
Bachelorarbeit

Frau
Mona Soleimani

**Einflussanalyse zur mess-
technischen Bestimmung von
Eingangsadmittanzen unter
Verwendung der virtuellen
Punkttransformation**

Mittweida, 2020

Bachelorarbeit

Einflussanalyse zur messtechnischen Bestimmung von Eingangsadmittanzen unter Verwendung der virtuellen Punkttransformation

Autor:

Frau

Mona Soleimani

Studiengang:

Media and Acoustical Engineering

Seminargruppe:

MG16-w-C

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. Eric Hensel

Einreichung:

Mittweida, 30.10.2020

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2020

Bibliografische Beschreibung:

Soleimani, Mona:

Einflussanalyse zur messtechnischen Bestimmung von Eingangsdmittanzen unter Verwendung der virtuellen Punkttransformation. 2020. 53 Seiten, 36 Abbildungen, 4 Tabellen. Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Medien. Anfertigung der Arbeit am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU. Bachelorarbeit, 2020.

Referat:

Mittels dynamischer Substrukturierungs-Methoden wird das dynamische Verhalten komplexer Strukturen analysiert. Für die Anwendung dieser Methode ist eine geeignete Definition von Subsystemen und deren Kopplung von großer Bedeutung. Eine Problematik bei der Kopplung experimentell gewonnener Modelle ist die direkte Messung der rotatorischen Bewegungen an der Koppelstelle. Eine Lösungsmöglichkeit stellt die Verwendung der virtuellen Punkttransformation (VPT) dar. Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit soll die Anwendung der VPT auf ein einfaches System näher untersucht werden. Dabei werden die Reproduzierbarkeit der Eingangsdmittanz-Matrix eines virtuellen Punktes unter unterschiedlichen messtechnischen Einflussfaktoren bewertet und die Ergebnisse diskutiert.

Inhalt

Inhalt I

| | |
|---|-------------|
| Abbildungsverzeichnis | III |
| Tabellenverzeichnis | VI |
| Abkürzungsverzeichnis | VII |
| Formelverzeichnis | VIII |
| 1 Zielstellung | 1 |
| 2 Einleitung | 3 |
| 3 Theoretische Grundlagen | 5 |
| 3.1 <i>Grundlage der Strukturdynamik</i> | 5 |
| 3.2 <i>Virtuelle Punkttransformation</i> | 8 |
| 3.2.1 <i>Virtueller Punkt</i> | 8 |
| 3.2.2 <i>Transformation</i> | 8 |
| 4 Beschreibung der Messungen | 13 |
| 4.1 <i>Impulshammermessung</i> | 13 |
| 4.2 <i>Datenaufbereitung</i> | 15 |
| 4.2.1 <i>FFT-Analysator</i> | 15 |
| 4.2.2 <i>Abtastrate</i> | 16 |
| 4.2.3 <i>Leakage-Effekt und Fensterung</i> | 18 |
| 4.2.4 <i>Übertragungsfunktionen H1, H2, Autospektrum und Kohärenzfunktion</i> | 21 |
| 4.3 <i>Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung</i> | 24 |
| 4.3.1 <i>Versuch A</i> | 26 |
| 4.3.2 <i>Versuch B</i> | 27 |
| 4.3.3 <i>Versuch C</i> | 28 |
| 5 Auswertung | 30 |
| 5.1 <i>Position der Anregungspunkte</i> | 30 |
| 5.2 <i>Anzahl der Anregungspunkte</i> | 34 |
| 5.3 <i>Anzahl der Sensoren</i> | 38 |

| | | |
|--|---|--------------|
| 5.4 | <i>Position der Sensoren</i> | 41 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 45 |
| Literatur | | 47 |
| Anlagen | | XI |
| Selbstständigkeitserklärung | | XVIII |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Real- und Imaginärteil verschiedener Kenngrößen am Beispiel eines einfachen bedämpften Masse-Feder-Systems im Bereich der Resonanzfrequenz [7]..... | 7 |
| Abbildung 2: Verwendete Notationen. Abstand der Sensoren und Anregungskräfte von dem VP. r_u entspricht dem Abstand der seismischen Masse des Sensors von VP und r_f definiert den Abstand der Anregungskräfte vom VP..... | 9 |
| Abbildung 3: Entstehung der Übertragungsfunktion Y_{qm} (6×6) für einen VP mit 3 Sensoren und 8 Anregungskräften | 11 |
| Abbildung 4: Einfluss verschieden harter Schlagkalotten aus Stahl, Kunststoff und Gummi auf die Impulsform [7] | 13 |
| Abbildung 5: Einfluss der Härte der Aufschlagspitze auf den Frequenzbereich des anregenden Kraftimpulses [7]..... | 14 |
| Abbildung 6: Schematische Messkette. Von jedem Sensor werden drei Kanäle des Frontends (B&K LAN-XI Typ 3053) belegt. Die gemessenen Daten werden über dieses für die weitere Verarbeitungen in die „Labshop Software“ weitergeleitet [8] [9]..... | 15 |
| Abbildung 7: Fast Fourier Transformation (FFT). FFT zerlegt Signale in einzelne Sinusschwingungen und transformiert damit ein Signal aus dem Zeit- in den Frequenzbereich [10]..... | 16 |
| Abbildung 8: Zusammenhang zwischen den FFT-Parametern [11]..... | 17 |
| Abbildung 9: Signal im FFT-Fenster (links) und seine periodische Fortsetzung (rechts) [12] | 18 |
| Abbildung 10: Transient Zeitfenster des Hammerimpulses [Bildschirmfoto]..... | 19 |
| Abbildung 11: Transient Zeitfenster. Definition von “Shift”, “Length” und “Taper”. [B&K LabShop Manual]..... | 20 |
| Abbildung 12: Multiplikation eines Signals mit dem Exponentialfenster. Das Signal wird dadurch gedämpft und das Auftreten des Leakage-Effekts wird damit gemindert [14] | 20 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 13: Übertragungskette (v ist Frequenz) [15] | 21 |
| Abbildung 14: Autospektrum des Hammersignals. Ab einem Abfall von 20 dB im Anregungsspektrum sind die Ergebnisse der höheren Frequenzen schlecht bewertbar [Bildschirmfoto] | 23 |
| Abbildung 15: Übertragungsfunktion und dazugehörige Kohärenz [15] | 24 |
| Abbildung 16: Foto des Versuchsaufbaus | 25 |
| Abbildung 17: Positionen der Anregungspunkte und Position der Beschleunigungssensoren (Blau) bei Versuchsaufbau A. Die Sensoren sind an der vorderen Seite des Kreuz-Flügels mittig positioniert..... | 26 |
| Abbildung 18: Positionen der Anregungspunkte und Position der Beschleunigungssensoren (Blau) bei Versuchsaufbau A. Zur Veranschaulichung werden die Messpunkte aus einem anderen Blickwinkel dargestellt..... | 27 |
| Abbildung 19: Positionen der Anregungspunkte und Position der Beschleunigungssensoren (Blau) bei Versuchsaufbau B. Die Sensoren sind an der vorderen Seite der Kreuz-Flügel, oben positioniert..... | 28 |
| Abbildung 20: Positionen der Anregungspunkte und Position der Beschleunigungssensoren (Blau) bei Versuchsaufbau C. Die Beschleunigungssensoren sind oben auf dem Kreuz positioniert..... | 29 |
| Abbildung 21: Die transformierten Eingangsmittanzen, Aufbau A mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 1)..... | 31 |
| Abbildung 22: Die transformierten Eingangsmittanzen, Aufbau A mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 2)..... | 32 |
| Abbildung 23: Die transformierten Eingangsmittanzen, Aufbau A mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 3)..... | 33 |
| Abbildung 24: Die transformierten Eingangsmittanzen, Aufbau A mit 16 Anregungspunkten und 3 Sensoren | 35 |
| Abbildung 25: Die transformierten Eingangsmittanzen, Aufbau B mit 16 Anregungspunkten und 3 Sensoren | 36 |

| | |
|---|------|
| Abbildung 26: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau C mit 16 Anregungspunkten und 3 Sensoren | 37 |
| Abbildung 27: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau A mit 8 Anregungspunkten und 4 Sensoren | 38 |
| Abbildung 28: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau B mit 8 Anregungspunkten und 4 Sensoren | 39 |
| Abbildung 29: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau C mit 8 Anregungspunkten und 4 Sensoren | 40 |
| Abbildung 30: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau B mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 3)..... | 42 |
| Abbildung 31: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau C mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 3)..... | 43 |
| Abbildung 32: Maße des Kreuzes..... | XI |
| Abbildung 33: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau B mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 1)..... | XIII |
| Abbildung 34: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau B mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 2)..... | XIV |
| Abbildung 35: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau C mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 1)..... | XV |
| Abbildung 36: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau C mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 2)..... | XVI |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Frequenzabhängige Antwortfunktionen [7] | 6 |
| Tabelle 2: Anregungsrichtungen an verschiedenen Anregungspunkte | 25 |
| Tabelle 3: Varianten bei der Position der Anregungspunkte..... | 30 |
| Tabelle 4: 16 Anregungspunkte | 34 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------------|------------------------------------|
| B&K | Brüel & Kjær |
| DS | Dynamische Substrukturierung |
| FBS | Frequenzbasierte Substrukturierung |
| FE | Finite-Elemente |
| FFT | Fast Fourier Transformation |
| NVH | Noise Vibration Harshness |
| VP | Virtueller Punkt |
| VPT | Virtueller Punkttransformation |

Formelverzeichnis

Hier nicht aufgeführte Zeichen treten nur einmal auf und sind an den entsprechenden Stellen erklärt.

| Symbol | Einheit | Beschreibung |
|-----------|---------|---|
| C | N/m | Steifigkeitsmatrix |
| E^k | - | Orientierungsmatrix eines Sensors |
| e^k | - | Orientierungsvektor eines Sensors |
| f | N | Äußere Kraft |
| f_{max} | Hz | Höchste Frequenz |
| f_s | Hz | Abtastfrequenz |
| h | - | Anregung |
| j | - | Imaginäre Einheit |
| K | kg/s | Dämpfungsmatrix |
| k | - | Sensor |
| L_Y | dB | Mobilitätspegel |
| M | kg | Massenmatrix |
| N | - | Frequenzlinien |
| r_f | mm | Abstand des Anregungspunktes vom virtuellen Punkt |
| r_u | mm | Abstand des Sensors vom virtuellen Punkt |
| T | s | Periodendauer |
| t | s | Zeit |
| u | m | Verschiebung |
| w_{exp} | - | Exponentielles Zeitfenster |

| | | |
|------------|------------|-------------------|
| Δf | Hz | Frequenzauflösung |
| Δt | s | Abtastintervall |
| ω | s^{-1} | Kreisfrequenz |
| \dot{u} | m/s | Schnelle |
| \ddot{u} | m/s^{-2} | Beschleunigung |

1 Zielstellung

Das dynamische Verhalten komplexer Strukturen kann mit Hilfe verschiedener Methoden berechnet und analysiert werden. Ein Verfahren, welches zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens komplexer Systeme verwendet wird, stellt die frequenzbasierte Substrukturierung (FBS) dar. Dabei wird das zu untersuchende Gesamtsystem zuerst in unterschiedliche Substrukturen unterteilt. Die Substrukturen werden auf Basis ihrer Frequenzgänge gekoppelt, welche bspw. in Form von Impedanzen oder Admittanzen dargestellt werden können. Die Ermittlung der Frequenzgänge der Substrukturen kann numerisch, analytisch oder experimentell erfolgen.

Die Kopplung der Subsysteme kann im einfachsten Fall nur an einer Schnittstelle erfolgen, welche auf einen Punkt reduziert werden kann. In den meisten Fällen ist eine messtechnische Erfassung des dynamischen Verhaltens an einem Punkt, welche die drei rotatorischen und die drei translatorischen Freiheitsgrade enthält, nicht möglich.

Eine Möglichkeit zur Lösung dieses Problems stellt die Virtuelle Punkttransformation (VPT) dar. Unter Verwendung dieser kann die Schnittstelle auf einen Punkt reduziert und alle sechs Freiheitsgrade berücksichtigt werden. Die messtechnische Bestimmung kann mittels Impulshammer und Beschleunigungssensoren an der zugehörigen Schnittstelle erfolgen.

Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit soll die Anwendung der VPT auf ein einfaches System experimentell untersucht werden. Dabei wird ein Kreuz als Hilfskonstruktion genutzt. Mittels VPT, werden alle 6 Freiheitsgrade an einem virtuellen Punkt nachgebildet. Die Bewertung der Reproduzierbarkeit der resultierenden Eingangsadmittanz-Matrix dieses virtuellen Punktes ist Hauptziel dieser Arbeit. Diese soll im Zusammenhang mit den Positionen und der Anzahl der Beschleunigungsaufnehmer sowie den nötigen Anregungsstellen umgesetzt werden.

Die Arbeit ist in sechs Kapitel unterteilt. Kapitel 2 führt in die dynamischen Substrukturierungsmethoden und die VPT ein. Der Stand der Technik der FBS wird kurz angegeben. Kapitel 3 beschreibt die Grundlagen der Strukturdynamik und VPT. Kapitel 4 beschreibt die durchgeführten Messungen und die Datenaufbereitung. Kapitel 5 stellt die Ergebnisse der Messungen dar. Das anschließend Kapitel 6 fasst die Arbeit und gewonnen Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick.

2 Einleitung

Das Hören ist eine der überlebenswichtigsten Fähigkeiten des Menschen. Im Verlauf der Evolution musste sich das Gehör ständig anpassen und verbessern, sodass wir heute ein enorm komplexes Wahrnehmungsinstrument entwickelt haben. Schall wird nicht nur mechanisch durch unsere Ohren aufgenommen, sondern auch im Unterbewusstsein subjektiv verarbeitet. So erregt jede wahrgenommene Schwingung unsere Emotionen. Die direkte Verbindung von Gehör und Emotionen macht es nachvollziehbar, dass ein permanenter Bedarf an der Verbesserung des Sound Designs und der Geräuschkürzung in allen Bereichen unseres täglichen Lebens besteht.

Die jüngsten Entwicklungen in der Fahrzeugindustrie gehen weg vom Verbrennungs- und hin zum Elektromotor, um dem steigenden Fokus auf Nachhaltigkeit gerecht zu werden. Während Elektromotoren in der Regel leiser sind, generieren sie hochfrequente Geräusche. Ebenfalls werden andere mechanische und mechatronische Geräusche im Fahrzeug nicht mehr durch die des Verbrennungsmotors überdeckt.

Die Krafterleitung einer Schwingungsquelle in schwingungsübertragenden Medien (wie z.B. mechanische Strukturen in Kraftfahrzeugen) ist eine der Ursachen der Geräuschentstehung bei Fahrzeugen. Bei der Untersuchung dieser Körperschallschwingungen, kommen unterschiedliche Struktur dynamikmethoden zum Einsatz. Eine der am häufigsten verwendeten Methoden bei der Struktur dynamik, ist die dynamische Substrukturierung (DS). Im Rahmen der DS wird ein komplexes System zu kleineren Substrukturen unterteilt, wodurch die Modellierung und Analyse des dynamischen Verhaltens des Gesamtsystems erleichtert wird.

Die DS ermöglicht die Kombination numerischer, analytischer und experimenteller Substruktur-Modelle. Die Substrukturierung kann in die physikalische Domäne, aber auch in die Modal-, Frequenz-, Zeitdomänen und die Zustandsraumdarstellung erfolgen. Für die geschichtliche und technische Entwicklung der DS wird [1] vorgeschlagen.

Unter Verwendung der Finite-Elemente-Simulation (FE) können bspw. die ermittelten Masse-, Steifigkeits- und Dämpfungsmatrizen in der physikalischen Domäne modelliert werden. Je komplexer hierbei das System ist, desto aufwändiger wird die Erstellung der FE-Modelle.

Mit der frequenzbasierten Substrukturierung (FBS), einem Teilgebiet der DS, werden die dynamischen Eigenschaften der Substrukturen im Frequenzbereich mittels ihrer Übertragungsfunktion modelliert. Auch die FBS-Modellierung kann sowohl numerisch als auch experimentell durchgeführt werden.

Um die Übertragungsfunktionen, meist in Form der mechanischen Admittanz oder Impedanz, bei der experimentellen FBS zu gewinnen, wird das zu untersuchende System angeregt und dessen Antwort auf diese Anregung mittels Beschleunigungssensor aufgenommen. Die Anregung kann mittels Impulshammer oder Shaker erfolgen.

Die erste Methode bei der Substrukturierung im Frequenzbereich wurde von Klostermann in den 70er Jahren entwickelt [2]. Der versuchte in seiner Arbeit das Systemverhalten experimentell durch Impedanzen zu bestimmen. Im Jahr 1988 wurde von Jetmundsens et al. [3] die FBS-Methode durch Bestimmung der Admittanzen weiterentwickelt. Seine Methode, im Vergleich zu [2], war effizienter und genauer und wurde deshalb häufiger genutzt.

Im Jahr 2006 wurde die „Lagrange Multiplier Frequency Based Substructuring“ (LM FBS) von de Klerk et al. entwickelt [4]. Dabei wurde die von Jetmundsens et al. entwickelte Admittanz-FBS neu formuliert.

In den meisten Fällen benötigt die Modellierung des Systemverhaltens mittels der experimentellen FBS neben den translatorischen auch die rotatorischen Freiheitsgrade, also alle 6 Freiheitsgrade. Triaxiale Beschleunigungssensoren sind nur in der Lage, die Beschleunigungen in den drei translatorischen Freiheitsgraden zu messen. Außerdem ist es häufig der Fall, dass die Anregung oder der Einsatz eines Beschleunigungssensors an der Kopplungsstelle nicht möglich ist.

Eine Möglichkeit diese Probleme zu bewältigen, stellt die VPT dar. Voormeeren entwickelte in seiner Arbeit die VPT-Methode [5]. Bei der VPT-Methode können die Schnittstellen auf einen Punkt reduziert werden, welcher virtueller Punkt genannt wird. Mittels Einsetzung eines virtuellen Punktes (VP), können die Übertragungsfunktionen selbst an den Kopplungsstellen aufgenommen werden, welche nicht angeregt werden können.

Ebenfalls können unter Verwendung der VPT aus den gemessenen translatorischen Übertragungsfunktionen die rotatorischen nachgebildet werden. Im Kapitel 3 ist diese Methode mathematisch beschrieben.

Die Anwendung der VPT wurde in der Dissertation von Van der Seij genauer untersucht [6]. Dabei kombiniert er die LM FBS mit der VPT. Außerdem schlägt er messtechnische Vorgaben bei Anwendung der VPT vor. Diese Vorgaben beinhalten die Verwendung von 3 Sensoren bei Aufnahme der Admittanzen. Zusätzlich empfiehlt er, dass die Sensoren nah an dem VP platziert werden, um den Einfluss der Störgeräusche auf die VPT zu minimieren. Der Abstand darf jedoch nicht zu klein sein, da der relative Fehler bei den Sensorpositionen mit kleinerem Abstand steigt und die Messdaten verfälscht.

3 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen und mathematischen Zusammenhänge der Strukturdynamik und der VPT erläutert.

3.1 Grundlage der Strukturdynamik

Die Bewegungsgleichung (3.1.1) ist eine mathematische Gleichung, durch welche die Bewegung eines mechanischen Systems in der Zeitdomäne unter Einwirkung äußerer Kräfte vollständig beschrieben werden kann.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (3.1.1)$$

Hierbei ist $\mathbf{f}(t)$ die äußere Kraft, und \mathbf{M} , \mathbf{C} und \mathbf{K} sind die Masse-, Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrizen des Systems. Der Vektor $\mathbf{u}(t)$ enthält die Verschiebungsgrößen.

Durch die Fourier-Transformation der Gleichung (3.1.1), ergibt sich die Bewegungsgleichung in der Frequenzdomäne (3.1.4). Mittels der Gleichungen (3.1.2) und (3.1.3), werden die Verschiebung und Beschleunigung in Form von Schnelle umgestellt und in der Fourier transformierten Bewegungsgleichung ersetzt.

$$\mathbf{U}(\omega) = \frac{1}{j\omega} \dot{\mathbf{U}}(\omega) \quad (3.1.2)$$

$$\ddot{\mathbf{U}}(\omega) = j\omega \dot{\mathbf{U}}(\omega) \quad (3.1.3)$$

$$\left(j\omega \mathbf{M} + \mathbf{C} + \frac{1}{j\omega} \mathbf{K} \right) \dot{\mathbf{U}}(\omega) = \mathbf{F}(\omega) \quad (3.1.4)$$

$$\mathbf{Z}(\omega) = j\omega \mathbf{M} + \mathbf{C} + \frac{1}{j\omega} \mathbf{K} \quad (3.1.5)$$

$$\mathbf{Z}(\omega) \cdot \dot{\mathbf{U}}(\omega) = \mathbf{F}(\omega) \quad (3.1.6)$$

Hierbei entspricht \mathbf{Z} der mechanischen Impedanz. Da die Masse-, Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrizen bei experimentell gewonnenen Daten nicht vorhanden sind, wird die Gleichung (3.1.6) in Admittanz-Form umgestellt.

$$\mathbf{Z}^{-1}(\omega) = \mathbf{Y}(\omega) \quad (3.1.7)$$

$$\mathbf{Y}(\omega) \cdot \mathbf{F}(\omega) = \dot{\mathbf{U}}(\omega) \quad (3.1.8)$$

Hierbei entspricht $Y(\omega)$ der mechanischen Admittanz. Tabelle 1 stellt die Zusammenhänge zwischen verschiedenen frequenzabhängigen Antwortfunktionen dar. Alle diese Größen lassen sich bei Bedarf ineinander umrechnen. Welche Größe benutzt wird, hängt von der gewünschten Aussage ab.

Tabelle 1: Frequenzabhängige Antwortfunktionen [7]

| Antwort | Bezeichnung | Formel | Bezeichnung | Formel |
|----------------|------------------------|---|-----------------------------------|---|
| Weg | Dynamische Steifigkeit | $s(\omega) = \frac{F}{U}$ $\left[\frac{N}{m} \right]$ | Nachgiebigkeit | $n(\omega) = \frac{U}{F}$ $\left[\frac{m}{N} \right]$ |
| Schnelle | Mechanische Impedanz | $z(\omega) = \frac{F}{\dot{U}}$ $\left[\frac{Ns}{m} \right]$ | Mechanische Admittanz (Mobilität) | $Y(\omega) = \frac{\dot{U}}{F}$ $\left[\frac{m}{Ns} \right]$ |
| Beschleunigung | Dynamische Masse | $m(\omega) = \frac{F}{\ddot{U}}$ $\left[\frac{Ns^2}{m} \right]$ | Inertanz | $a(\omega) = \frac{\ddot{U}}{F}$ $\left[\frac{m}{Ns^2} \right]$ |

Abbildung 1 stellt den Real- und Imaginärteil verschiedener Kenngrößen am Beispiel eines einfachen bedämpften Masse-Feder-Systems im Bereich der Resonanzfrequenz dar. Bei der Nachgiebigkeit (Receptance), der mechanischen Admittanz (Admittance) und

der Intertanz (Intertance) liegen die Resonanzfrequenzen an den Maxima des Amplitudenverlaufs über die Frequenz.

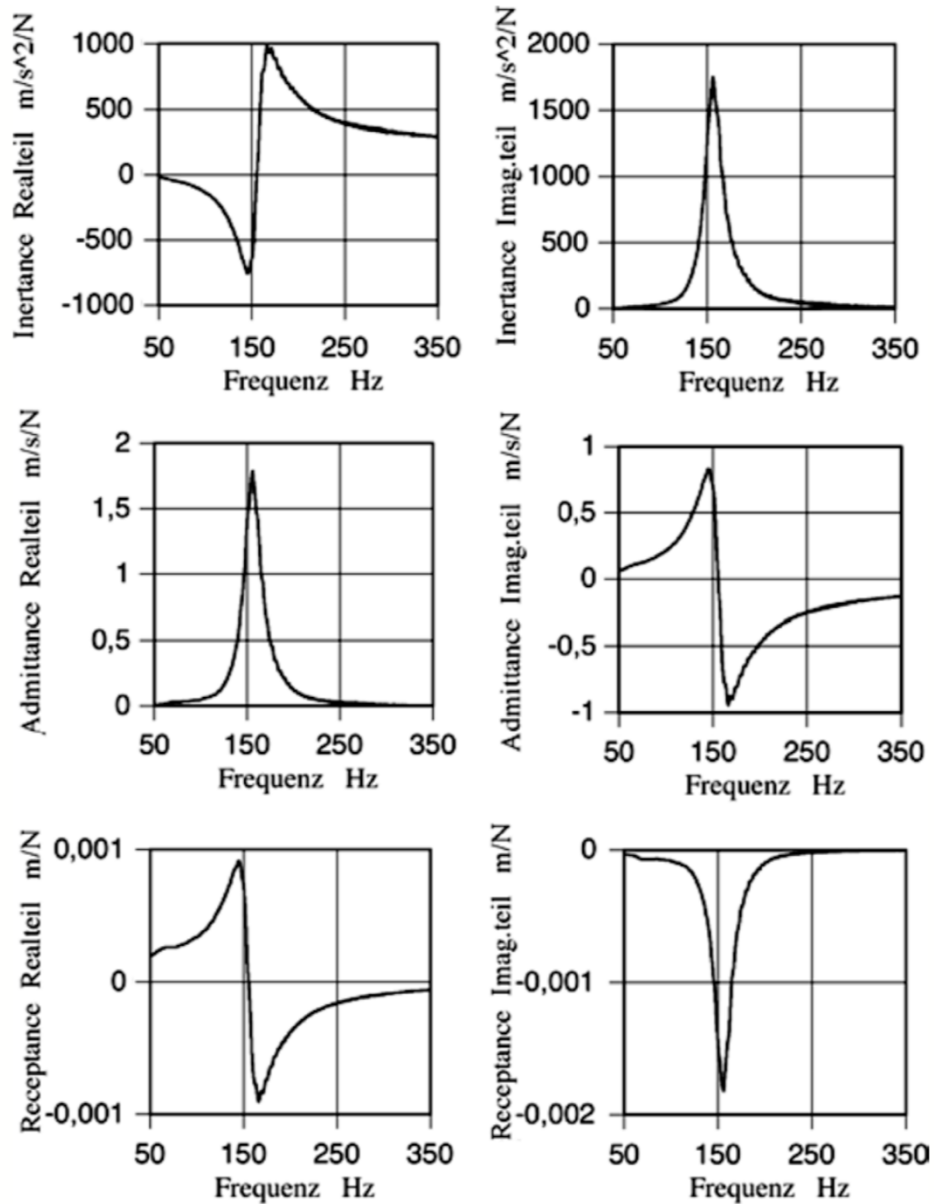


Abbildung 1: Real- und Imaginärteil verschiedener Kenngrößen am Beispiel eines einfachen bedämpften Masse-Feder-Systems im Bereich der Resonanzfrequenz [7]

In der vorliegenden Arbeit werden die Messdaten in Form von Mechanischer Admittanz, auch Mobilität genannt, bewertet. Da die Amplituden der Frequenzgänge von Interesse sind, erfolgt die quantitative Beschreibung der frequenzabhängigen Antwortfunktionen

durch ihre Pegel. Die Admittanzen werden nach Gleichung (3.1.9) als Mobilitätspegel dargestellt.

$$L_Y = 20 \left(\lg \left(\frac{Y}{Y_0} \right) \right) \text{ dB} \quad (3.1.9)$$

mit dem Mobilitätsbezugspegel $Y_0 = 1 \frac{\text{m}}{\text{Ns}}$.

3.2 Virtuelle Punkttransformation

3.2.1 Virtueller Punkt

Bei der Kopplung der Substrukturen mittels der experimentellen FBS werden zumeist alle sechs Freiheitsgrade benötigt. Eine Möglichkeit für die Beschreibung der Schnittstellen unter Berücksichtigung aller Freiheitsgrade bietet die VPT. Dabei werden aus den gemessenen translatorischen Übertragungsfunktionen die sechs Freiheitsgrade für einen Punkt ermittelt. Dieser wird als VP definiert, da an diesem Punkt keine direkte Messung durchgeführt wird. Der VP kann ebenfalls an einer Bohrungsstelle, wie in Abbildung 2 zu sehen, gewählt werden.

3.2.2 Transformation

Triaxiale Beschleunigungssensoren sind in der Lage die Übertragungsfunktionen der drei translatorischen Freiheitsgrade, also X, Y, und Z, aufzunehmen. Für die VPT wird empfohlen [6] mindestens 3 triaxiale Beschleunigungssensoren zu verwenden.

Wie in dem, in Abbildung 2 dargestellten Beispielsystem, ergeben sich insgesamt 9 Freiheitsgrade, 3 Freiheitsgrade je Sensor, welche zusammen mit den einwirkenden Anregungskräften f auf den VP (grüner Punkt in der Abbildung 2) transformiert werden. Damit werden die 3 translatorischen und die 3 rotatorischen Freiheitsgrade am VP mittels 3 triaxialer Beschleunigungssensoren abgebildet.

Nachfolgend wird die VPT anhand mathematischer Formeln nach [6] erläutert. Abbildung 2 verdeutlicht die verwendeten Notationen.

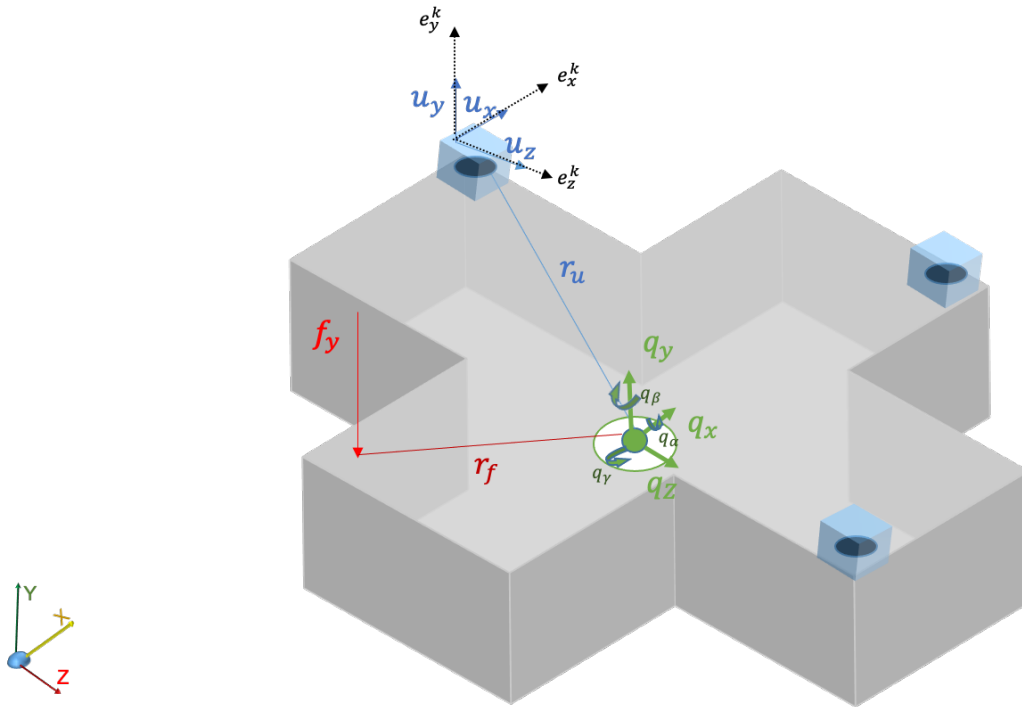


Abbildung 2: Verwendete Notationen. Abstand der Sensoren und Anregungskräfte von dem VP. r_u entspricht dem Abstand der seismischen Masse des Sensors von VP und r_f definiert den Abstand der Anregungskräfte vom VP.

Zuerst werden die \mathbf{R} Abstandsmatrizen für Anregungskräfte und Sensoren aufgestellt. Diese übertragen die lokalen bzw. realen Verschiebungen u , und die realen Kräfte f , auf den VP [6]. Die Gleichung (3.2.2.2) stellt die \mathbf{R} -Matrix für einen triaxialen Beschleunigungssensor k dar.

$$\begin{bmatrix} e_x^k & e_y^k & e_z^k \end{bmatrix} = \mathbf{E}^k \tag{3.2.2.1}$$

$$\mathbf{R}_u^k = \begin{bmatrix} e_{x,X}^k & e_{x,Y}^k & e_{x,Z}^k \\ e_{y,X}^k & e_{y,Y}^k & e_{y,Z}^k \\ e_{z,X}^k & e_{z,Y}^k & e_{z,Z}^k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & r_Z^k & -r_Y^k \\ 0 & 1 & 0 & -r_Z^k & 0 & r_X^k \\ 0 & 0 & 1 & r_Y^k & -r_X^k & 0 \end{bmatrix} \tag{3.2.2.2}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{translatorisch}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{rotatorisch}}$

Hierbei entspricht r dem Abstand der seismischen Masse des Sensors k vom VP. Die Orientierungsmatrix des Sensors, E^k , ergibt sich aus der Gleichung (3.2.2.1). R_u^k stellt je Sensor eine 3×6 Matrix dar.

Für 3 Sensoren und einen VP können die einzelnen R_u^k (3×6) als eine Matrix von 9×6 zusammengefasst werden:

$$R_u = \begin{bmatrix} R_u^{1,1} \\ R_u^{2,1} \\ R_u^{3,1} \end{bmatrix} \quad (3.2.2.3)$$

Analog zu R_u wird für die Anregungskräfte am VP die R_f^h -Matrix definiert. Die R_f^h -Matrix wird in der transponierten Darstellung, welche später auch in der Transformation der Übertragungsfunktionen verwendet wird, in Gleichung (3.2.2.4) präsentiert. R_f^T entspricht einer (6×1) Matrix für je eine Anregung f^h .

$$R_f^{hT} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -r_Z^h & r_Y^h \\ r_Z^h & 0 & -r_X^h \\ -r_Y^h & -r_X^h & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_X^h \\ e_Y^h \\ e_Z^h \end{pmatrix} \quad (3.2.2.4)$$

Hierbei ist r der Abstand der jeweiligen Anregungskraft von dem VP und e^h die Anre-gungsrichtung. R_f^h für bspw. 8 Impulse bzw. Anregungskräfte, kann nach Gleichung (3.2.2.5), in einer (8×6) Matrix zusammengefasst werden.

$$R_f = \begin{bmatrix} R_f^1 \\ R_f^2 \\ R_f^3 \\ R_f^4 \\ R_f^5 \\ R_f^6 \\ R_f^7 \\ R_f^8 \end{bmatrix} \quad (3.2.2.5)$$

Nun werden die Transformationsmatrizen T_u und T_f für die Verschiebungen und Kräfte erstellt.

$$T_u = (R_u^T R_u)^{-1} R_u^T \quad (3.2.2.6)$$

$$T_f^T = R_f (R_f^T R_f)^{-1} \quad (3.2.2.7)$$

Damit ergibt sich nach Gleichung (3.2.2.8) die transformierte Übertragungsfunktion Y_{qm} am VP.

$$Y_{qm} = T_u Y T_f^T \quad (3.2.2.8)$$

Wobei Y die gemessenen Übertragungsfunktionen sind. Y wird für 3 Sensoren und 8 Anregungen nach Gleichung (3.2.2.9) aufgebaut.

$$Y = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{Kanal}_X \text{Sensor}_1, \text{Impact}_1} & \dots & \mathbf{Y}_{\text{Kanal}_X \text{Sensor}_1, \text{Impact}_8} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{\text{Kanal}_Z \text{Sensor}_3, \text{Impact}_1} & \dots & \mathbf{Y}_{\text{Kanal}_Z \text{Sensor}_3, \text{Impact}_8} \end{bmatrix} \quad (3.2.2.9)$$

Anhand der Abbildung 3 wird die Entstehung der Y_{qm} (6×6), welche alle sechs Freiheitsgrade am VP enthält, für das oben genannte Beispiel veranschaulicht.

$$\begin{array}{c} \mathbf{T}_u \quad \mathbf{Y} \quad \mathbf{T}_f^T = \mathbf{Y}_{qm} \\ \underbrace{\quad \quad \quad}_{(6 \times 8)} \\ \quad \quad \quad \underbrace{\quad \quad \quad}_{(8 \times 6)} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad = \mathbf{(6 \times 6)} \end{array}$$

Abbildung 3: Entstehung der Übertragungsfunktion Y_{qm} (6×6) für einen VP mit 3 Sensoren und 8 Anregungskräften

Wenn die translatorischen Verschiebungen am VP als $q_{\text{trans}} = [q_x, q_y, q_z]$ und die rotatorischen Verschiebungen als $q_{\text{rot}} = [q_\alpha, q_\beta, q_\gamma]$ bezeichnet werden, ergibt sich der folgende Matrizenaufbau in der Gleichung (3.2.2.10) Übertragungsfunktion Y_{qm} am VP.

Analog zu den Verschiebungen q werden die translatorischen Kräfte am VP in der Gleichung (3.2.2.10) als $m_{\text{trans}} = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix}$ und $m_{\text{rot}} = \begin{bmatrix} m_\alpha \\ m_\beta \\ m_\gamma \end{bmatrix}$ gekennzeichnet.

$$Y_{qm} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{q_x, m_x} & Y_{q_x, m_y} & Y_{q_x, m_z} & Y_{q_x, m_\alpha} & Y_{q_x, m_\beta} & Y_{q_x, m_\gamma} \\ Y_{q_y, m_x} & \mathbf{Y}_{q_y, m_y} & Y_{q_y, m_z} & Y_{q_y, m_\alpha} & Y_{q_y, m_\beta} & Y_{q_y, m_\gamma} \\ Y_{q_z, m_x} & Y_{q_z, m_y} & \mathbf{Y}_{q_z, m_z} & Y_{q_z, m_\alpha} & Y_{q_z, m_\beta} & Y_{q_z, m_\gamma} \\ Y_{q_\alpha, m_x} & Y_{q_\alpha, m_y} & Y_{q_\alpha, m_z} & \mathbf{Y}_{q_\alpha, m_\alpha} & Y_{q_\alpha, m_\beta} & Y_{q_\alpha, m_\gamma} \\ Y_{q_\beta, m_x} & Y_{q_\beta, m_y} & Y_{q_\beta, m_z} & Y_{q_\beta, m_\alpha} & \mathbf{Y}_{q_\beta, m_\beta} & Y_{q_\beta, m_\gamma} \\ Y_{q_\gamma, m_x} & Y_{q_\gamma, m_y} & Y_{q_\gamma, m_z} & Y_{q_\gamma, m_\alpha} & Y_{q_\gamma, m_\beta} & \mathbf{Y}_{q_\gamma, m_\gamma} \end{bmatrix} \quad (3.2.2.10)$$

Damit lässt sich die Y_{qm} aus translatorischen und rotatorischen Kräften und Verschiebungen am VP berechnen.

4 Beschreibung der Messungen

4.1 Impulshammermessung

In dieser Arbeit fand die Anregung am Bauteil mittels eines Impulshammers statt. Dieser verfügt über unterschiedliche Schlagkalotten, welche je nach zu untersuchendem Frequenzbereich auszuwählen sind. Mit einer härteren, bzw. steiferen Schlagkalotte werden höhere Frequenzen besser angeregt. Abbildung 4 zeigt schematisch ein gemessenes Beispiel für den Einfluss verschieden harter Schlagkalotten aus Stahl, Kunststoff und Gummi auf die Impulsform. Abbildung 5 stellt den Einfluss der Härte der Aufschlagspitze auf den Frequenzbereich des anregenden Kraftimpulses dar.

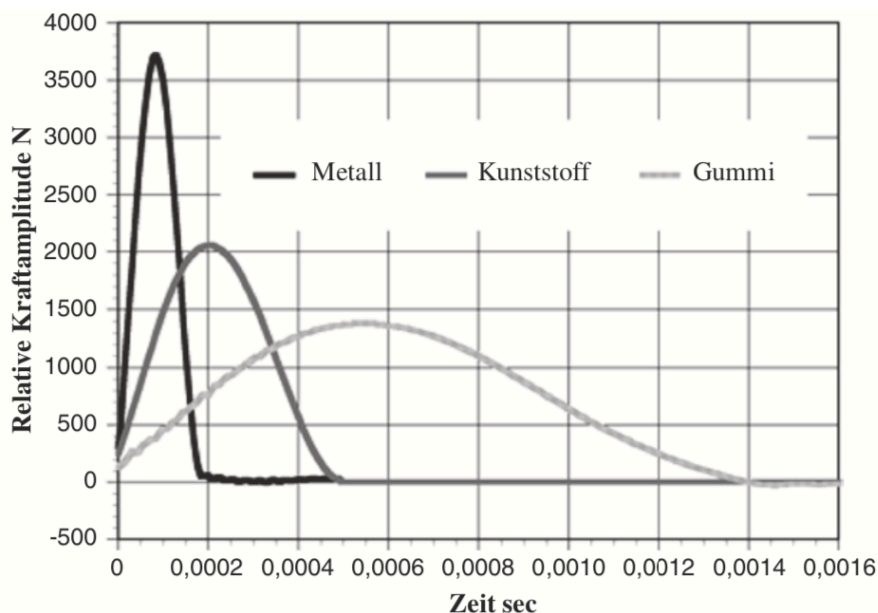


Abbildung 4: Einfluss verschieden harter Schlagkalotten aus Stahl, Kunststoff und Gummi auf die Impulsform [7]

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Masse des Impulshammers. Je schwerer der Impulshammer, desto mehr Energie wird der zu untersuchenden Struktur zugeführt. In der Praxis lassen sich je nach Hammertyp Kraftamplituden zwischen etwa 200 N und 20 kN erzeugen, bei einem maximalen Frequenzbereich zwischen etwa 500 Hz und 10 kHz [7]. Die Messungen in dieser Arbeit werden mit Kraftamplituden von maximal 500 N und für einen Frequenzbereich bis 3,2 kHz bewertet.

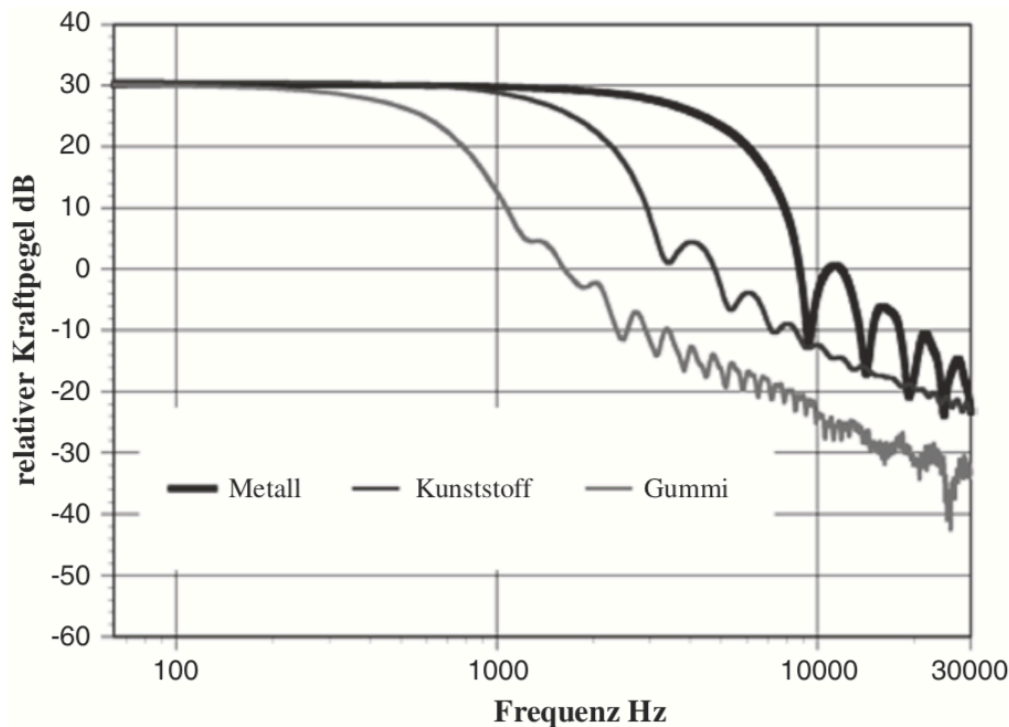


Abbildung 5: Einfluss der Härte der Aufschlagspitze auf den Frequenzbereich des anregenden Kraftimpulses [7]

Die aus den Impulsen resultierenden Systemantworten werden mittels Beschleunigungssensoren aufgezeichnet.

Für diesen Versuch werden der Impulshammer „Kistler Typ 9722-A“ mit einer Aufschlagspitze aus Kunststoff und die Beschleunigungssensoren „B&K 4524-B001“ verwendet. Die Sensoren werden auf der zu prüfenden Struktur aufgeklebt. In Unterkapitel 4.3 werden die Positionen der Sensoren sowie die Anregungspunkte und deren Orientierungen ausführlich behandelt.

Als „Fronthead“ wurde „B&K LAN-XI Typ 3053“ eingesetzt, das über die „B&K Pulse LabShop“ Software gesteuert und zur Aufbereitung der gemessenen Signale verwendet wird. Die Daten werden schließlich als „UFF“ exportiert und mittels „Matlab“ ausgewertet.

Die Messkette ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt. Bei den Messungen werden triaxiale Beschleunigungssensoren verwendet. Solche Sensoren sind in der Lage, gleichzeitig die translatorischen Schwingungen in drei Achsenrichtungen, also X, Y und Z zu messen. Daher werden von jedem Sensor drei Kanäle des Frontends belegt.

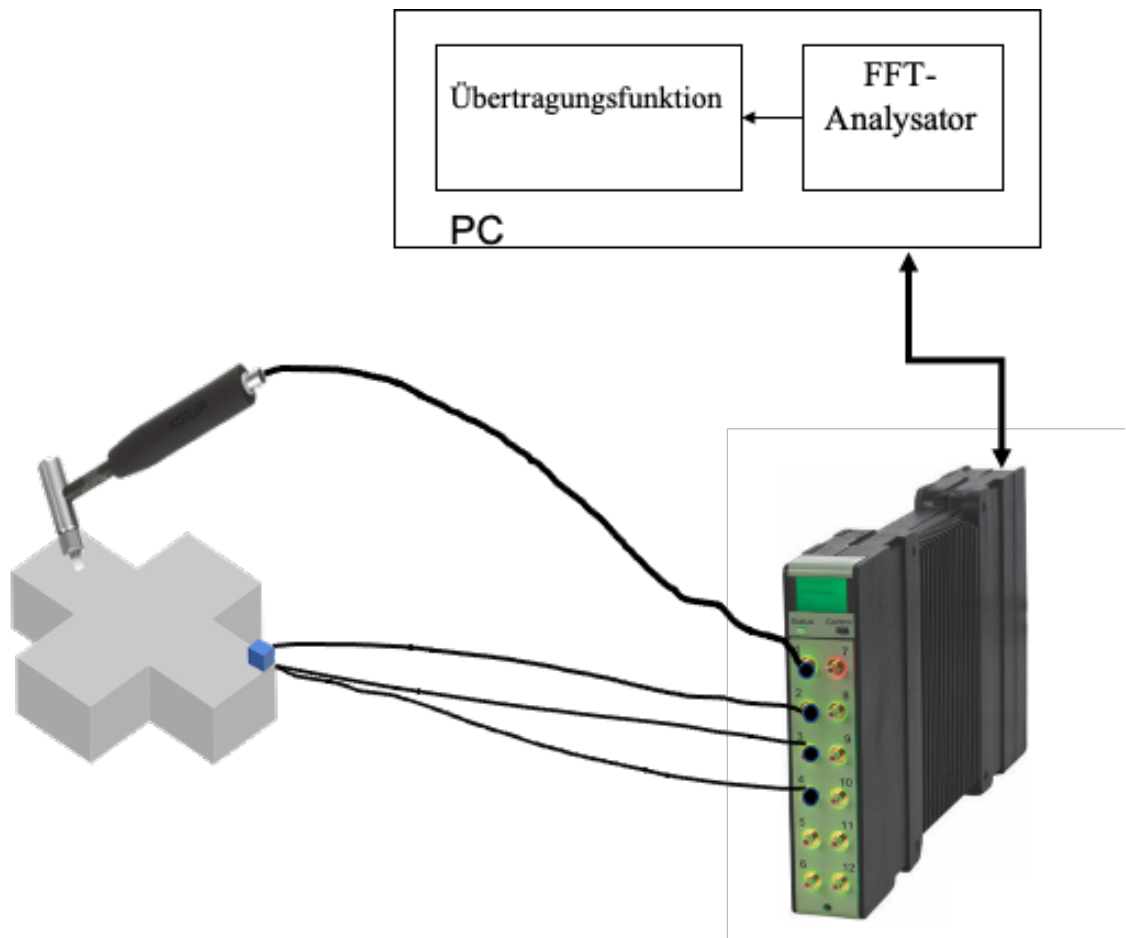


Abbildung 6: Schematische Messkette. Von jedem Sensor werden drei Kanäle des Frontends (B&K LAN-XI Typ 3053) belegt. Die gemessenen Daten werden über dieses für die weitere Verarbeitungen in die „Labshop Software“ weitergeleitet [8] [9]

4.2 Datenaufbereitung

In diesem Abschnitt werden die Funktionen erläutert, welche zur Bearbeitung und Prüfung der Gültigkeit der Impulshammermessung verwendet wurden.

4.2.1 FFT-Analysator

Die schnelle Fourier Transformation oder Fast Fourier Transformation (FFT) zerlegt Signale in einzelne Sinusschwingungen und transformiert damit ein Signal aus dem Zeit- in den Frequenzbereich. Mittels der inversen Fourier Transformation kann diese Operation

invertiert, also das Signal aus dem Frequenz- in den Zeitbereich, transformiert werden. Abbildung 7 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

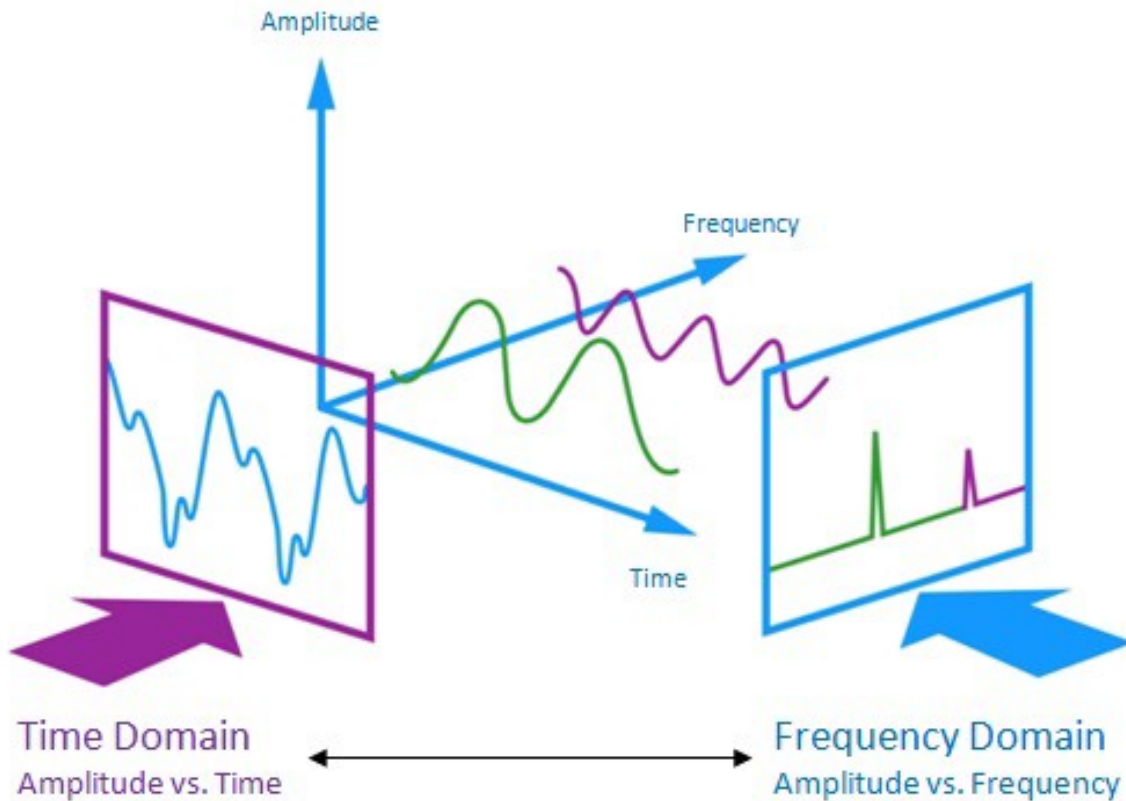


Abbildung 7: Fast Fourier Transformation (FFT). FFT zerlegt Signale in einzelne Sinus-schwingungen und transformiert damit ein Signal aus dem Zeit- in den Frequenzbereich [10]

Das Ergebnis einer FFT ist stark von den Analyseparametern abhängig. Einige dieser Parameter und deren genauere Einstellung sind im folgenden Abschnitt beschrieben. In der vorliegenden Arbeit werden je Anregungspunkt fünf Messungen im FFT-Analysator gemittelt.

4.2.2 Abtastrate

Mittels der FFT werden die Signale blockweise vom Zeit- in den Frequenzbereich transformiert. Im Zeitbereich wird die Blocklänge T in N Abtastwerte mit einem Abtastintervall Δt zerlegt.

$$\Delta t = \frac{T}{N} \quad (4.2.2.1)$$

Im Frequenzbereich wiederum wird die Abtastfrequenz f_s , auch Abtastrate genannt, durch (4.2.2.2) definiert.

$$f_s = N \Delta f \quad (4.2.2.2)$$

Hierbei sind N die Frequenzlinien mit dem Linienabstand Δf . Δf wird als Frequenzauflösung bezeichnet.

In Abbildung 8 ist die Abhängigkeit der FFT- Parameter voneinander dargestellt. Es wird deutlich, dass diese Parameter nicht unabhängig voneinander zu wählen sind.

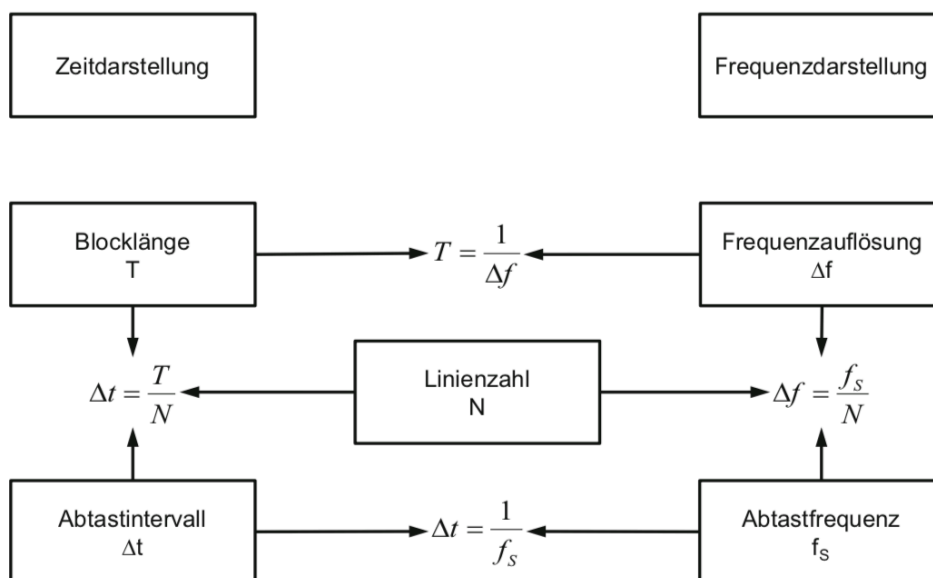


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen den FFT-Parametern [11]

Im Spektrum muss die höchste aufgenommene Frequenz f_{\max} kleiner als die halbe Abtastfrequenz (Nyquist-Frequenz) sein [11].

$$f_{\max} < \frac{f_s}{2} = \frac{N}{2} \cdot \Delta f \quad (4.2.2.3)$$

Die Messungen wurden mit einer Frequenz von 8192 Hz und einer Frequenzauflösung von 1 Hz durchgeführt.

4.2.3 Leakage-Effekt und Fensterung

In der Spektralanalysetheorie wird angenommen, dass sich das Signal zeitlich unendlich lang periodisch fortsetzt. In der Praxis existieren solche Signale jedoch nicht und jedes Signal weist einen Beginn und ein Ende auf. Durch endliche Beobachtungszeiträume bzw. endliche Blocklängen bei der Abtastung des Signals kann der sogenannte Leakage-Effekt entstehen. Abbildung 9 stellt das Auftreten des Leakage-Effektes durch limitierte Blocklängen dar.

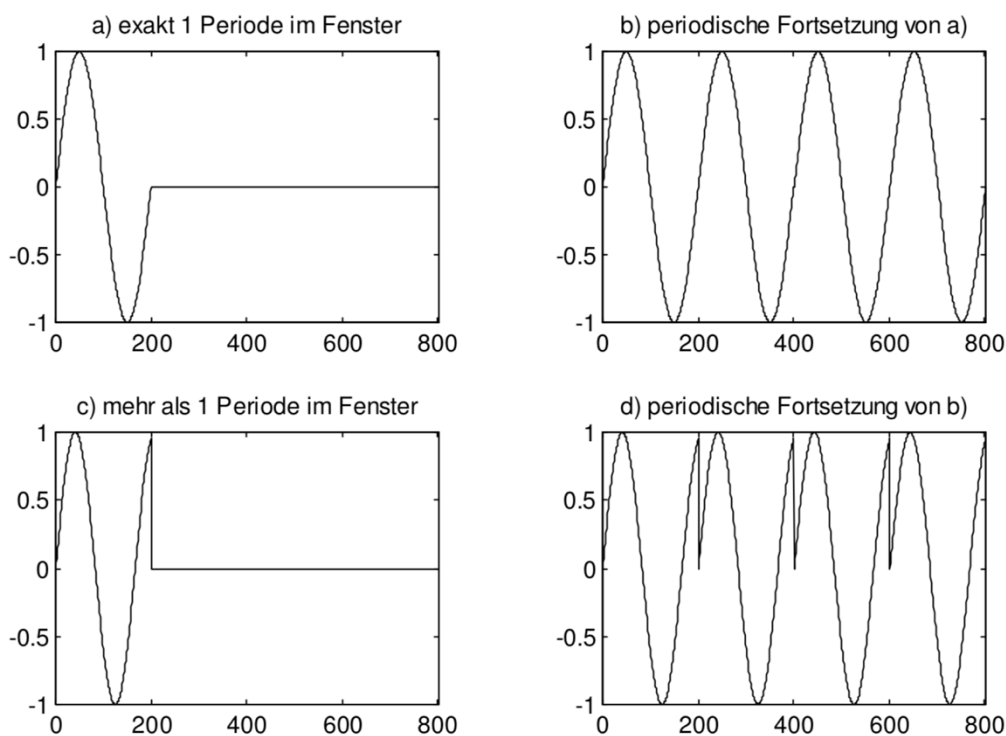


Abbildung 9: Signal im FFT-Fenster (links) und seine periodische Fortsetzung (rechts) [12]

Abbildung 9a zeigt, wenn die Fensterlänge der Periodenlänge entspricht, entsteht kein Leakage-Effekt. In der Abbildung 9c, ist dies nicht der Fall, bzw. mehr als eine Periode sind im Fenster erhalten, welche zur Entstehung der Leakage-Effekt führt. Im Zeitbereich verfälscht der Leakage-Effekt die periodische Fortsetzung von dem Signal und im Frequenzbereich verursacht das Auftreten von hochfrequenten Anteilen.

Der Leakage-Effekt kann durch die Auswahl längerer Blocklängen oder die Verwendung von Fensterfunktionen minimiert werden. Beim Einsatz einer Fensterfunktion werden die

ersten und die letzten Abtastwerte verschwinden und die dazwischen liegenden Abtastwerte sanfter behandelt. Damit wird eine periodische Fortsetzung ermöglicht, wodurch der Übergang in den nächsten Block keinen Sprung aufweist [12].

Um das Auftreten des Leakage-Effekts bei den Messungen von Impulsen in dieser Arbeit zu minimieren, wurde das Transientfenster eingesetzt. Das Transient ähnelt dem Rechteckfenster, ist jedoch kürzer als die Messdauer und weist damit eine stärkere Filtercharakteristik auf. Der Anfang und die Dauer des Fensters werden durch die Parameter „Shift“ und „Length“ eingestellt. Außerhalb des Fensters, werden alle anderen abgetasteten Werte, welche meistens Rauschen sind, auf Null eingesetzt und dadurch der Signal-Rausch-Abstand verbessert [13].

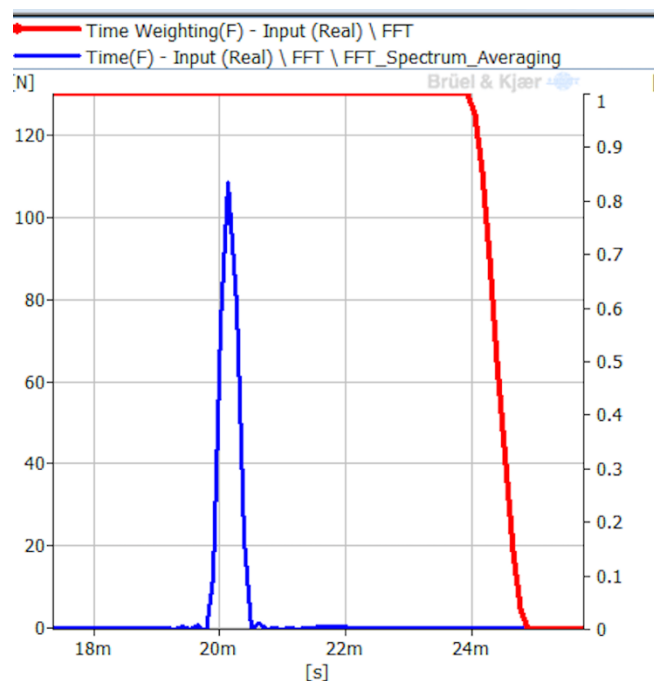


Abbildung 10: Transient Zeitfenster des Hammerimpulses [Bildschirmfoto]

Weiterhin werden durch „Taper“ der Anfang (Leading) und das Ende des Fensters (Trailing) ein- bzw. ausgeblendet. Für die Versuche in dieser Arbeit wurden 5 ms als „Leading-Taper“, 1 ms für das „Trailing-Taper“, 17 ms für das „Shift“ und 7 ms für das „Length“ eingestellt. Abbildung 11 stellt diese Parameter dar.

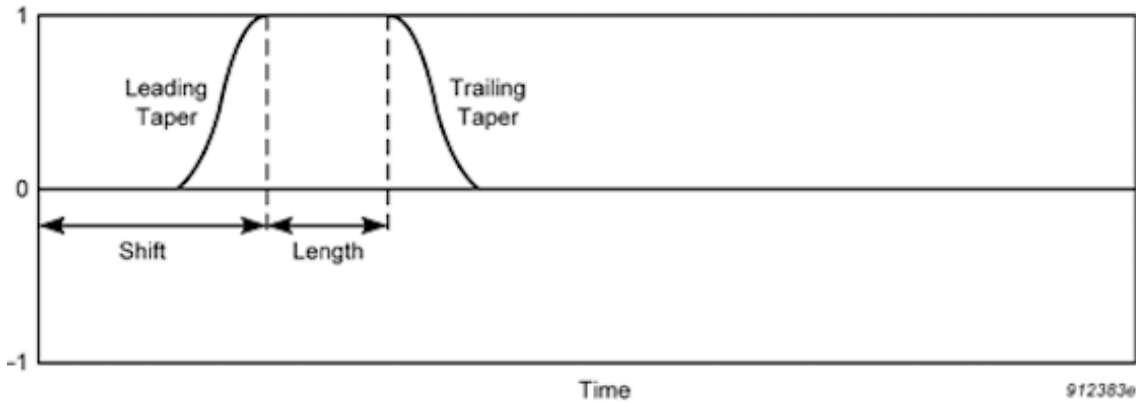


Abbildung 11: Transient Zeitfenster. Definition von "Shift", "Length" und "Taper". [B&K LabShop Manual]

Zur Analyse der Antwortsignale, besonders bei transienten Signalen, wird meistens das Exponentialfenster als die geeignetste Variante eingesetzt, da das Antwortsignale länger als die Messdauer sein kann [13]. Mittels Exponentialfenster wird das Signal am Ende des Blockes gedämpft. Abbildung 12 stellt dies dar.

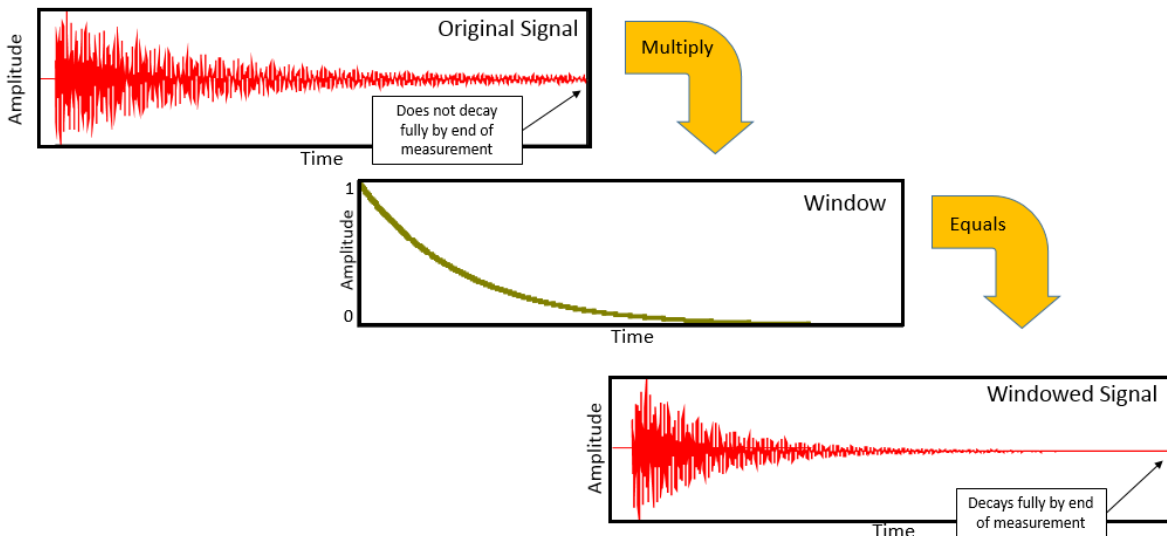


Abbildung 12: Multiplikation eines Signals mit dem Exponentialfenster. Das Signal wird dadurch gedämpft und das Auftreten des Leakage-Effekts wird damit gemindert [14]

$$w_{exp}(t) = e^{-t/\tau} \quad (4.2.3.1)$$

Gleichung (4.2.3.1) beschreibt das Exponentialfenster für $t_0 \leq t \leq T$. Die Stärke der Signaldämpfung hängt vom Dämpfungsparameter τ ab. Der Wert von τ gibt an, wie stark das

Signal im Vergleich zu seinem Anfangswert gedämpft wird. Je größer den Wert für τ , desto weniger wird das Signal gedämpft. Für die Messungen wurde ein τ von 800 ms, 17 ms für das „Shift“ und 7 ms für das „Length“ gewählt.

4.2.4 Übertragungsfunktionen H_1 , H_2 , Autospektrum und Kohärenzfunktion

Die Antwort eines dynamischen Systems auf eine äußere Anregung, z.B. einen Hammer-schlag, kann in der Frequenzdomäne mit Hilfe der Übertragungsfunktion definiert werden. Dabei werden das Anregungssignal und das Antwortsignal gemessen und mittels FFT transformiert.

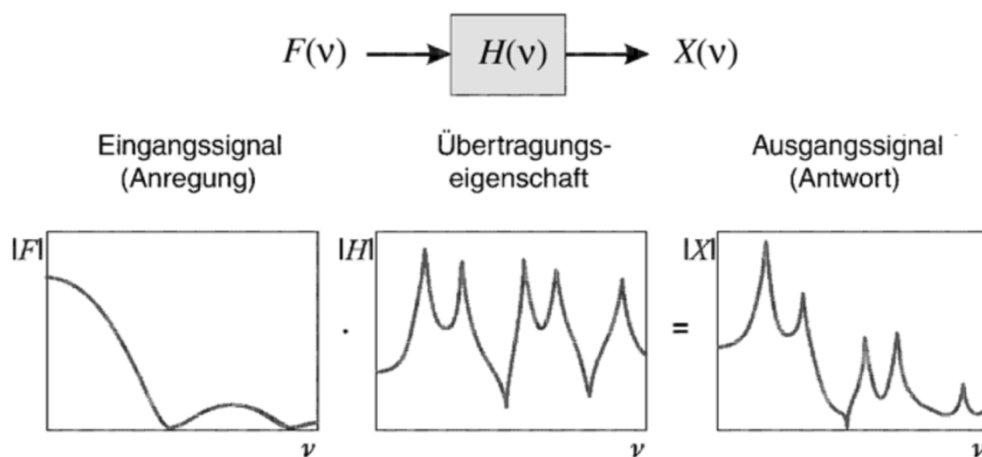


Abbildung 13: Übertragungskette (ν ist Frequenz) [15]

$$H(\omega) = \frac{\text{Ausgang}}{\text{Eingang}} = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (4.2.4.1)$$

Hierbei ist $H(\omega)$ die komplexe Übertragungsfunktion. $F(\omega)$ und $X(\omega)$ können durch Ersatz der Anregungs- und Antwortsignale berechnet werden.

Die Anregungs- und Antwortsignale werden, wie alle anderen realen Signale, in der Praxis von Störgrößen beeinflusst. Diese Störgrößen können z.B. durch elektrisches Rauschen der Messkette, also einen stochastischen Fehler, entstehen und damit das Ergebnis der daraus errechneten Übertragungsfunktionen verfälschen [15].

Um die Einflüsse der Störgrößen zu minimieren, definiert man die Übertragungsfunktionen H_1 und H_2 . Die spektrale Kreuzleistungsdichte $S_{x_1x_2}$ bzw. $S_{x_2x_1}$ und spektrale Autoleistungsdichte $S_{x_1x_1}$ bzw. $S_{x_2x_2}$ werden für die Schätzung von Übertragungsfunktionen aus fehlerhaften gemessenen Signalen verwendet.

$$S_{x_1x_2} = X_1(\omega)^* \cdot X_2(\omega) \quad (4.2.4.2)$$

$$S_{x_2x_1} = X_2(\omega)^* \cdot X_1(\omega) \quad (4.2.4.3)$$

$$S_{x_1x_1} = X_1(\omega)^* \cdot X_1(\omega) \quad (4.2.4.4)$$

$$S_{x_2x_2} = X_2(\omega)^* \cdot X_2(\omega) \quad (4.2.4.5)$$

Hierbei ist $X_n(\omega)^*$ die konjugierte Form des komplexen Messsignals $X_n(\omega)$. Damit können die Übertragungsfunktionen H_1 und H_2 wie folgt definiert werden:

$$H_1(\omega) = \frac{S_{x_1x_2}}{S_{x_1x_1}} \quad (4.2.4.6)$$

$$H_2(\omega) = \frac{S_{x_2x_2}}{S_{x_2x_1}} \quad (4.2.4.7)$$

Wenn Antwortsignale fehlerhaft sind, wird die Übertragungsfunktion H_1 verwendet. Wenn Anregungssignale mit stochastischen Fehlern überlagert sind, setzt man die Übertragungsfunktion H_2 ein. Die Messungen in der vorliegenden Arbeit werden mittels der Übertragungsfunktion H_1 bewertet. Mit wachsender Mittelungszahl im FFT-Analysator strebt die H_1 -Schätzung gegen den Wert der wahren Übertragungsfunktion H [15].

Bei den Messungen wurde weiterhin mit der Darstellung der spektralen Leistungsdichte über der Frequenzachse, welche man Autospektrum nennt, der nutzbare Frequenzbereich für jeden Hammerschlag überprüft.

Als Erfahrungswert gilt, dass der Frequenzbereich im Autospektrum bis zu einem Amplitudenabfall des Anregungssignals von 20 dB auswertbar ist. Abbildung 14 stellt das Autospektrum bei einem in dieser Arbeit verwendeten Hammersignal dar. Der Abfall von 90 dB auf 70 dB bei 3,2 kHz bedeutet, dass das Signal für die gesamte Frequenzspanne bis 3,2 kHz bewerten werden kann.

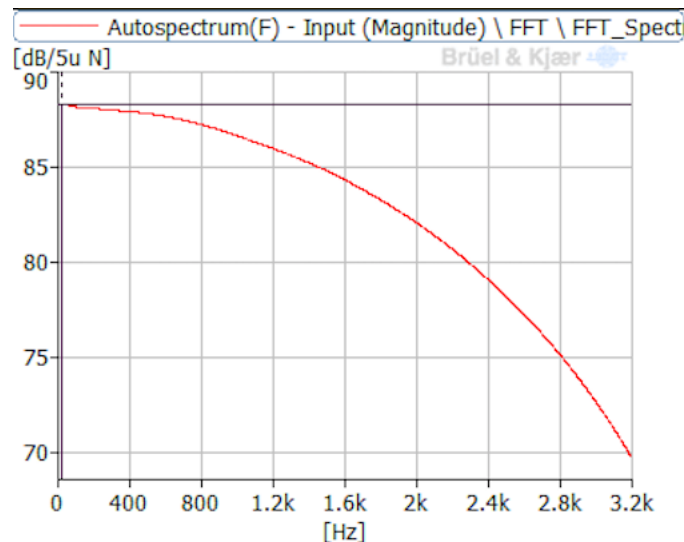


Abbildung 14: Autospektrum des Hammersignals. Ab einem Abfall von 20 dB im Anregungsspektrum sind die Ergebnisse der höheren Frequenzen schlecht bewertbar [Bildschirmfoto]

Eine weitere Funktion, welche zur Beurteilung der Störungen und deren Einflüsse auf die Übertragungsfunktion zum Einsatz kommt, ist die Kohärenzfunktion. Diese beschreibt den Grad der linearen Abhängigkeit zweier Signale, also dem Anregungs- und Antwortsignal, als Funktion der Frequenz [15].

$$\gamma^2 = \frac{|S_{x_1 x_2}|^2}{S_{x_1 x_1} S_{x_2 x_2}} \quad (4.2.4.8)$$

γ^2 kann einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen. Der Wert 1 weist auf einen idealen linearen Zusammenhang zweier Signale hin [15]. Abbildung 15 stellt eine Beispiel-Übertragungsfunktion und die dazugehörige Kohärenz dar

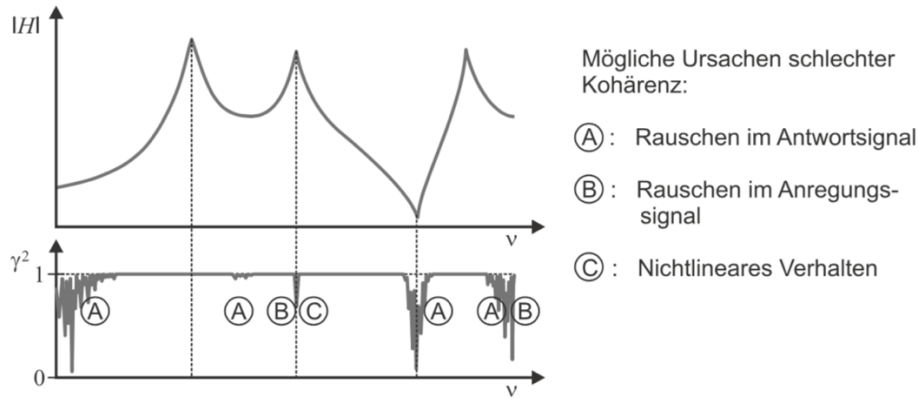


Abbildung 15: Übertragungsfunktion und dazugehörige Kohärenz [15]

Die sogenannten „Kohärenzeinbrüche“ können bspw. durch geringere Frequenzauflösungen, Auftreten des Leakage-Effekts, defekte Anschlusskabel oder Sensoren zustande kommen. Bei Impulshammermessungen können ungleichmäßiges Anschlagen des Untersuchungsobjektes, hinsichtlich Kraftamplitude, Richtung und Anregungsstelle Ursachen der Kohärenzeinbrüche sein [15].

4.3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Gegenstand der Untersuchung sind die Eingangsimpedanzen der in Abbildung 16 dargestellten zusammengesetzten Bauteile. Das Messobjekt wurde mittels Federn an einen Profilrahmen gehängt, sodass die Bedingungen für eine frei-freie Schwingung erfüllt sind. Das Kreuz wurde als Hilfskonstruktion zur Bestimmung der Eingangsadmittanzen genutzt.

In der Abbildung 32 (Anlagen) sind die Maße des Kreuzes zu finden. Die Geometrie des verwendeten Kreuzes ermöglicht die Anregung von allen translatorischen und rotatorischen Freiheitsgraden. Ein aus Aluminium bestehendes Balkenprofil (Profil 8, 80 mm × 80 mm; hergestellt von der Firma „item“) wird mittels Schrauben an der Bohrungsstelle des Kreuzes gekoppelt.

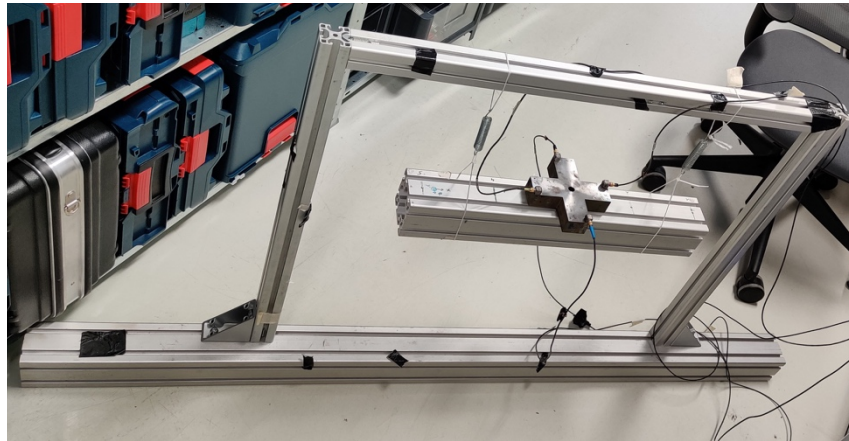


Abbildung 16: Foto des Versuchsaufbaus

Der VP befindet sich an der Kontaktstelle des Kreuzes und des Balkens (s. Abbildung 2). Die Orientierung der Sensoren und ihre Abstände sowie die Abstände der Anregungspunkte und deren Anregungsrichtungen sind in Bezug auf den VP definiert. In Tabelle 2 sind die Anregungspunkte zu ihren jeweiligen Anregungsrichtungen zugeordnet.

Tabelle 2: Anregungsrichtungen an verschiedenen Anregungspunkte

| Anregungspunkt | Anregungsrichtung | Anregungspunkt | Anregungsrichtung |
|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| 1.1 | -Y | 11.1 | -X |
| 1.2 | -Y | 11.2 | -X |
| 2.1 | -Y | 12.1 | -X |
| 2.2 | -Y | 12.2 | -X |
| 3.1 | -Y | 13.1 | +Z |
| 3.2 | -Y | 13.2 | +Z |
| 4.1 | -Y | 14.1 | +Z |
| 4.2 | -Y | 14.2 | +Z |
| 5.1 | -Y | 15.1 | +X |
| 5.2 | -Y | 15.2 | +X |
| 6.1 | -Y | 16.1 | +X |
| 6.2 | -Y | 16.2 | +X |
| 7.1 | -Y | 17.1 | -Z |
| 7.2 | -Y | 17.2 | -Z |
| 8.1 | -Y | 18.1 | -X |
| 8.2 | -Y | 18.2 | -X |
| 9.1 | -Z | 19.1 | +Z |
| 9.2 | -Z | 19.2 | +Z |
| 10.1 | -Z | 20.1 | +X |
| 10.2 | -Z | 20.2 | +X |

Alle Messungen wurden jeweils mit 3 und 4 Beschleunigungssensoren durchgeführt, welche je nach Versuchsvarianten in unterschiedlichen Positionen auf dem Kreuz eingesetzt wurden.

Bei allen Messungen sind die Anregungsstellen konstant positioniert. Die Anregungsstellen sind auf den Abbildungen 17 und 18 zu sehen.

In den folgenden Abschnitten sind die Messeinstellungen der jeweiligen Aufbauten genauer dargestellt.

4.3.1 Versuch A

Bei Versuch A wurden insgesamt 40 Anregungsstellen mittels Impulshammer angeregt. Die Punkte mit X.1 sind in Bezug auf den VP am entferntesten und die Punkte mit X.2 am nächsten angeordnet.

Die Sensoren sind an der vorderen Seite der Kreuz-Flügel mittig positioniert.

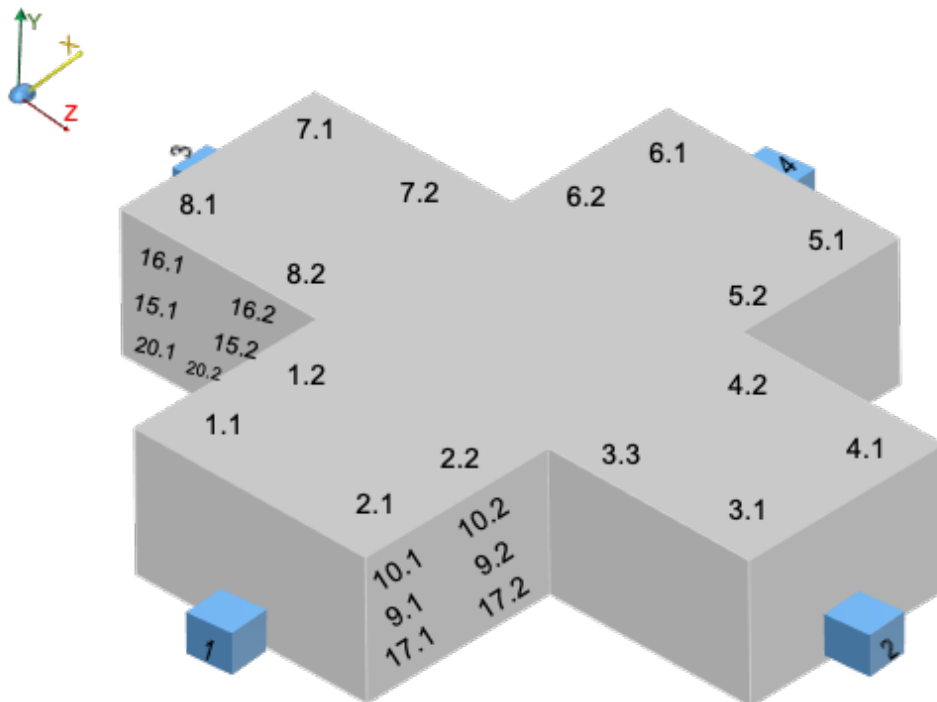


Abbildung 17: Positionen der Anregungspunkte und Position der Beschleunigungssensoren (Blau) bei Versuchsaufbau A. Die Sensoren sind an der vorderen Seite des Kreuz-Flügels mittig positioniert.

Zur Veranschaulichung der Anregungspunkte auf dem Kreuz, wird dieser Aufbau in zwei unterschiedlichen Winkeln dargestellt.

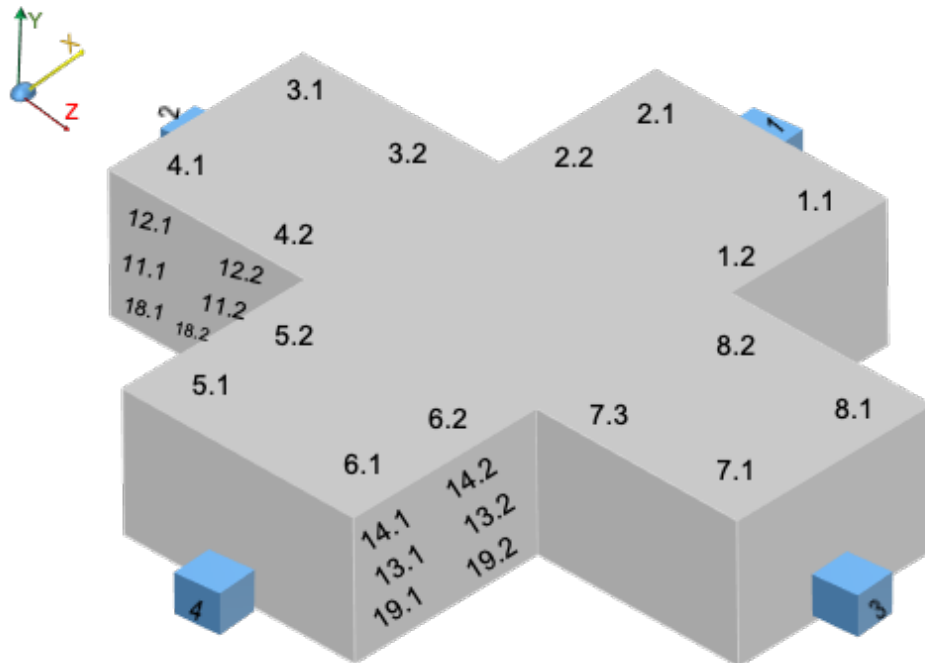


Abbildung 18: Positionen der Anregungspunkte und Position der Beschleunigungssensoren (Blau) bei Versuchsaufbau A. Zur Veranschaulichung werden die Messpunkte aus einem anderen Blickwinkel dargestellt.

4.3.2 Versuch B

Analog zu Versuch A wird Versuch B ebenfalls mit 40 Anregungsstellen und jeweils 3 und 4 Beschleunigungssensoren durchgeführt. Die Sensoren sind an der vorderen Seite der Kreuz-Flügel, aber in diesem Fall oben, positioniert.

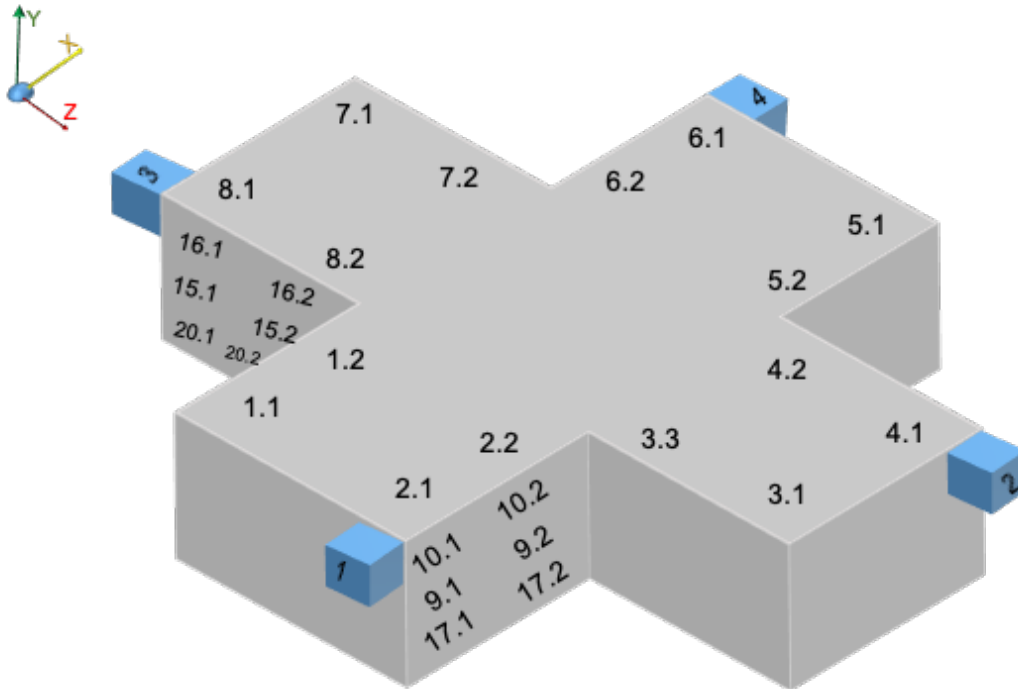


Abbildung 19: Positionen der Anregungspunkte und Position der Beschleunigungssensoren (Blau) bei Versuchsaufbau B. Die Sensoren sind an der vorderen Seite der Kreuz-Flügel, oben positioniert.

4.3.3 Versuch C

Bei Versuch C wurden die Beschleunigungssensoren oben auf dem Kreuz positioniert. Somit können die Punkte 2, 4, 6, 8 nicht angeregt und in der Auswertung nicht berücksichtigt werden.

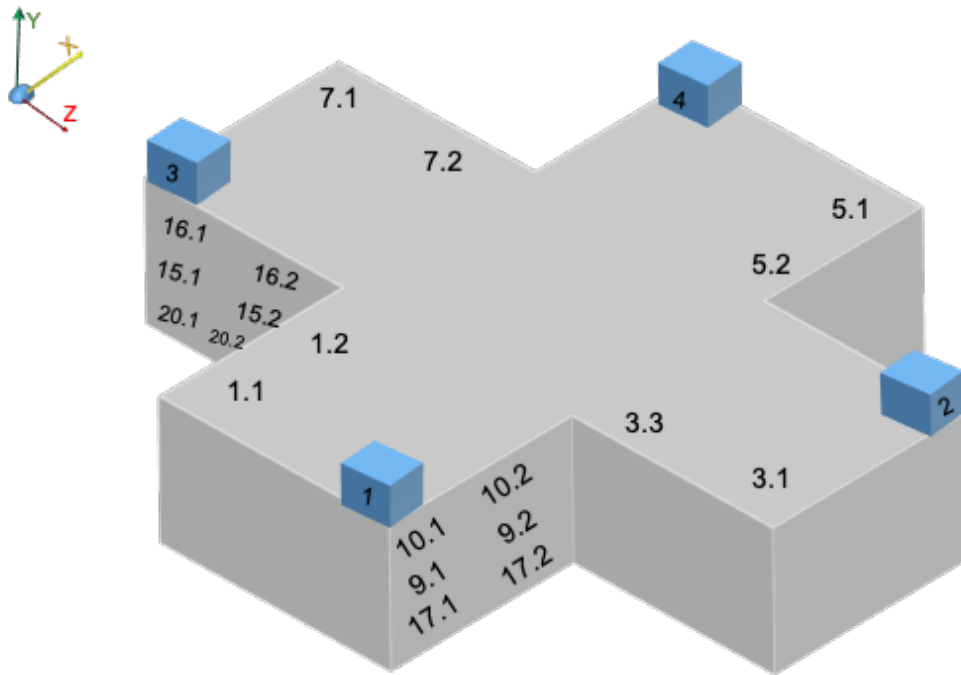


Abbildung 20: Positionen der Anregungspunkte und Position der Beschleunigungssensoren (Blau) bei Versuchsaufbau C. Die Beschleunigungssensoren sind oben auf dem Kreuz positioniert.

5 Auswertung

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Varianten bei der Auswertung der bereits erläuterten Messung in Unterkapitel 4.3 diskutiert und die Ergebnisse präsentiert. Die Anzahl der Anregungsstellen und Sensoren und die Position der Anregungsstellen wird bei den Aufbauten A, B, C jeweils mit 10 Wiederholungsmessungen unter absolut gleichen Bedingungen je Aufbau bewertet. Die Ergebnisse der γ_{qm} -Matrizen aus diesen Wiederholungsmessungen werden in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die Abweichungsbereiche sind farblich gekennzeichnet. Die guten Reproduzierbarkeitsergebnisse beziehen sich auf schmale Abweichungsbereiche.

5.1 Position der Anregungspunkte

Es wurde zuerst eine Anzahl von 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren als Referenzeinstellung festgelegt. Bei der Auswahl der Anregungspunkte wurde darauf geachtet, dass diese das Kreuz in alle Richtungen X, Y und Z anregen. Anregung des Kreuzes in -Y war aufgrund des Versuchsaufbaus nicht möglich. Nach [6], für die Abbildung der rotatorischen Freiheitsgrade, sind drei Sensoren empfohlen. Die Anregungsrichtungen sind in der Tabelle 2 angegeben und die Abbildungen 17 und 18 zeigen die Positionen dieser Anregungspunkte auf dem Kreuz.

Um den Einfluss der Position der Anregungspunkte zu untersuchen, wurden drei unterschiedlichen Varianten bei der Auswahl der Anregungspunkte definiert. Tabelle 3 stellt diese drei Varianten dar. Die Anregungen in -Y bleiben bei allen diese drei Varianten konstant, jedoch sind die Anregungen an der Seite des Kreuzes X und Z unterschiedlich gewählt. Bei Variante 1 wurden die mittigen Anregungspunkte an der Seite des Kreuzes ausgewählt. Bei Variante 2 sind die oberen Punkte und bei Variante 3 die unteren Punkte an der Seite des Kreuzes angeregt.

Tabelle 3: Varianten bei der Position der Anregungspunkte

| | | | | | | | | |
|---------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Vari.1 | 1.1 | 3.1 | 5.1 | 7.1 | 9.1 | 11.1 | 13.1 | 15.1 |
| Vari.2 | 1.1 | 3.1 | 5.1 | 7.1 | 10.1 | 12.1 | 14.1 | 16.1 |
| Vari.3 | 1.1 | 3.1 | 5.1 | 7.1 | 17.1 | 18.1 | 19.1 | 20.1 |

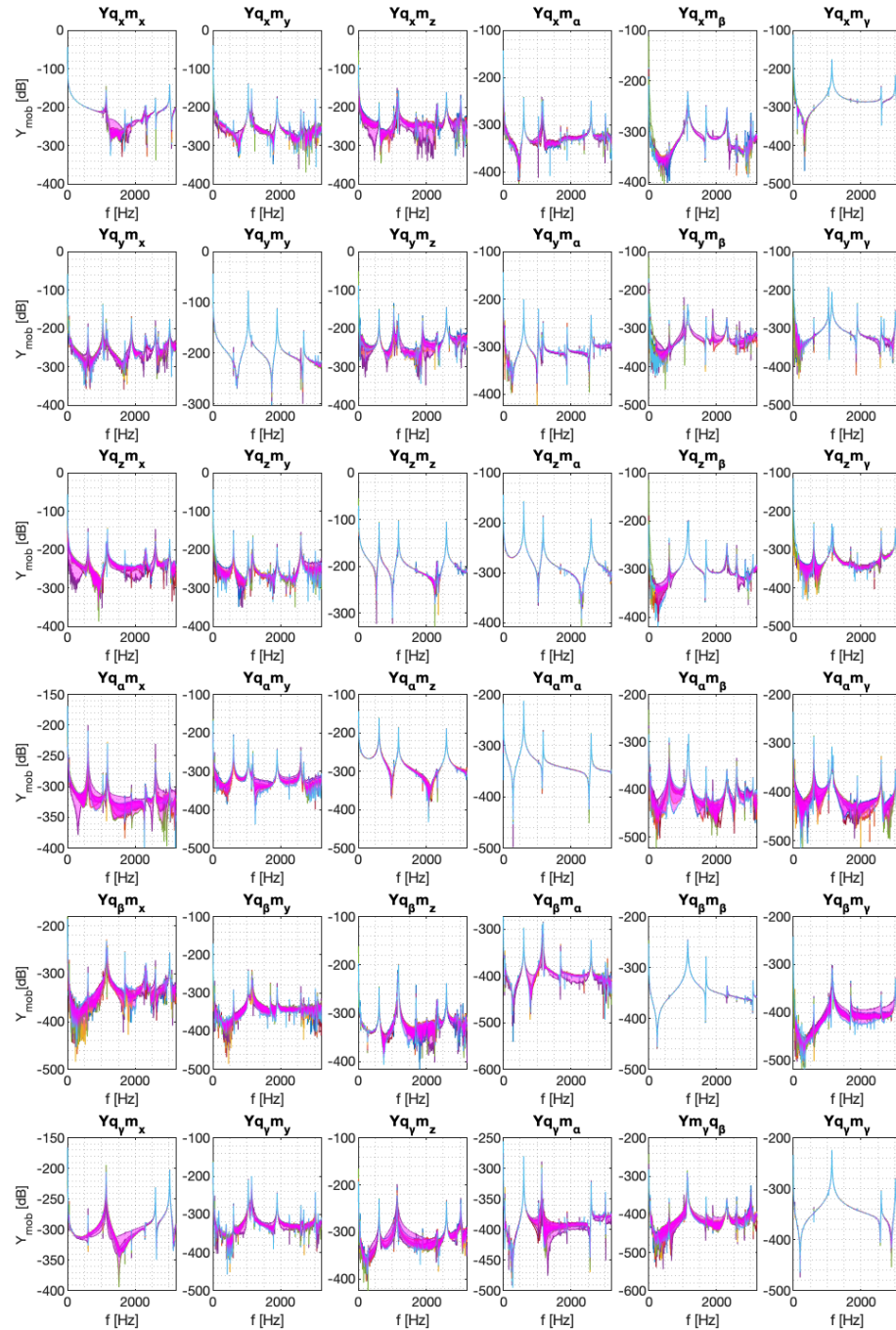


Abbildung 21: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau A mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 1)

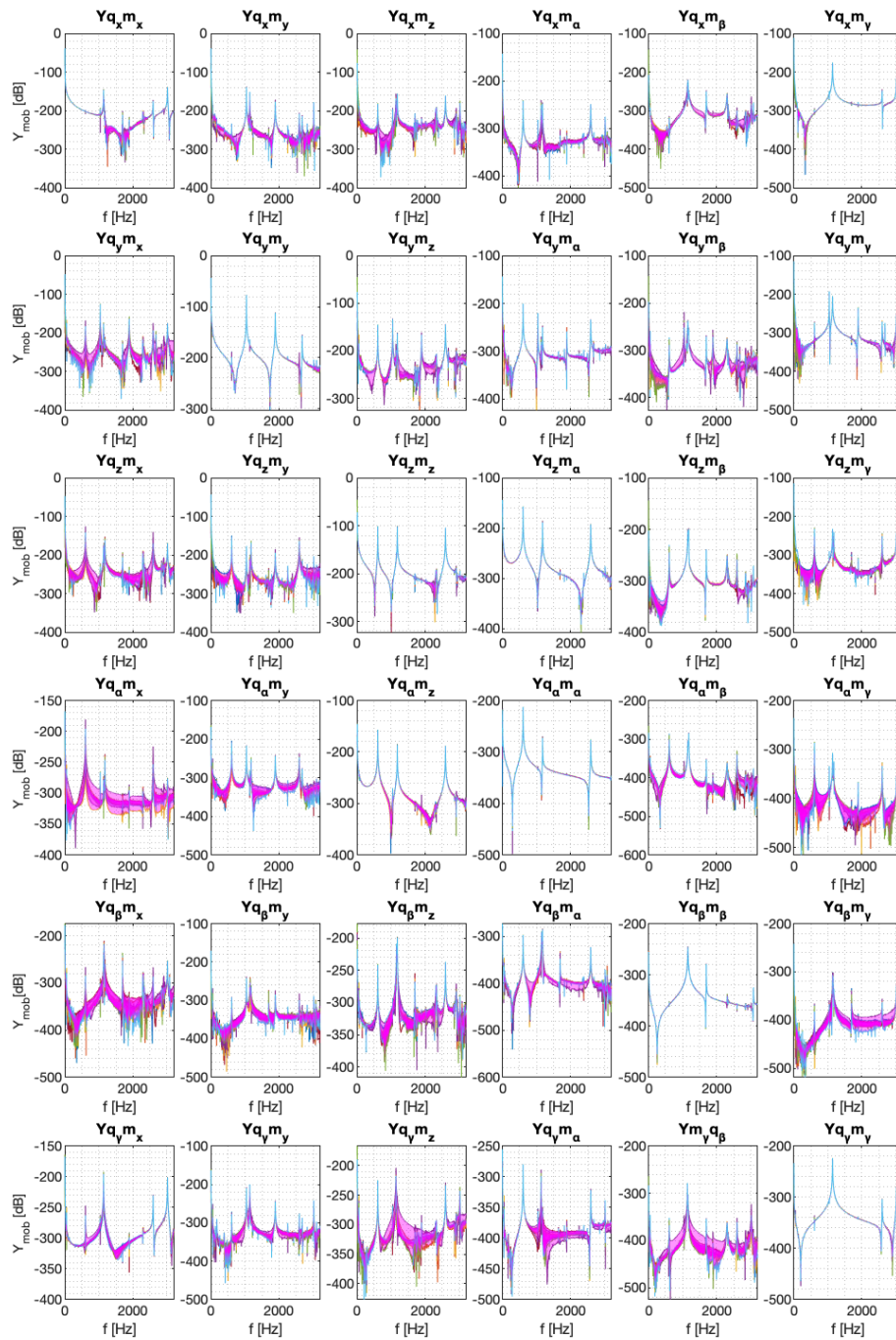


Abbildung 22: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau A mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 2)

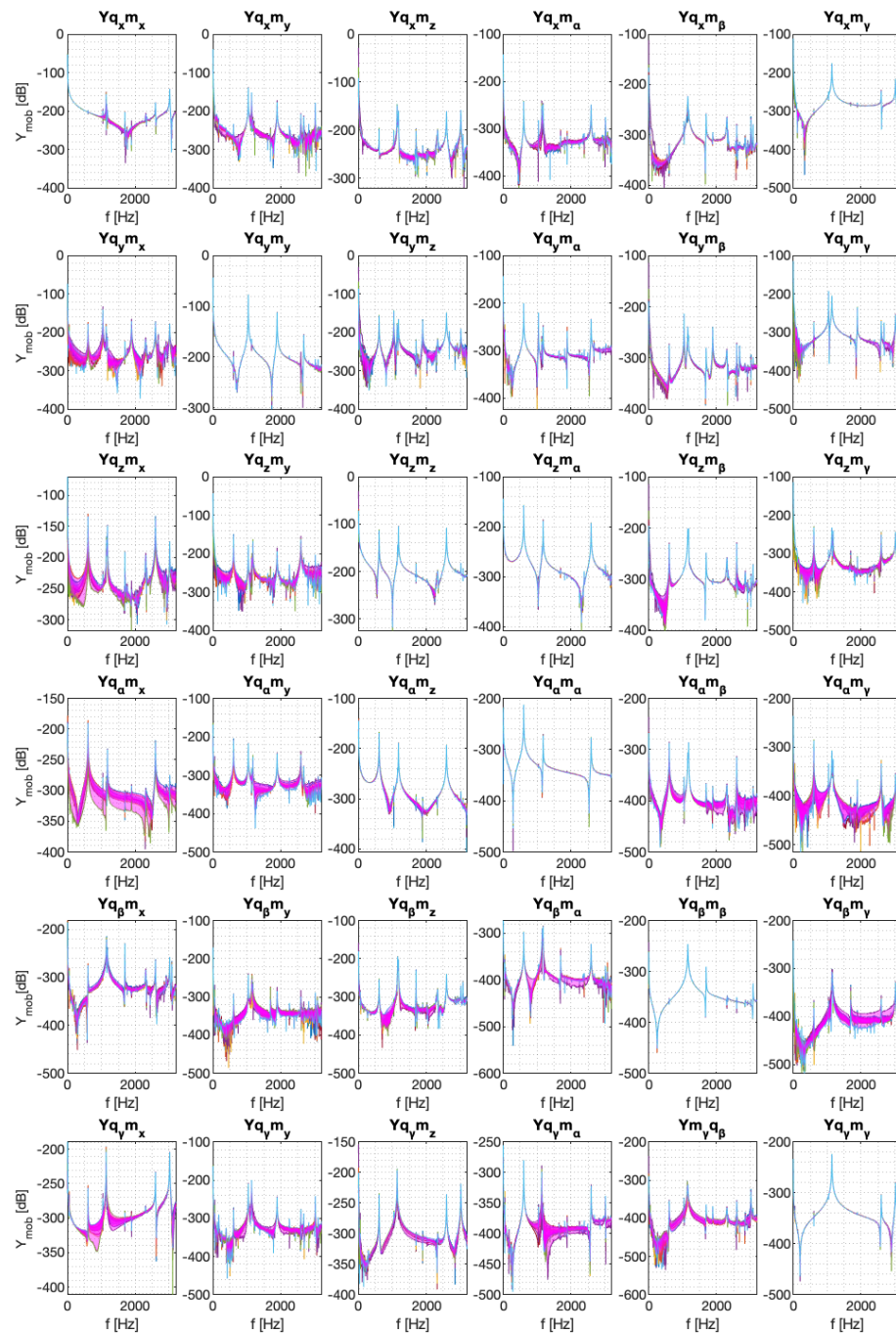


Abbildung 23: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau A mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 3)

Abbildungen 21, 22 und 23 stellen die transformierten Admittanzmatrizen für die drei Varianten aus Tabelle 3 dar. Aus dem Vergleich zwischen den genannten Abbildungen stellt sich die Variante 3 als die optimale Variante bei der Auswahl der Anregungsstellen an der Seite des Kreuzes dar. Die Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Y_{qm} -Matrix ist bei den Kraftspalten m_x, m_z und m_β deutlich. Die gleichen Ergebnisse stellen sich für die Aufbauten B und C heraus. (vgl. Anlagen, Abbildungen 33 bis 36)

Die Abstände der Anregungskräfte vom VP in X Koordinaten und Z Koordinaten sind bei den drei Varianten konstant. Jedoch bei Variante 3, ist r_f in Y Koordinaten kleiner als die anderen Varianten.

Also haben nähere Abstände in Y Koordinaten, bei Anregungen in der X- und Z- Richtung bei allen Sensoraufbauten zu einer besseren Reproduzierbarkeit für m_x, m_z und m_β Spalten und bei der Y_{qm} geführt.

5.2 Anzahl der Anregungspunkte

In diesem Unterkapitel wird die Reproduzierbarkeit der transformierten Admittanzmatrizen in Abhängigkeit von der Anzahl der Anregungspunkte bei Aufbauten A, B und C geprüft.

Dabei wurden 16 Punkte gewählt. Die 8 Punkte aus Variante 3 Tabelle 3 und dazu noch 8 weitere Punkte X.2, welche doppelt so nah am VP liegen. Die verwendeten Anregungspunkte bei dieser Auswertung sind in der Tabelle 4 gelistet.

Tabelle 4: 16 Anregungspunkte

| Anregungspunkte | 1.1 | 1.2 | 3.1 | 3.2 | 5.1 | 5.2 | 7.1 | 7.2 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 17.1 | 17.2 | 18.1 | 18.2 | 19.1 | 19.2 | 20.1 | 20.2 |

Die Abbildungen 24, 25 und 26 stellen die Ergebnisse dar. Die Reproduzierbarkeit der Transformation ist durch Anwendung von mehr Anregungspunkten verbessert, vgl. mit den Abbildungen 23, 30, und 31, bei denen nur 8 Anregungspunkte an der Transformation beteiligt waren. Jedoch ähneln sich die Ergebnisse, also genügen 8 Anregungspunkte, welche die Anregung des Bauteils in alle Richtungen X, Y, und Z ermöglichen, um gute Ergebnisse für die VPT zu erzielen.

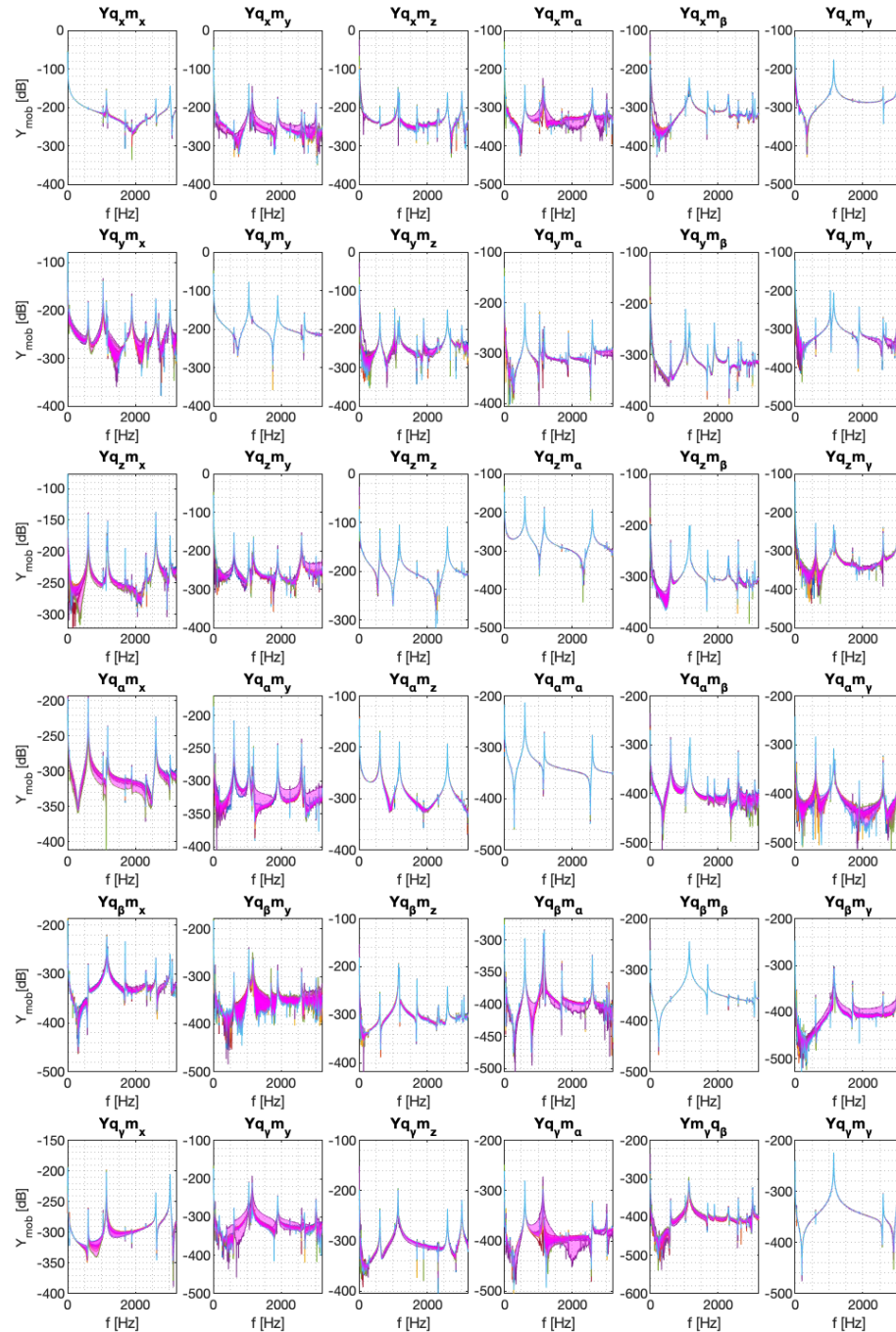


Abbildung 24: Die transformierten Eingangsadmittenzen, Aufbau A mit 16 Anregungspunkten und 3 Sensoren

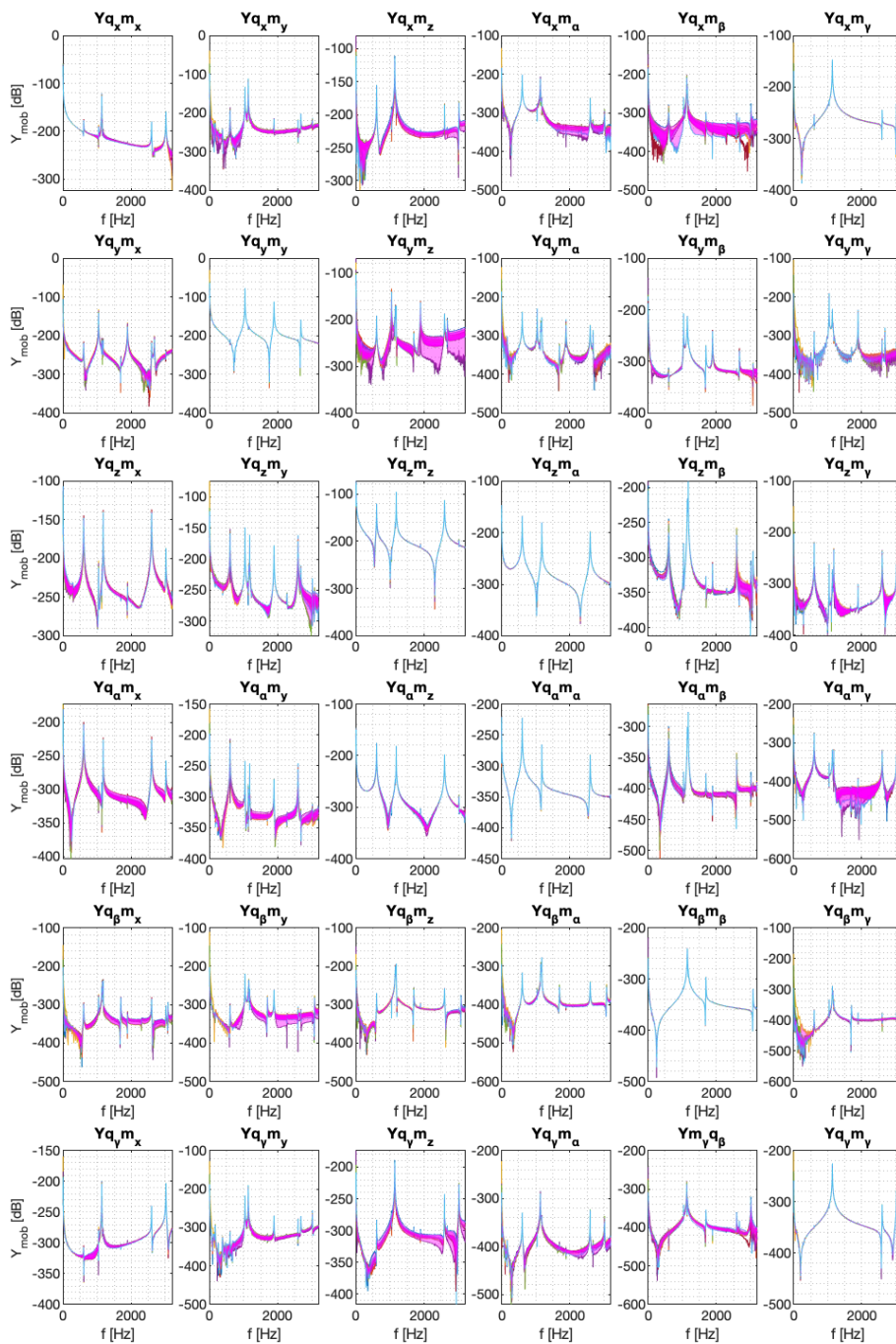


Abbildung 25: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau B mit 16 Anregungspunkten und 3 Sensoren

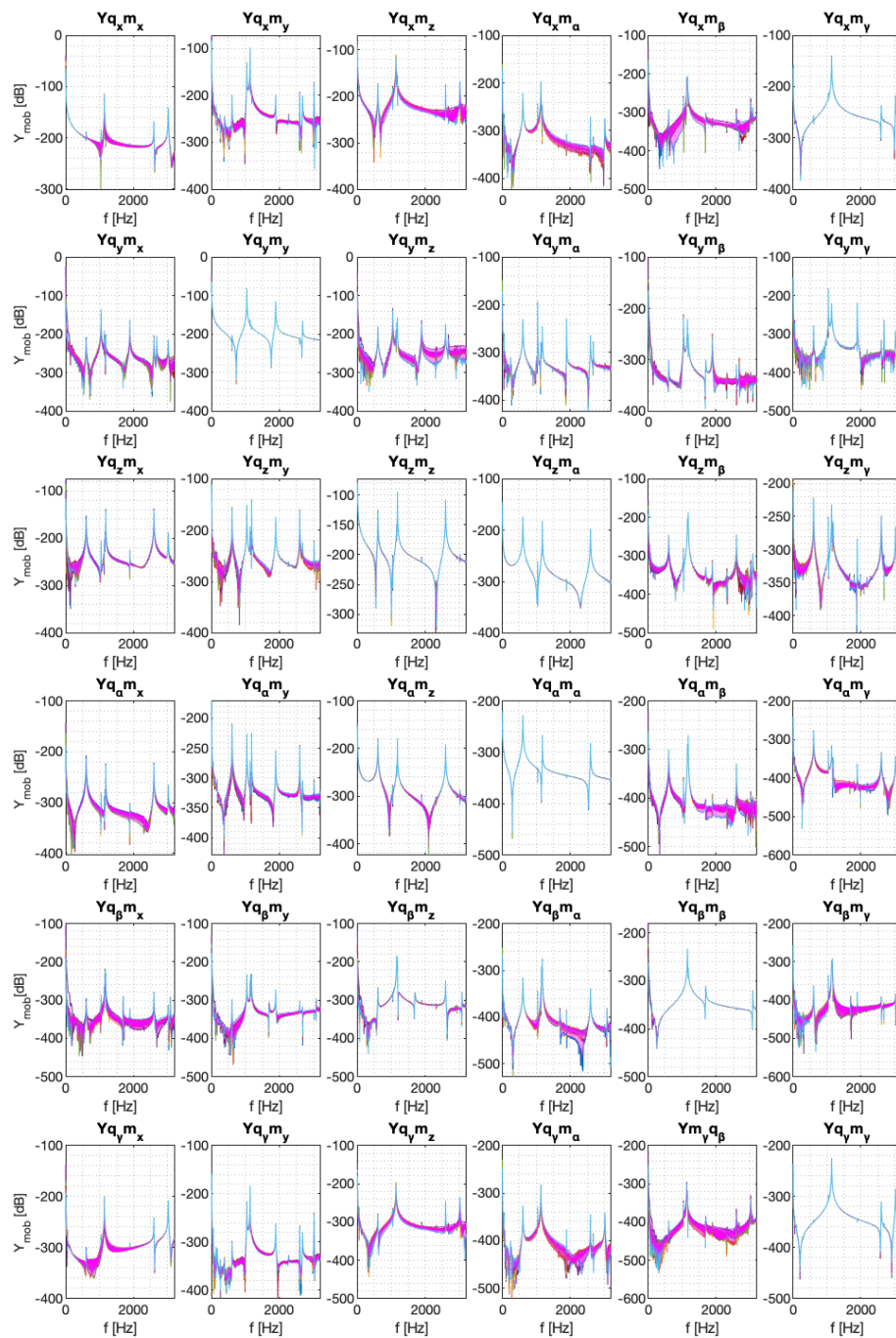


Abbildung 26: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau C mit 16 Anregungspunkten und 3 Sensoren

5.3 Anzahl der Sensoren

Nun werden die Aufbauten A, B und C mit den 8 Anregungspunkten aus der Tabelle 3 (Variante 3) jeweils mit 4 Sensoren untersucht. Die Abbildungen 27, 28, und 29 stellen die Ergebnisse für die Hauptdiagonalen und Nebendiagonalen der transformierten Admittanzmatrizen dar. Die Verbesserungen bei der Reproduzierbarkeit der Transformation durch Anwendung von 4 Sensoren sind bei allen Aufbauten nicht erheblich.

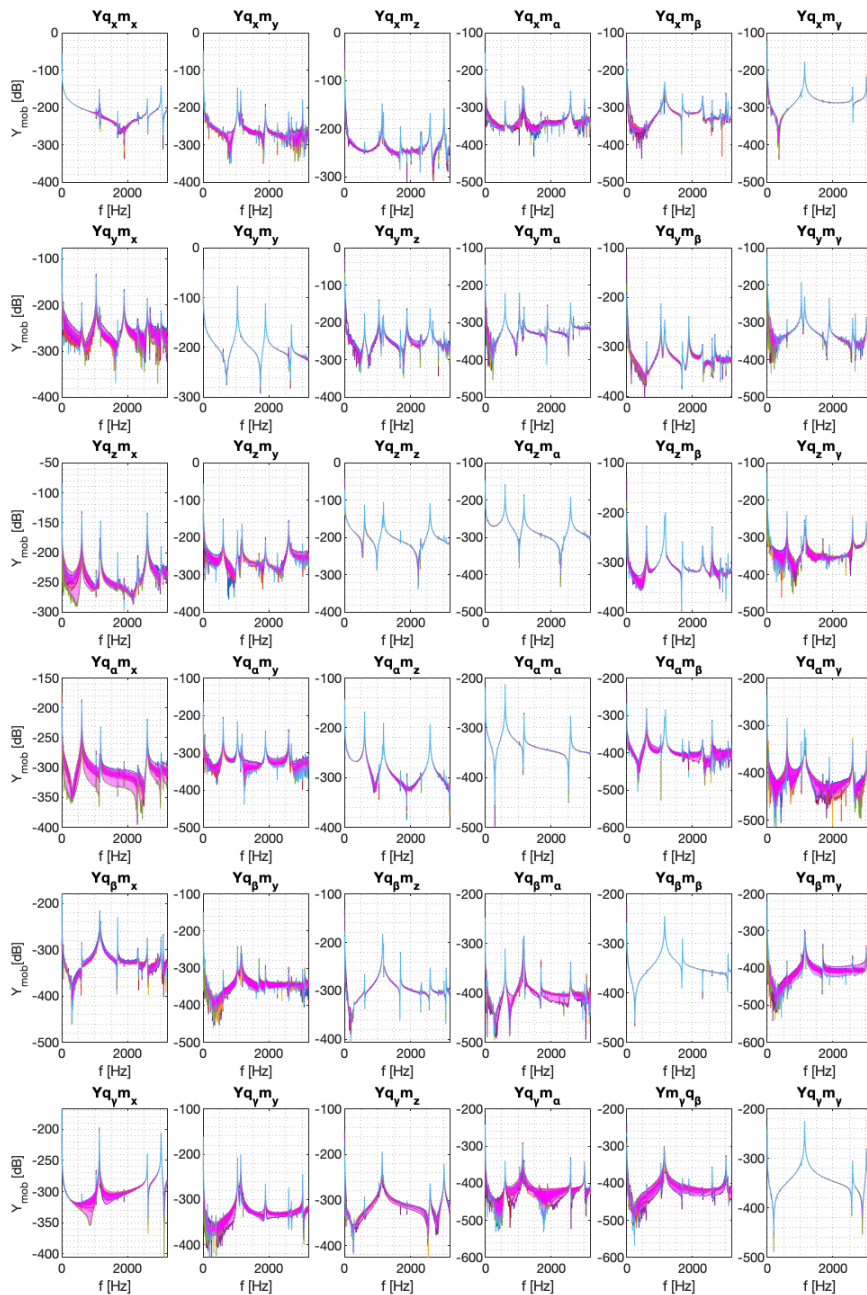


Abbildung 27: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau A mit 8 Anregungspunkten und 4 Sensoren

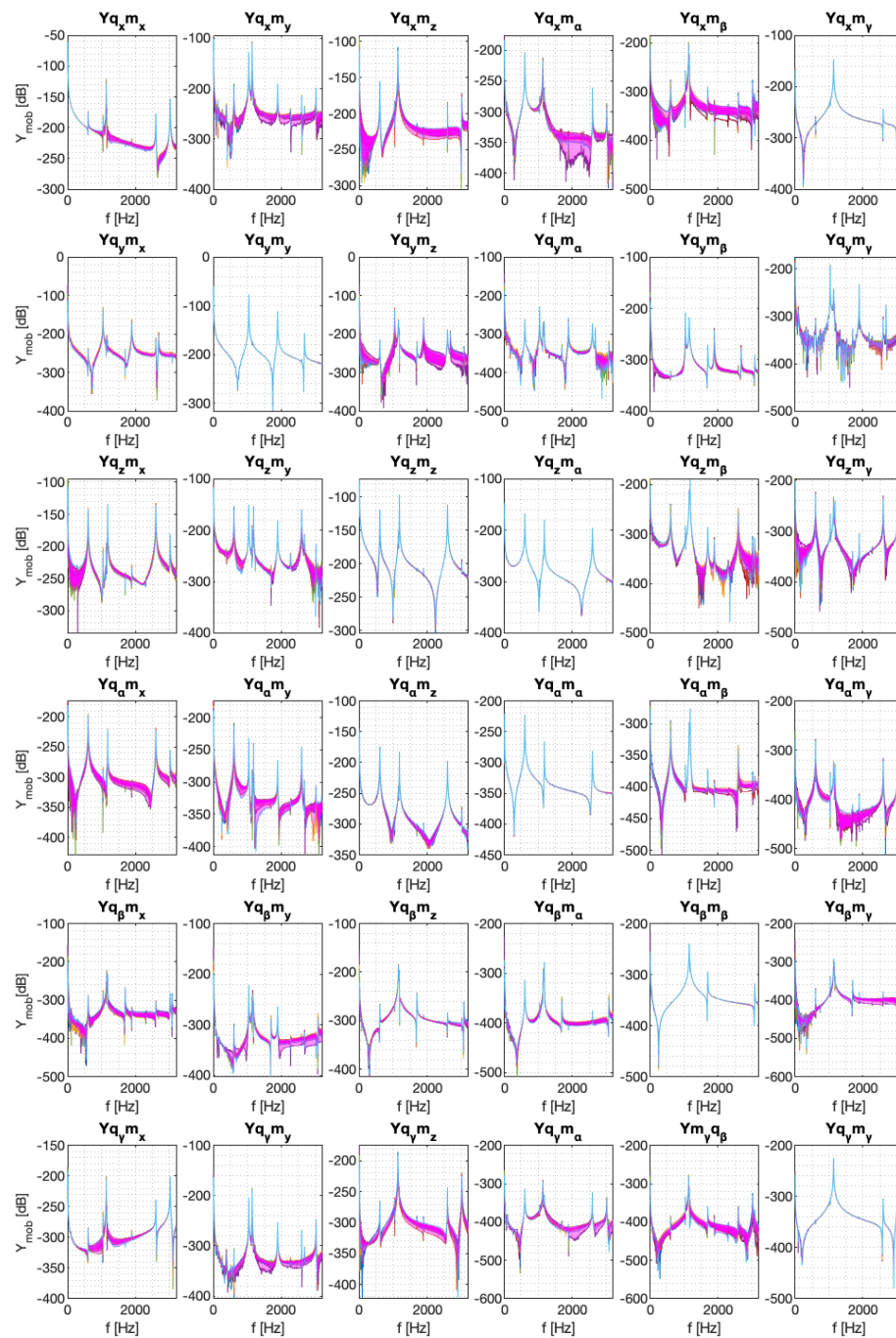


Abbildung 28: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau B mit 8 Anregungspunkten und 4 Sensoren

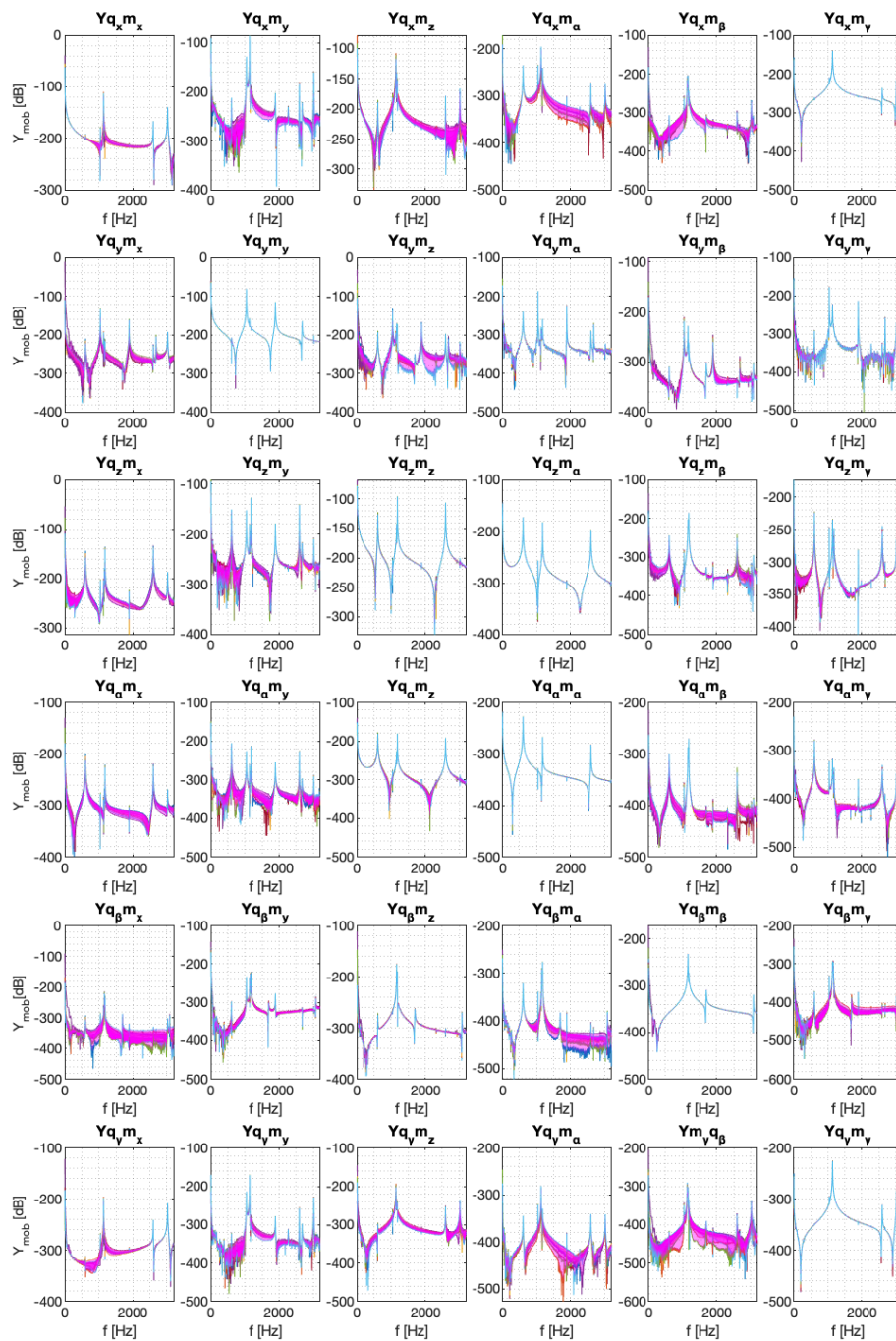


Abbildung 29: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau C mit 8 Anregungspunkten und 4 Sensoren

5.4 Position der Sensoren

Es werden die drei Sensorpositionen A, B und C jeweils mit 8 Anregungspunkte aus Tabelle 3 (Variante 3) ausgewertet, um den Einfluss der Position der Sensoren auf die Reproduzierbarkeit der transformierten Eingangsadmittanzen zu prüfen. Die Abbildungen 23, 30, und 31 stellen die Ergebnisse für die Hauptdiagonalen und Nebendiagonalen der transformierten Übertragungsmatrizen dar. Alle Sensoraufbauten zeigen gute Reproduzierbarkeitsergebnisse. Aufbau B und C, zeigen bessere Ergebnisse im Vergleich zum Aufbau A.

Die Sensoren bei der Aufbauvariante A werden mittig auf der äußeren Seite des Kreuzflügels positioniert. Dadurch, dass der VP in der Mitte des Kreuzes liegt (s. Abbildung 2), ergibt sich in der Sensoren-Abstandsmatrix $r_{u_A}^k$, an den Stellen X und Z, Null.

$$r_{u_A}^1 = \begin{bmatrix} -73,3 \\ 7 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm}, \quad r_{u_A}^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 7 \\ 75 \end{bmatrix} \text{ mm}, \quad r_{u_A}^3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 7 \\ -75 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Das führt zu einer schlechteren Reproduzierbarkeit der transformierten Kraftspalte m_x bei der y_{qm} Matrix. Mit kleinerem Abstand der Sensoren vom VP, wird der relative Fehler bei der Positionierung der Sensoren größer und somit werden die Transformationsergebnisse ungenauer.

Da $r_{u_B}^k$ und $r_{u_C}^k$ an keiner Stelle Null ergeben, bzw. die Sensoren außerhalb der VP-Achse liegen, werden die Kräfte am VP in X Richtung besser transformiert.

Aus diesem Grund ist es zu empfehlen, dass bei der Position der Sensoren auf dem Kreuz, den Aufbau A zu vermeiden. Die Reproduzierbarkeitsergebnisse aus Aufbau B und C sind ähnlich. Es sind weitere Schritte zur Validierung der Ergebnisse anhand numerischer Verfahren nötig.

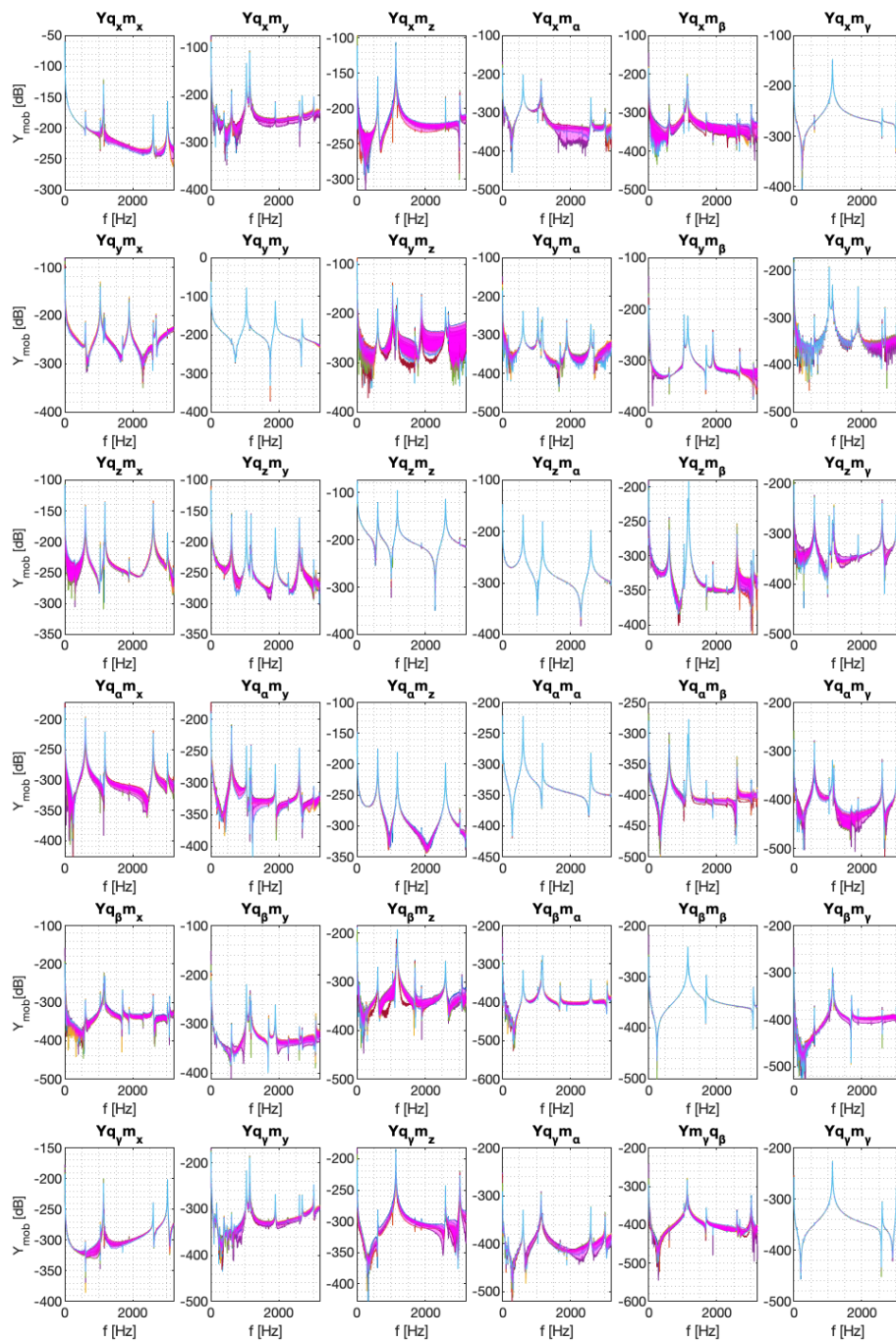


Abbildung 30: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau B mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 3)

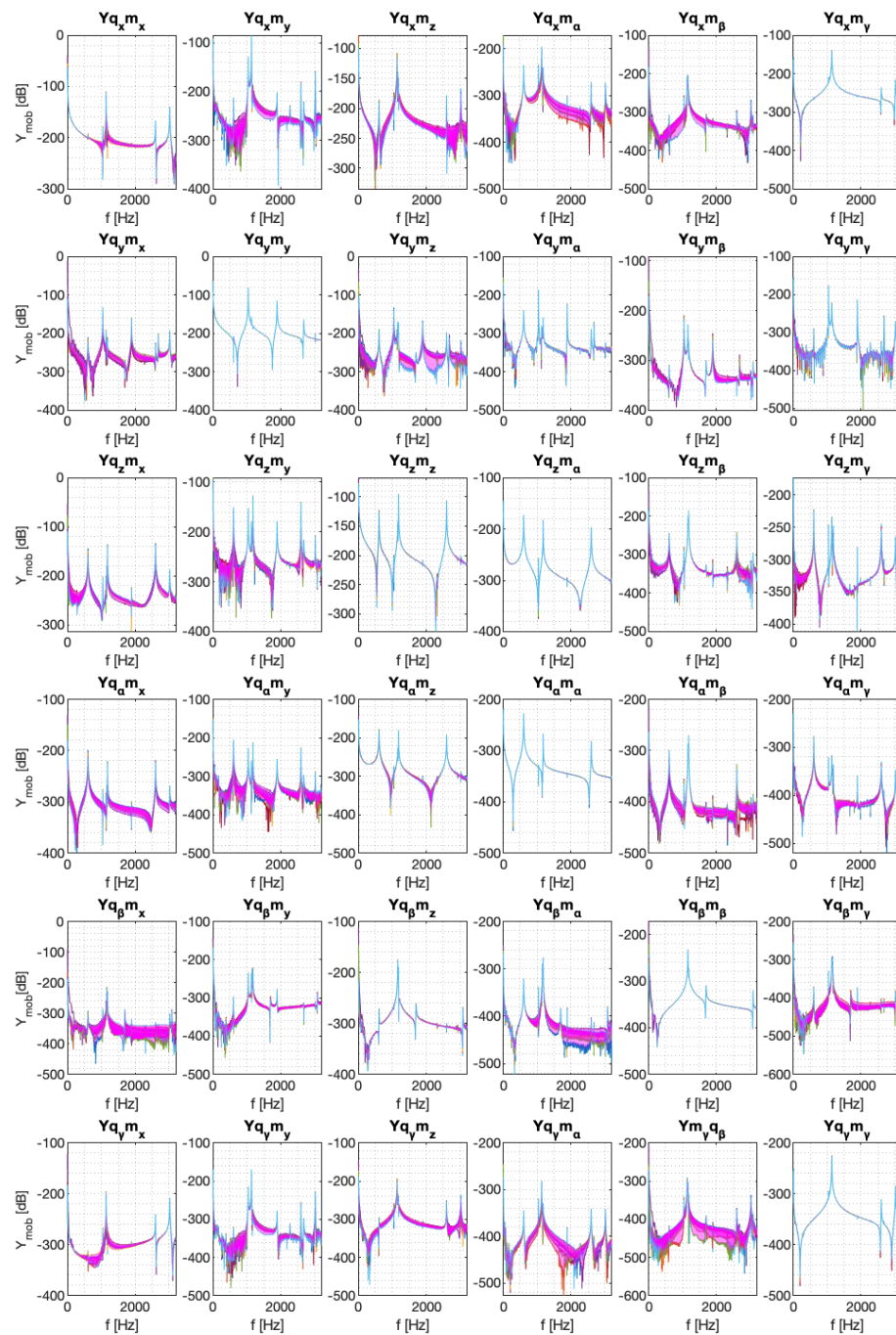


Abbildung 31: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau C mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 3)

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Reproduzierbarkeit der Eingangsadmittanzen unter Verwendung einer Hilfskonstruktion (kreuzförmig) untersucht. Dabei wurde mittels VPT Methode, die 3 translatorische und die 3 rotatorische Freiheitsgrade am VP nachgebildet und die Reproduzierbarkeit der Eingangsadmittanzen in Abhängigkeit von Anzahl und Position der Sensoren und Anregungsstellen bewertet.

Gute Reproduzierbarkeitsergebnisse werden erzielt, wenn die Sensoren außerhalb der VP-Achse positioniert sind und weiter entfernt vom VP liegen. Der Einsatz eines vierten Sensors verursacht keine wesentlichen Unterschiede bei der Reproduzierbarkeit der VPT.

Mit 8 Hammerschlägen, welche das Bauteil in jeder Richtung (X, Y, Z) anregen, wurde eine gute Reproduzierbarkeit der VPT erreicht. Die Anregungspunkte an der Seite des Kreuzes, welche in Y-Koordinaten näher am VP liegen, haben wesentlich bessere Reproduzierbarkeit geliefert.

Der Einfluss von unterschiedlichen Hammerkalotten auf die Transformation kann weiterhin überprüft werden. Außerdem sind weitere Schritte zur Validierung der Ergebnisse anhand numerischer Verfahren nötig.

Literatur

- [1] Klerk d. D., Voormeeren, S. N.: *General Framework for Dynamic Substructuring: History, Review, and Classification of Techniques*, AIAA Journal, Band 46, Nr. 5, May 2008.
- [2] Klostermann, A.: *On the Experimental Determination and Use of Modal representation of Dynamic Characteristics*. University of Cincinnati, Dissertation, 1971.
- [3] Jetmundsen, B., Bielawa, R., and Flannelly, W.: *Generalized Frequency Domain Substructure Synthesis*, Journal of the American Helicopter Society, Vol. 33, No. 1, Jan. 1988.
- [4] Klerk d. D., Rixen D. J., De Jong J.: *The Frequency Based Substructuring (FBS) Method reformulated according to the Dual Domain Decomposition Method*, in: *Proceedings of the XXIV International Modal Analysis Conference*, St. Louis, MO, Society for Experimental Mechanics, Bethel, CT, 2006.
- [5] Voormeeren, S. N.: *Coupling Procedure Improvement & Uncertainty Quantification in Experimental Dynamic Substructuring: Application and Validation in Automotive Research*. TU Delft, Masterarbeit, 2007.
- [6] SEIJS, M. v. d.: *Experimental Dynamic Substructuring: Analysis and Design Strategies for Vehicle Development*. Technische Universität Delft, Dissertation, 2016.
- [7] Feldman, J.: *Körperschallmesstechnik*, Berlin, Springer viewweg, 2018.
- [8] <https://www.kistler.com/en/product/type-9722a/>, verfügbar am 15. August 2020.
- [9] <https://www.bksv.com/en/products/daq-data-acquisition/lan-xi-data-acquisition-system/daq-modules/type-3053>, verfügbar am 15. August 2020.
- [10] <https://towardsdatascience.com/extract-features-of-music-75a3f9bc265d>, verfügbar am 10. August 2020.
- [11] Kuttner, T.: *Praxiswissen Schwingungsmesstechnik*, Wiesbaden, Springer viewweg, 2015.
- [12] Meyer, M.: *Signalverarbeitung: Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter*. Springer viewweg, 7. Auflage, 2014.
- [13] Brüel & Kjær: *Technical Review No.4*. 1987.

[14] <https://community.sw.siemens.com/s/article/window-types-hanning-flattop-uniform-tukey-and-exponential>, verfügbar am 22. August 2020.

[15] Angert, R., Kollmann, F.G., Schrösser, T.F.: *Praktische Maschinenakustik*, Berlin, Springer, 2006.

Anlagen

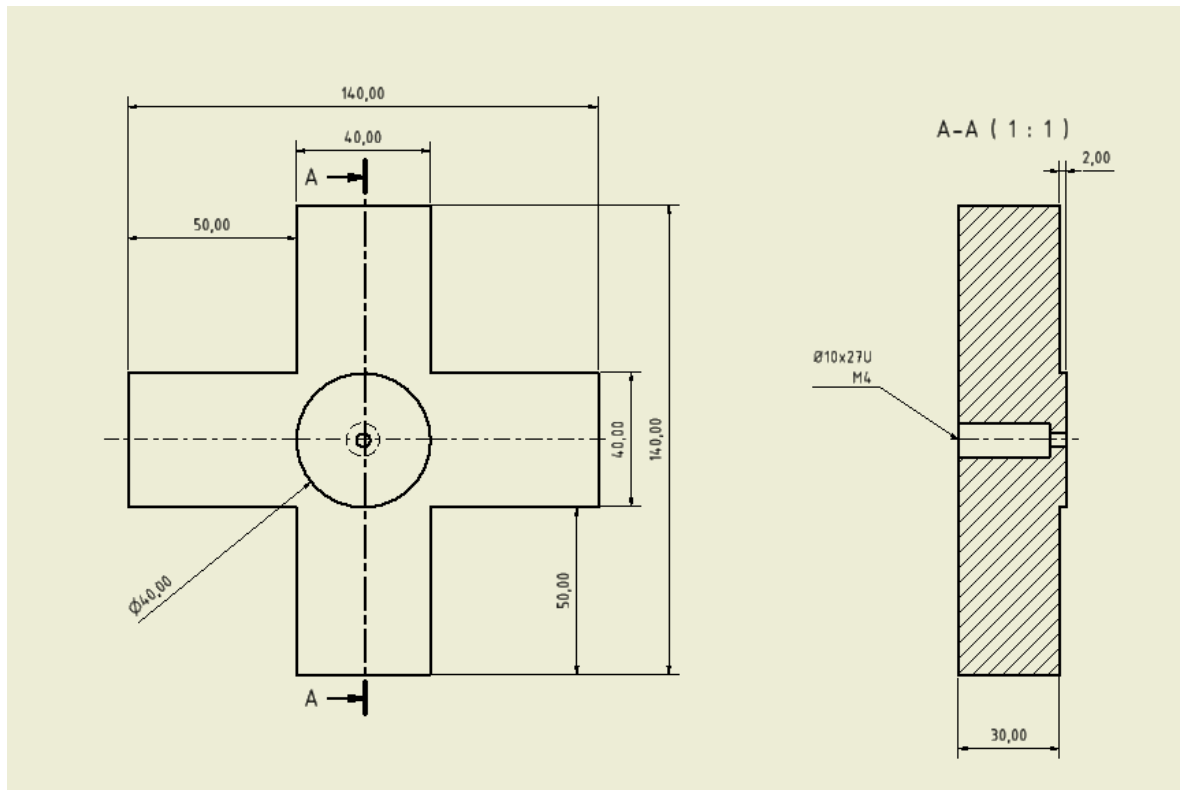


Abbildung 32: Maße des Kreuzes

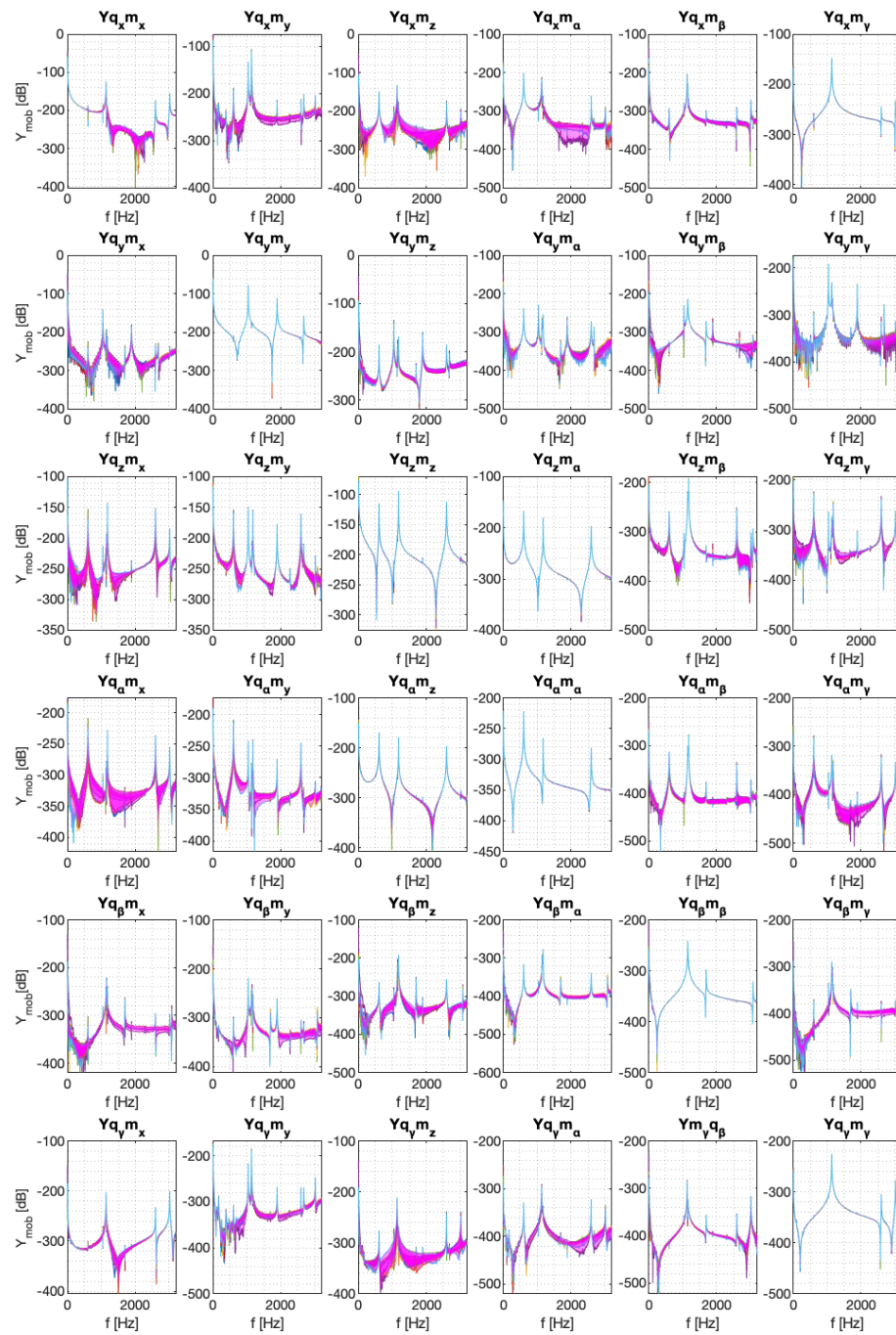


Abbildung 33: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau B mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 1)

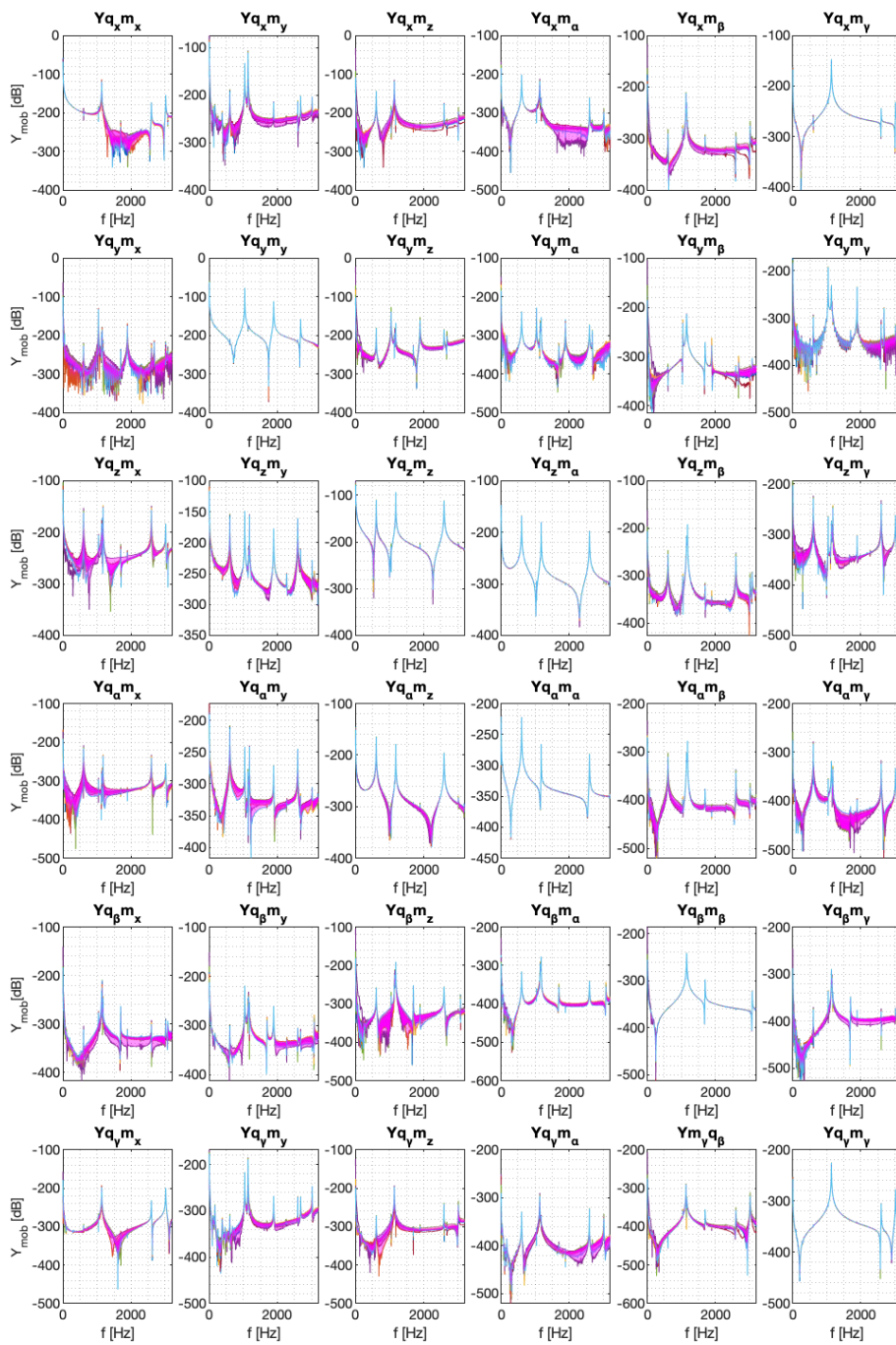


Abbildung 34: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau B mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 2)

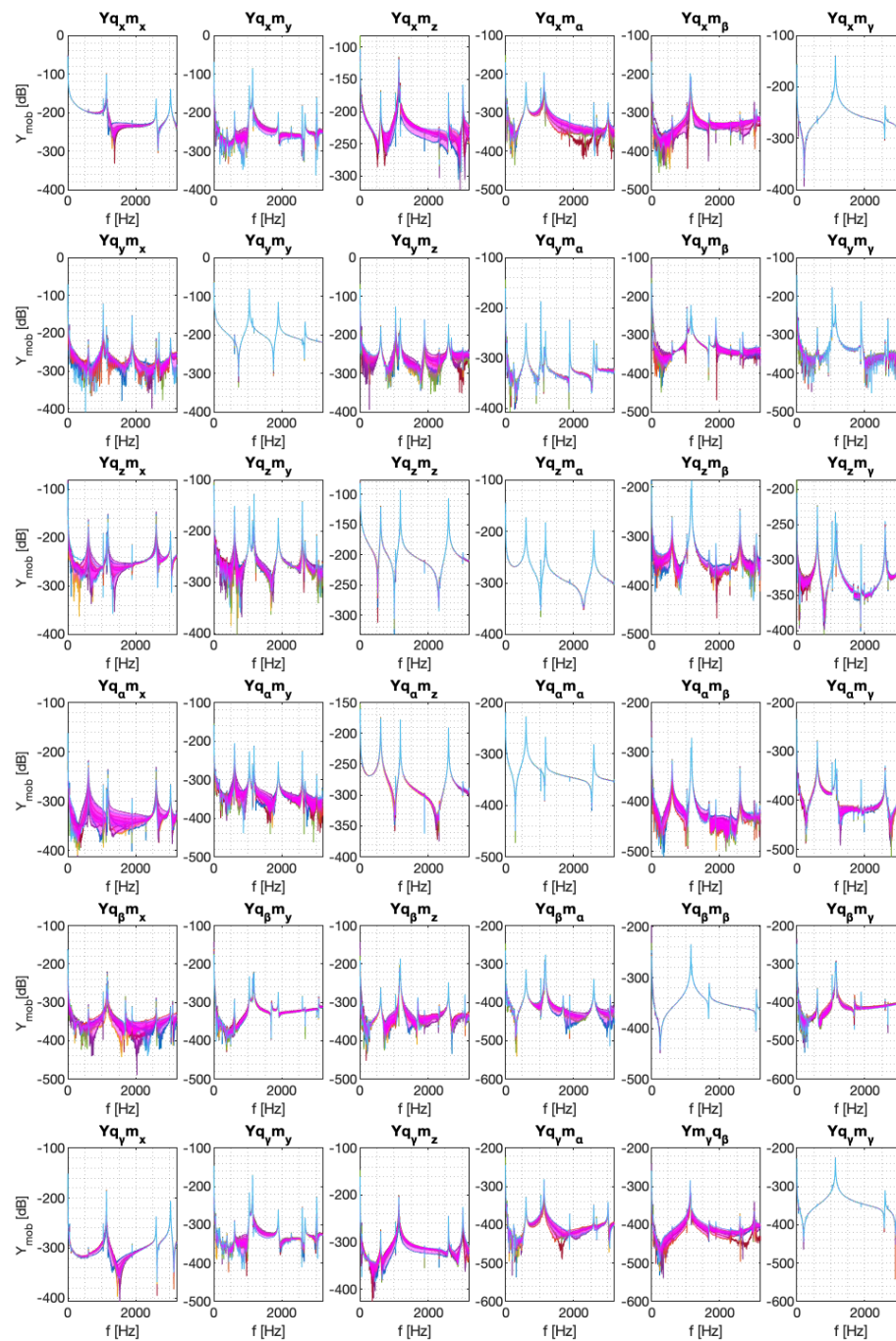


Abbildung 35: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau C mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 1)

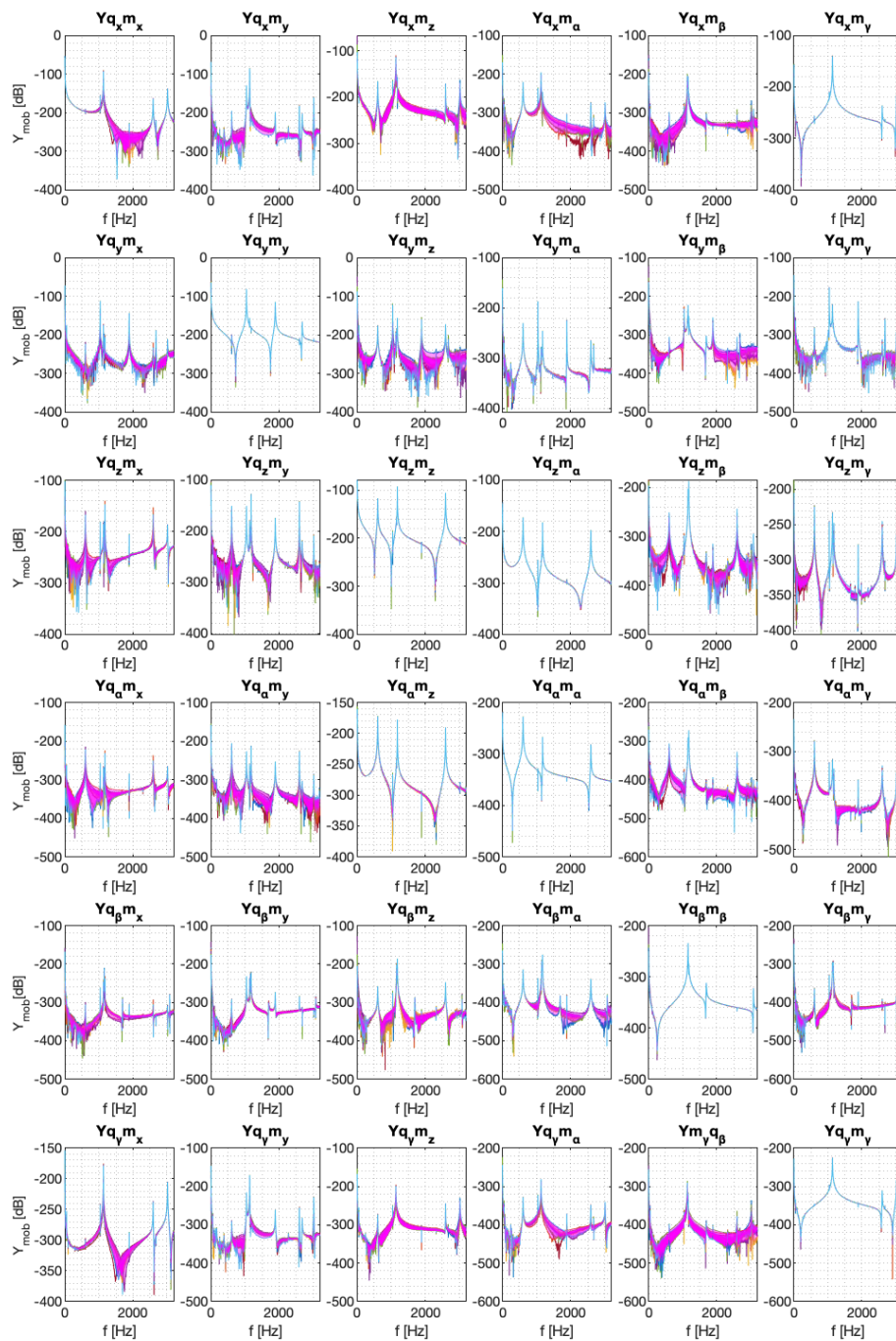


Abbildung 36: Die transformierten Eingangsadmittanzen, Aufbau C mit 8 Anregungspunkten und 3 Sensoren (Variante 2)

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Dresden, den 30.10.2020

Mona Soleimani