

- Mit **Next** weiterschalten

Messung starten

Durch weiterschalten wird der Reiter FRF Measurement laut Abbildung B.13 im Programm angezeigt.



Abbildung B.13: White Noise: FRF Measurement

In **Current Node** (1) wird der momentan aktive Messpunkt angezeigt. An diesem Messpunkt wird der Beschleunigungssensor angebracht. Zusätzlich gibt es eine Visualisierung der Messpunkte, wobei der aktive Messpunkt blau gekennzeichnet ist.

- Die Messung mit **Measure** (2) starten

In **time signals** (3) sind die Sensorwerte dargestellt. Nach der Einschwingdauer werden die Messwerte aufgenommen und **averages completed** (4) zählt hinauf, bis alle Messungen aufgezeichnet wurden. Im FRF-Diagramm kann die Entwicklung der FRF beobachtet werden. Die Signalleuchte **averaging done** (5) kennzeichnet das Ende des Vorgangs.

- Mit **Next Node** (6) zum nächsten Messpunkt weiterschalten
- Den Beschleunigungssensor am nächsten Messpunkt anbringen
- **Measure** (2) startet die Messung des nächsten Messpunkts
- Vorgangsweise für alle Messpunkte wiederholen

Mit **Previous Node** (7) kann die Messaufnahme einzelner Knoten wiederholt werden. Dies kann auch nach einer ersten Inspektion der Daten in den Reitern **Modal Analysis** bzw **Mode Animation** geschehen. Durch **Save FRF data** (8) können die Messdaten in einem *.mat-File abgespeichert werden und für eine weitere Analyse der Daten in MATLAB verwendet werden.

- Mit **Next** (9) zu **Modal Analysis** weiterschalten

Chirp Testing

Die Messkonfiguration und die Messung werden hier für Sine Chirp Testing gezeigt.

Messung konfigurieren

- Programm starten

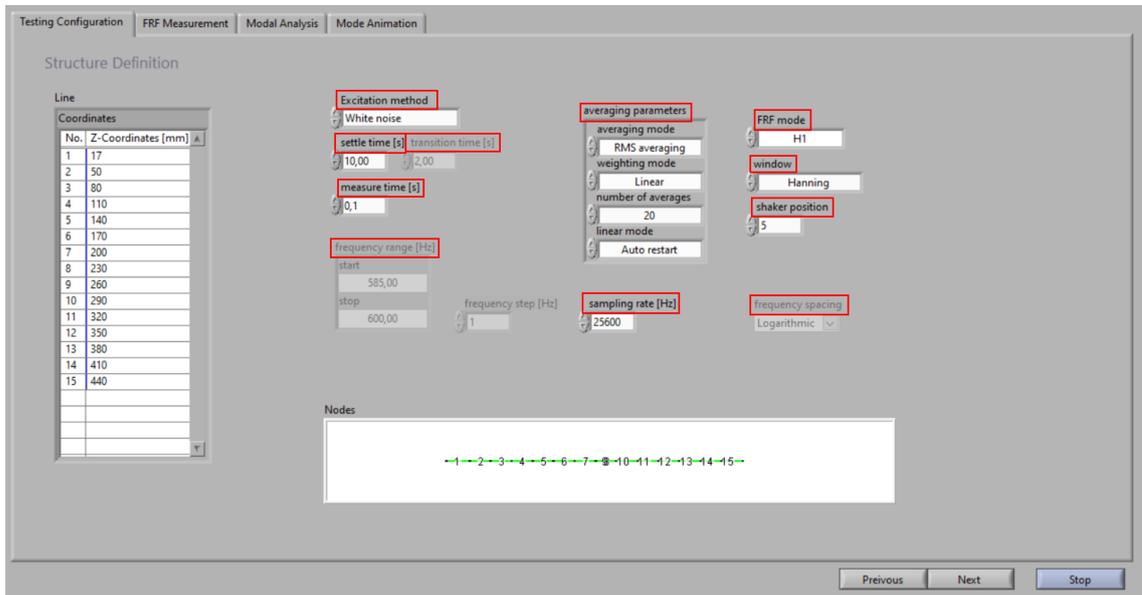


Abbildung B.14: Sine Chirp: Testing Configuration

Ein Fenster erscheint, in welchem die Datei mit den Messpunkten ausgewählt werden soll. In der Tabelle **Linie** wird der Inhalt der Datei angezeigt. Die Darstellung **Nodes** soll die Messpunkte zusätzlich visualisieren. Die Oberfläche des Programms ist in Abbildung B.14 dargestellt.

- Test konfigurieren
 - Wähle **Excitation method** → **Chirp**
 - **settling time [s]**: legt die Einschwingdauer fest
 - **transition time [s]**: Zeitdauer vom Ende eines Chirps bis zum Beginn des Nächsten
 - **measure time [s]**: legt die Messdauer fest, dadurch wird auch die Auflösung der FRF bestimmt
 - **frequency range [Hz]**: der Chirp wird von der **start-** Frequenz bis zur **stop-** Frequenz hochgefahren
 - **Averaging Parameters**
 - **averaging mode**
 - **No averaging**: Nur eine Messung
 - **Peak hold**: Der Maximalwert der Einzelmessungen wird verwendet
 - **Vector averaging**: Real- und Imaginärteil werden separat gemittelt (Verringerung von Grundrauschen bei Zufallssignalen)

- **RMS averaging:** Energie bzw. Leistung des Signals wird gemittelt (reduziert Signalschwankungen, aber nicht Grundrauschen)
- weighing mode
 - **linear:** jede Messung wird gleich gewichtet
 - **exponential:** spätere Messungen werden stärker gewichtet
- **number of averages:** Anzahl der Messungen pro Messpunkt
- **linear mode**
 - **Auto restart:** Messung startet automatisch erneut
 - **No restart:** Messung startet nicht automatisch erneut
- **FRF mode**
 - **H1:** bei verrauschtem Ausgangssignal
 - **H2:** bei verrauschtem Eingangssignal
 - **H3:** Rauschen am Eingangs- und Ausgangssignal
- **window:** bei Chirp Testing wird kein Fenster benötigt
- **shaker position:** Position des Shakers (für Dokumentationszwecke)
- **sampling rate:** ist die Abtastfrequenz. Diese wird durch das analoge NI Eingangsmodul vorgegeben. Die Masterfrequenz $f_M = 13,1072MHz$. Damit lassen sich mögliche Sample-Frequenzen

$$f_s = \frac{f_M/256}{n} \tag{B.3}$$
 für $n = 1$ bis 31 berechnen. Es ergeben sich Frequenzen von $51200Hz$, $25600Hz$, $17067Hz$ usw bis $1652Hz$.
- **frequency spacing:** der Chirp kann linear oder logarithmisch hochgefahren werden
- Mit **Next** weiterschalten

Messung starten

Durch weiterschalten wird der Reiter FRF Measurement laut Abbildung B.15 im Programm angezeigt.



Abbildung B.15: Sine Chirp: FRF Measurement

In **Current Node** (1) wird der momentan aktive Messpunkt angezeigt. An diesem Messpunkt wird der Beschleunigungssensor angebracht. Zusätzlich gibt es eine Visualisierung der Messpunkte, wobei der aktive Messpunkt blau gekennzeichnet ist.

- Die Messung mit **Measure** (2) starten

In **time signals** (3) sind die Sensorwerte dargestellt. Durch beobachten dieser Sensorwerte wird nach eigenem Ermessen entschieden, wann sich das System eingeschwungen hat. Dies wird mit **steady state** (4) bestätigt und die Aufzeichnung der Messwerte beginnt. **averages completed** (5) zählt hinauf, bis alle Messungen aufgezeichnet wurden. Im FRF-Diagramm kann die Entwicklung der FRF beobachtet werden. Die Signalleuchte **averaging done** (6) kennzeichnet das Ende des Vorgangs.

- Mit **Next Node** (7) zum nächsten Messpunkt weiterschalten
- Den Beschleunigungssensor am nächsten Messpunkt anbringen
- **Measure** (2) startet die Messung des nächsten Messpunkts
- Vorgangsweise für alle Messpunkte wiederholen

Mit **Previous Node** (8) kann die Messaufnahme einzelner Knoten wiederholt werden. Dies kann auch nach einer ersten Inspektion der Daten in den Reitern **Modal Analysis** bzw **Mode Animation** geschehen. Durch **Save FRF data** (9) können die Messdaten in einem *.mat-File abgespeichert werden und für eine weitere Analyse der Daten in MATLAB verwendet werden.

- Mit **Next** (10) zu **Modal Analysis** weiterschalten

Modalanalyse

Abbildung B.16 zeigt den Reiter Modal Analysis (1) des Programms. Hier werden die aufgenommenen Messdaten als FRF dargestellt.

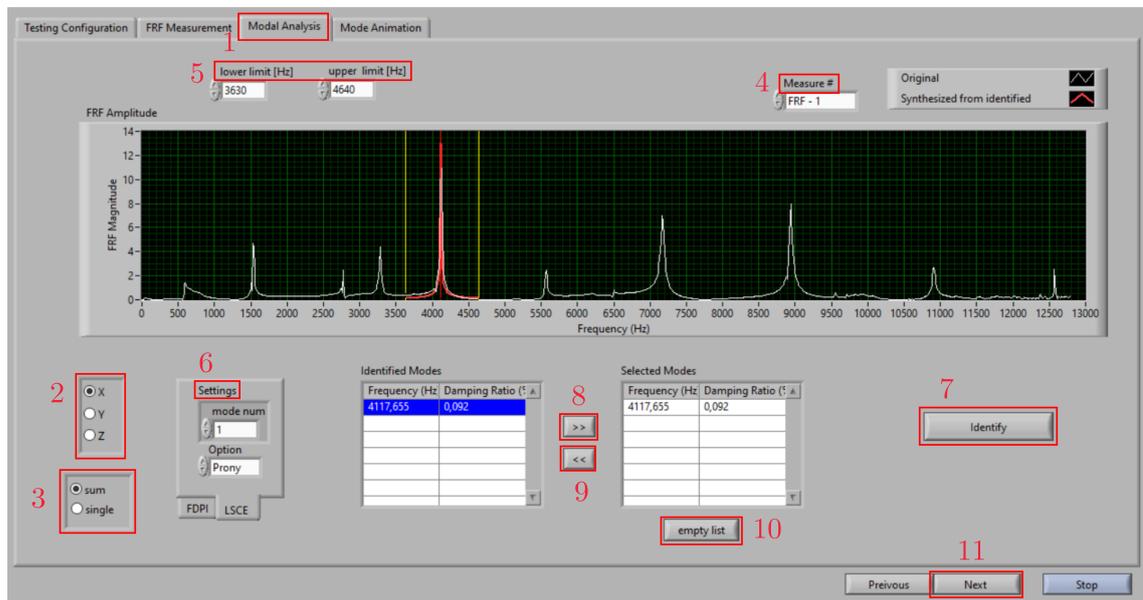


Abbildung B.16: Frontpanel: Modal Analysis

Links unten kann die zu betrachtende Koordinatenrichtung (2) eingestellt werden, sowie die Betrachtung der Summenkurve (alle Messpunkte gemeinsam) oder Einzelkurven (3). Mit **Measure#** (4) kann durch die Einzelkurven geklickt werden. Die Betrachtung der Einzelkurven kann hilfreich sein, um schlechte Messaufnahmen zu identifizieren und einen Messpunkt im Nachhinein erneut zu vermessen.

- Für die Modalanalyse auf Summenkurve (3) und die Koordinatenrichtung (2) auf die Richtung der Anregung stellen
- Mit den gelben Linien und **lower limit** und **upper limit** (5) den Frequenzbereich für die Modalanalyse auswählen

Unter Settings (6) kann entweder die FDPI- oder die LSCE-Methode für die Modalanalyse verwendet werden. Die Funktion sowie Anwendungshinweise für diese Methode finden sich in Kapitel 2 im Abschnitt 2.3. Unter **mode num** wird die Anzahl der zu vermutenden Eigenfrequenzen im ausgewählten Bereich angegeben. Mit **extra term** wird die Anzahl der Moden außerhalb des gewählten Frequenzbandes angegeben, um so den Einfluss dieser Moden zu kompensieren. Mit **Option** kann der Berechnungsalgorithmus festgelegt werden. Vor allem für rauschende Signale kann der Matrix Pencil Algorithmus vorteilhaft sein.

- Berechnungsart in **Settings** (6) spezifizieren
- Modalanalyse mit **Identify** (7) starten

In **Identified Modes** werden die berechneten Moden angezeigt. Wird auf einen geklickt, zeigt die rote Linie an, wo er liegt. Im Diagramm wird eine aus den berechneten Eigenfrequenzen erstellte FRF angezeigt. Im Bereich der Eigenfrequenzen sollte sie gut mit der Original-FRF übereinstimmen. Hohe Dämpfungswerte weisen auf sogenannte *Computational Modes* hin. Sie sind keine Eigenfrequenzen des Systems, sondern ergeben sich durch die Wahl der Berechnungsmethode. Dadurch und durch die rote Linie sollen die wahren Moden identifiziert werden.

- Wahre Moden mit » (8) in **Selected Modes** übernehmen
- Mit « (9) oder **empty list** (10) kann die Liste verändert werden
- Mit **Next** (11) zu **Mode Animation** weiterschalten

Mode Animation

Der Reiter **Mode Animation** des Programms ist in Abbildung B.17 dargestellt.

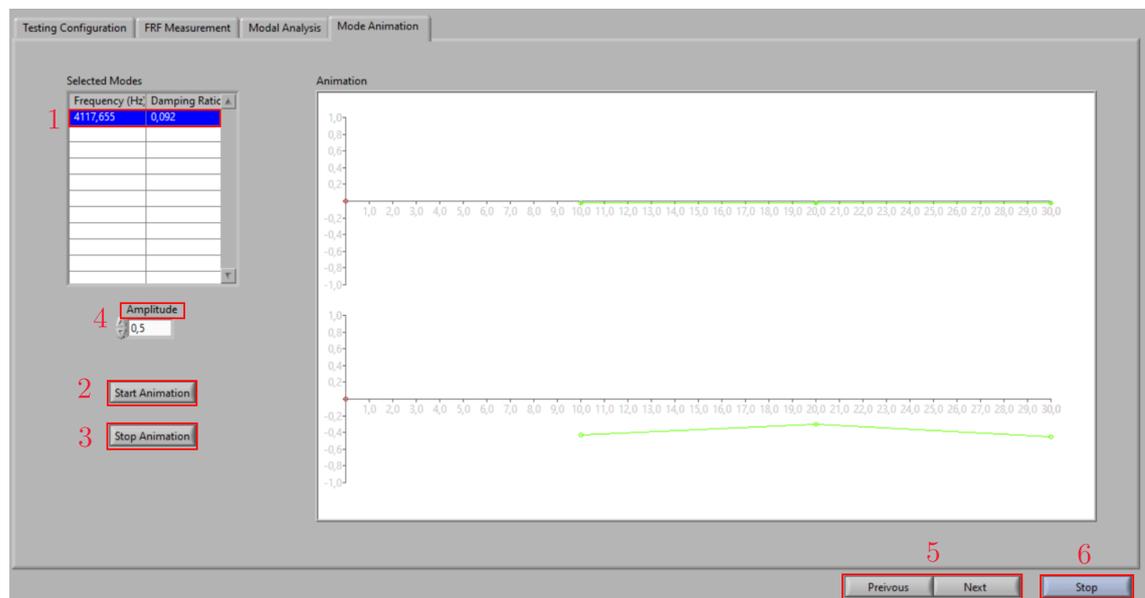


Abbildung B.17: Frontpanel: Mode Animation

Die vorhin ausgewählten Moden sind hier wiederum in **Selected Modes** sichtbar.

- Den zu animierenden Mode (1) in **Selected Modes** auswählen
- Durch **Start Animation** (2) die Animation starten
- Durch die Modes in Selected Modes klicken, um andere Modes zu animieren
- Mit **Stop animation** (3) die Animation beenden

Durch **Amplitude** (4) kann die Höhe des Ausschlag in vertikaler Richtung skaliert werden. Die Animation zeigt oben die xz-Richtung und unten die yz-Richtung der Welle. Die

Messpunkte werden durch einen kleinen Kreis dargestellt. Mit **Previous** und **Next** (5) kann zB zwischen Modal Analysis und Mode Animation hin- und hergeschaltet werden, um andere Moden zur Animation berechnen zu lassen. Ist an einem Messpunkt ein *Ausreißer* in der Animation, so kann der Messpunkt in FRF Measurement erneut aufgenommen werden.

- **Stop** (6) beendet das Programm

Befindet sich das Programm in der Ausführung einer Berechnung, Darstellung oder Messung, kann es nicht mit Stop beendet werden. In diesem Fall kann es nur durch das Stoppen der LabVIEW-Anwendung abgebrochen werden.

C MATLAB-Codes

Die Codes für die Breitband FRF und die Schmalband FRF Auswertung sind hier angeführt.

C.1 Broadband FRF Code

```
clear
clc
close all

%%% data input %%%
%load *.mat file
load('random_F3_all.mat')
%sample_rate=25600;
%measure_time=1;

%array data contains: [Node-No,Run-No,Sensor,Data]
%save data for every sensor individually
force=squeeze(data(:,:,1,:));
accelerationX=squeeze(data(:,:,2,:));
accelerationY=squeeze(data(:,:,3,:));
accelerationZ=squeeze(data(:,:,4,:));

%use Y-direction
%switch array dimensions: 3.Dim,2.Dim,1.Dim
%→[Data,Run-No,Node-No]
accelerationY=permute(accelerationY,[3,2,1]);
force=permute(force,[3,2,1]);

%reshape arrays to Datarows for 15 Nodes
accelerationY=reshape(accelerationY,[],15);
force=reshape(force,[],15);

%specify sample rate and number of measurement points per run
fs=sample_rate;
```

```

winlen=fs*measure_time;

%%% Modal analysis %%%
%create array for FRFs
FRF=zeros(1281,15);

%modalfrf creates FRFs
%for shaker-measurement: rovingoutput (accelerometer)
%sensor: accelerometer
for i=1:15
    [frf , f]=modalfrf(force(:, i), accelerationY(:, i), fs, winlen, ...
        'Estimator', 'H1', 'Measurement', 'rovingoutput', "Sensor", "acc");
    FRF(:, i)=frf;
end
%frf is created as receptance (displacement/force)

%receptance -> accelerance
omega=2*pi.*f;
FRF_acc=FRF./omega.^2;

%Plot FRFs
figure
plot(f, (abs(FRF_acc)))
xlim([0 8000])
set(gca, 'YScale', 'log')
xlabel('Frequency f in Hz')
ylabel('Frequency response function H in m/Ns^2')
title('Random excitation F3')

%Stability diagramm
fn=modalsd(FRF_acc, f, fs, 'MaxModes', 25, 'FreqRange', [100 6000]);
%input in frequency and damping stable values of array fn
physFreq=fn(11, [1 2 5 7 9]);

%create a mean FRF for plotting
m_FRF_acc=rms(FRF_acc, 2);

%modalfit calculate eigenfrequencies, damping, modeshape-vectors and
%a synthetic FRF

```

```

[fn,dr,ms,ofrf]=modalfit(FRF_acc,f,fs,25,'PhysFreq',physFreq,...
    'FitMethod','lsce','FreqRange',[0 6000]);

%Plot mean FRF and mean synthetic FRF
figure
plot(f,abs(m_FRF_acc))
hold on
plot(f,abs(rms(ofrf,2)))
%ylim([min(abs(frf)) max(abs(frf))])
xlim([100 6000])
set(gca,'YScale','log')
xlabel('Frequency f in Hz')
ylabel('Frequency response function H in m/s^2N')
title('Random excitation F3')
hold off

%% Mode Animation %%

%specify eigenfrequency-No. for animation
nf=2;
%convert komplex to polar
amplitude=abs(ms(:,nf));
phase=angle(ms(:,nf));

%scale
max_amplitude=max(amplitude);
amplitude=amplitude./max_amplitude;

% %animate phase with sinus-function
% frame_num=64*2;
% for i=1:100000
%     node_animation=sin(rem(i,frame_num)/frame_num*2*pi()+phase);
%     node_animation=node_animation.*amplitude;
%     %node_pos from *.mat-file
%     plot(node_pos,node_animation);
%     axis([0 500 -1 1])
%     drawnow limitrate
% end
% drawnow

```

```
figure
plot(node_pos, abs(ms(:, nf)) .* sign(real(ms(:, nf))) ./ max(abs(ms(:, nf))))
```

C.2 Stepped Sine FRF Code

```
clear
clc
close all

%Load *.mat-file
load('test_sine1s2.mat')

%save sensor-data individually
force=squeeze(data(:, :, 1, :));
accelerationX=squeeze(data(:, :, 2, :));
accelerationY=squeeze(data(:, :, 3, :));
accelerationZ=squeeze(data(:, :, 4, :));

%use Y-direction
%use node 1 for calculation
accelerationY=squeeze(accelerationY(1, :, :));
force=squeeze(force(1, :, :));
accelerationY=accelerationY';
force=force';

%calculate No. of cycles
a=size(force);
sampling_frequency=25600;
samples=sampling_frequency*measure_time;
cycles=a(1)/samples;

%reshape arrays
accelerationY=reshape(accelerationY, [samples, cycles]);
force=reshape(force, [samples, cycles]);

%create arrays for FRFs
length=samples/2;
FRF=zeros(1, cycles);
frequency_range=zeros(1, cycles);
freq_Y=zeros(1, cycles);

%calculate FRF, cycle correspondes to 1 point in the FRF
for i=1:cycles
    %calculate fft of cycle i
```

```

fft_Y=fft ( accelerationY (: , i ) );
fft_F=fft ( force (: , i ) );
%use real part of complex value
%use only half part of FFT
fft_Y=abs(fft_Y(1:length,1));
fft_F=abs(fft_F(1:length,1));
%calculate x-value (frequency)
%f1=sampling_frequency*(0:length-1)/samples;
%plot (f1 , fft_F (: , 1));
%plot (f1 , fft_Y (: , 1));
%find maximum in spectrums
[max_Y, ind_Y]=max(fft_Y);
[max_F, ind_F]=max(fft_F);
%find frequency belonging to max-value
%-1 because index starting at 1 and spectrum at 0Hz
f_Y=(ind_Y-1)*sampling_frequency/samples;
f_F=(ind_F-1)*sampling_frequency/samples;
%calculate point of FRF
FRF(1, i)=max_Y/max_F;
%store values in Arrays (f_F and f_Y should be the same!)
frequency_range(1, i)=f_F;
freq_Y(1, i)=f_Y;
end

%plot FRF
plot(frequency_range, FRF);

%% Wurzel2-Methode %%

%create x-values for fit
B=frequency_range(1):0.1:frequency_range(cycles);
%fit FRF with spline
yfitted=interp1(frequency_range, FRF, B, 'spline');

%find max-value of fit and index of it
[h_fd, ind_fd]=max(yfitted);
%find frequency of max-valuer (Eigenfrequency)
fd=B(ind_fd);
%calculate left and right point for Wurzel2-Method

```

```

w2=h_fd/sqrt(2);

%split x-values of fit in 2 parts (before and after max-value)
a=B(1:ind_fd);
b=B(ind_fd:end);

%split y-values of fit in 2 parts (before and after max-value)
ha=yfitted(1:ind_fd);
hb=yfitted(ind_fd:end);

%while loop to find upper frequency of value closest to w2
i=0;
iend=numel(hb);
hx2=h_fd;
while hx2>w2 && i<=iend
    i=i+1;
    hx2=hb(i);
end
f2=b(i);

%while loop to find lower frequency of value closest to w2
j=numel(ha);
hx1=ha(j);
while hx1>w2 && j>=1
    j=j-1;
    hx1=ha(j);
end
f1=a(j);

%if w2 is outside measurement frequency range, then damping is 0
if j==1 || i==iend
    Damping=0;
else
    Damping=(f2-f1)/(2*fd);
end
Eigenfrequency=fd;

%plot fitted curve, measured FRF, max of fit, w1 and w2
plot(B,yfitted);
hold on
plot(frequency_range,FRF);

```

```
hold on
plot(fd,h_fd,'o');
hold on
plot(f2,hx2,'-s','DisplayName','w2');
hold on
plot(f1,hx1,'-s','Displayname','w1');

xlabel('frequency in Hz');
ylabel('FRF');
```