

Technische Universität Chemnitz
Fakultät für Maschinenbau

Masterarbeit

Thema: Vergleichende Analyse einer experimentellen SIMO- und MIMO-Modalanalyse

vorgelegt von: Manga Martin
geb. am: 20.04.1988 in: Jihlava (Tschechien)

Studiengang: Deutsch-tschechischer Masterstudiengang
Produktionssysteme

Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c.
Reimund Neugebauer
Dr.-Ing. Martin Kolouch, Ph.D. (TU Chemnitz)
doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. (VUT Brno)

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Manga

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Výrobní systémy (2301T030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Srovnávací analýza SIMO a MIMO metod experimentální modální analýzy

v anglickém jazyce:

Comparison and analysis of the SIMO and MIMO methodology in the experimental modal analysis

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při zkoumání kmitání výrobních strojů se hojně využívá modální analýza, přičemž nejvíce rozšířenou metodou je SIMO analýza (SIMO = Single Input Multiple Output). Alternativou je MIMO analýza (MIMO = Multiple Input Multiple Output), její přednost oproti SIMO analýze je v lepším buzení struktury, a tím v lepší kvalitě měřených signálů. Nevýhodou jsou vysoké nároky na měřicí zařízení.

Cíle diplomové práce:

- 1) Rešerše teoretických základů MIMO analýzy
- 2) Provedení SIMO analýzy na obráběcím stroji
- 3) Zpracování postupu měření pomocí MIMO analýzy s dostupnými měřicími prostředky
- 4) Provedení MIMO analýzy na obráběcím stroji za použití více budících signálů
- 5) Srovnání získaných výsledků MIMO analýzy s dostupnými výsledky SIMO-analýzy

Seznam odborné literatury:

Maia, et al.: Theoretical and experimental modal analysis, Study press 1997

Marek, J.; Konstrukce CNC obráběcích strojů, ISSN 1212-2572

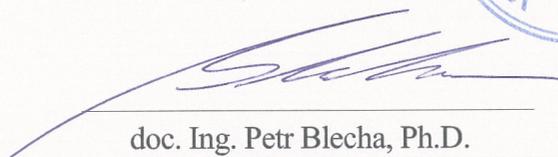
www.infozdroje.cz

www.mmspektrum.com

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 19.4.2012



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Bibliographische Beschreibung

Manga, Martin:

Srovnávací analýza SIMO a MIMO metod experimentální modální analýzy

MANGA, M. Srovnávací analýza SIMO a MIMO metod experimentální modální analýzy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 109 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D..

Klíčová slova:

SIMO analýza, MIMO analýza, paralelní kinematika, koherence, Complex Mode Indicator Function, referenční bod, amplituda síly

Vergleichende Analyse einer experimentellen SIMO- und MIMO-Modalanalyse

Schlagwörter:

SIMO-Analyse, MIMO-Analyse, Parallelkinematik, Kohärenz, Complex Mode Indicator Function, Referenzpunkt, Kraftpegel

Comparison and analysis of the SIMO and MIMO methodology in the experimental modal analysis

Keywords:

SIMO-Analysis, MIMO-Analysis, parallel kinematics, coherence, Complex Mode Indicator Function, reference point, force amplitude

Kurzreferat

Die Schwingungsanalyse bildet heutzutage einen untrennbaren Bestandteil bei der Produktgestaltung von Flugzeugkomponenten, Turbinen aber auch Werkzeugmaschinen usw. Experimentelle Modalanalyse (EMA) stellt eine von Methoden der Schwingungsanalyse dar, die die sogenannten Modalparametern ermittelt. Die Masterarbeit vergleicht praktisch zwei momentan häufig verbreitete Methoden der Modalanalyse: „Single Input Multiple Output“ (SIMO) und „Multiple Input Multiple Output“ Analyse (MIMO). Weiterhin wird das MIMO-Vorgehen vorgestellt und die Schwierigkeiten dieser Analyse werden besprochen. Beide EMA sind auf einer Parallelkinematik-Fräsmaschine unter gleichen Bedingungen durchgeführt, um einen objektiven Vergleich der beiden Verfahren zu gewährleisten. Aus den Ergebnissen ergibt sich, dass die richtige Auswahl von sogenannten Referenzpunkten zur erfolgreichen Analyse den größten Stellenwert hat. Denn im Falle einer günstigen Auswahl beider Referenzen und mit der einhergehenden besseren Anregung der Struktur zeigt die Arbeit, dass die MIMO-Analyse die besseren Modalparameter gibt.

Abstract

Today represents vibration analysis an inseparable part of the product design, especially aeronautical components, machine tools etc. One of the vibration analysis methods is the so-called modal analysis, which determines the modal parameters of the researched structure. This paper deals with a comparison of two commonly used approaches, namely „Single Input Multiple Output“ (SIMO) and „Multiple Input Multiple Output“ analysis (MIMO). A MIMO procedure of measurement is developed and discussed. Both analyses are executed by the same conditions on the milling machine based on parallel kinematics in order to objective comparison. The results show that the choice of the so-called reference points is very important. In case both references are appropriately selected, the MIMO analysis gives better results than the SIMO one.

Abstrakt

Tato práce srovnává dvě dnes běžné varianty experimentální modální analýzy, a sice SIMO a MIMO analýzu. Pro provedení MIMO analýzy bylo nutné navrhnout nový postup měření, který je v práci podrobně popsán. Jak SIMO tak MIMO analýza byly provedeny za stejných podmínek, aby je bylo možno objektivně srovnat. Výsledky ukazují, že volba takzvaných referenčních bodů je pro věrohodnost výsledků zcela zásadní. Při dodržení všech zásad měření a vhodné volbě parametrů poskytuje MIMO analýza lepší výsledky.

Inhaltverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VI
Kurzzeichenverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XI
0 Vorwort	1
1 Einleitung.....	2
1.1 Problemstellung.....	2
1.2 Ziele und Gliederung der Arbeit	2
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Grundlagen der Modalanalyse	4
2.2 SIMO-Modalanalyse	8
2.2.1 Diskretisierung der gemessenen Struktur	8
2.2.2 Signalmessung und -verarbeitung	10
2.2.3 Datenauswertung und Modaldatenermittlung.....	13
2.3 MIMO-Modalanalyse.....	17
2.3.1 Diskretisierung.....	18
2.3.2 Signalverarbeitung.....	20
2.3.3 Ermittlung der Modalparameter.....	22
2.4 Zusammenfassung	27
3 Experimentelle SIMO-Analyse	28
3.1 Untersuchte Maschine	28
3.2 Diskretisierung der Maschine.....	29
3.3 400 Hz SIMO-Analyse.....	32
3.3.1 Parameter der 400 Hz Analyse	32
3.3.2 Erhaltene Daten.....	34
3.3.3 Auswertung der Daten	38

3.3.4	Überprüfung von Voraussetzungen	41
3.3.5	Zusammenfassung der 400 Hz Analyse.....	44
3.4	Optimierung - 200 Hz Analyse	46
3.4.1	Parameter der 200 Hz Analyse	46
3.4.2	Gemessene Daten.....	47
3.4.3	Bestimmung der Modalparameter.....	49
3.4.4	Modenformen	53
3.5	Zusammenfassung der SIMO-Analyse	55
4	Vorgehen bei einer MIMO-Analyse.....	57
4.1	Technik.....	57
4.2	Unabhängigkeit der Eingänge.....	59
4.3	Einstellung des Kraftpegels	62
4.4	Kurvenanpassung in ME'scopeVES	64
5	Experimentelle MIMO-Analyse	67
5.1	MIMO-Analyse mit der Referenz auf dem Gestell	67
5.1.1	Parameter der MIMO-Analyse	67
5.1.2	MIMO-Diskretisierung	68
5.1.3	Erhaltene Daten.....	69
5.1.4	Auswertung	73
5.1.5	Zusammenfassung	79
5.2	MIMO-Analyse mit der Referenz auf dem Tisch.....	80
5.2.1	Wahl des zweiten Referenzpunktes.....	81
5.2.2	Gemessene Daten.....	82
5.2.3	Parameterermittlung	85
5.2.4	Modenformen	88
5.2.5	Vergleich der MIMO-Analysen	90
5.3	Quantitativer Vergleich der Analysen.....	90
5.4	Zusammenfassung der MIMO-Analyse.....	93

6	Zusammenfassung und Ausblick	96
7	Literaturverzeichnis.....	98
8	Anlagenverzeichnis.....	101
9	Anlagen.....	102
10	Thesen	108
11	Selbstständigkeitserklärung.....	109

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
AF-Polynomial	Alias Free Polynomial
CMIF	Complex Mode Indicator Function
CSAC	Cross Signature Assurance Criterion
CSC	Cross Signature Correlation
CSF	Cross Signature Factor
EMA	Experimental Modal Analysis
FEM	Finite Element Model
FFT	Fast Fourier Transformation
FRF	Frequency Response Function
GRFP	Global Rational Fraction Polynomial
IRF	Impulse Response Function
ITD	Ibrahim Time Domain
LSCE	Least Squares Complex Exponential
MIF	Modal Indicator Function
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMIF	Multivariate Mode Indicator Function
PRCE	Polyreference Complex Exponential
PRFD	Polyreference Frequency Domain
R	Referenzpunkt
SD	Stabilitätsdiagramm
SDOF	Single Degree of Freedom
SIMO	Single Input Multiple Output
SVD	Singular Value Decomposition
TCP	Tool Centre Point

Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Einheit	Benennung
a	-	Zählerkoeffizienten der FRF
b	-	Koeffizient des charakterischen Polynoms
p	-	Pol
q	-	Skalierungsfaktor
u	m	Auslenkung
w	Hz	Frequenz bzw. Eigenfrequenz
e _i	-	Fehler auf i-ter Frequenz
A	-	Matrix von Zählerkoeffizienten der FRF
B	-	Matrix von Koeffizienten der charakteristischen Polynomen
H	-	Übertragungsfunktion
F	N	Kraftamplitude
J	-	Quadratkriterium
N	-	Anzahl von Messpunkten
N _f	-	Anzahl von Spektrallinien
Q	-	komplexe Matrix der Eigenvektoren
U	-	linker Singulärvektor
V	-	rechter Singulärvektor
X	-	Antwortamplitude
A_k	-	Residuenmatrix
G_{FF'}	-	Diagonale Matrix von „Principal Power Spectra“
G _{FF}	-	Kraft-Autospektrum
G_{FF}	-	Matrix der Eigangspektren
G _{FX} , G _{XF}	-	Kreuzspektrum
G _{XX}	-	Antwort-Autospektrum
H ₁	-	H ₁ -Kalkulator
H ₂	-	H ₂ -Kalkulator
H _v	-	H _v -Kalkulator
X _i	-	Imaginärteil der Antwortamplitude
X _r	-	Realteil der Antwortamplitude
δ	m/N	Nachgiebigkeit
θ	-	orthogonales Polynom
λ	-	Eigenvektor
σ	Ns/m	Dämpfung bzw. Eigendämpfung
Σ	-	Matrix von singulären Werten der normalen Matrix
φ	-	orthogonales Polynom
α _A	-	gemessene Übertragungsfunktion
α _X	-	berechnete bzw. synthetisierte Übertragungsfunktion
γ ²	-	Kohärenz
γ ² _{XF}	-	Multiple Kohärenz

Indizes	Benennung
k	Nummer des Modes
m	Anzahl der Moden
i	Nummer des Ausganges
j	Nummer des Einganges
P	Anzahl der Eingänge
L	Anzahl der Ausgänge

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Messung der Übertragungsfunktion [3].....	5
Abbildung 2.2: Verhältnisse zwischen dem Zeit- und Frequenzbereich [3].....	6
Abbildung 2.3: Messpunkte eines Trägers [3]	8
Abbildung 2.4: Eine Darstellung der FRF und der Kohärenzfunktion.....	12
Abbildung 2.5: Modal Indicator Function einer Struktur [3]	14
Abbildung 2.6: Gliederung der Kurvenermittlungsmethoden [6]	14
Abbildung 2.7: “Repeated Roots” auf der achsensymmetrischen Struktur [19].....	18
Abbildung 2.8: Erste sechs Moden einer Struktur [3].....	19
Abbildung 2.9: Erregungsstellen und entsprechende FRF der Struktur [3]	19
Abbildung 2.10: MMIF [24].....	23
Abbildung 2.11: CMIF	24
Abbildung 2.12: Stabilitätsdiagramm [3]	26
Abbildung 3.1: SIMO-Versuchstand METROM P800	28
Abbildung 3.2: Diskretisierung des Arbeitsraumes	30
Abbildung 3.3: SDOF außerhalb des Arbeitsraumes.....	31
Abbildung 3.4: Burst Random Erregung [3].....	33
Abbildung 3.5: Nachgiebigkeit und Kohärenz im Referenzpunkt; SIMO 400 Hz	35
Abbildung 3.6: Diskretisierte Struktur und Beispiele der SDOF	36
Abbildung 3.7: Nachgiebigkeit und Kohärenz im p26 auf der Strebe 1; SIMO 400 Hz	37
Abbildung 3.8: Mode Indicator Function in 400 Hz Analyse.....	38
Abbildung 3.9: Kurvenanpassung im p26 auf der Strebe 1; SIMO 400 Hz.....	39
Abbildung 3.10: Kurvenanpassung im p26 auf der Strebe 1; SIMO 400 Hz.....	40
Abbildung 3.11: Linearitätstest.....	42
Abbildung 3.12: Einfluss der Erregungsrichtung auf die Kohärenz	43
Abbildung 3.13: Test der Reziprozität	44
Abbildung 3.14: Nachgiebigkeit und Kohärenz im Referenzpunkt; SIMO 200 Hz	47
Abbildung 3.15: Nachgiebigkeit und Kohärenz im p26 auf der Strebe 1; SIMO 200 Hz ..	48
Abbildung 3.16: MIF in 200 Hz Analyse.....	50
Abbildung 3.17: Kurvenanpassung im Referenzpunkt; SIMO 200 Hz	51
Abbildung 3.18: Kurvenanpassung im p26 auf der Strebe 1; SIMO 200 Hz.....	52
Abbildung 3.19: 98 Hz Modenformen der a) 400 Hz Analyse b) 200 Hz Analyse	54
Abbildung 3.20: 200 Hz Modenformen der a) 400 Hz Analyse b) 200 Hz Analyse	54
Abbildung 4.1: FFT-Analysator mit dem hervorgehobenen Signalgenerator	57
Abbildung 4.2: Anordnung zur Messung einer MIMO-Analyse	58

Abbildung 4.3: Umschaltung zwischen den durchlaufend gemessenen Daten	59
Abbildung 4.4: Kohärenz zwischen Erregungssignalen	60
Abbildung 4.5: LabVIEW Programm „Burst Random“	60
Abbildung 4.6: Signaltrigger zur Zweck der MIMO-Analyse	61
Abbildung 4.7: Kohärenzverläufe und Nachgiebigkeit bei maximalen Kraftamplituden...	62
Abbildung 4.8: Kohärenzverläufe und Nachgiebigkeit bei ausgeglichenen Kraftpegeln..	63
Abbildung 4.9: Einstellung von ME'scopeVES 4.0	65
Abbildung 4.10: Informationen über die Modenstärken	66
Abbildung 4.11: Synthetisieren der Parameterabschätzungen	66
Abbildung 5.1: Diskretisierte Struktur in der MIMO-Analyse	68
Abbildung 5.2: Nachgiebigkeit und Kohärenz im ersten Referenzpunkt	69
Abbildung 5.3: Nachgiebigkeit und Kohärenz im zweiten Referenzpunkt	70
Abbildung 5.4: Nachgiebigkeit und Kohärenz im p26 auf der Strebe 1	72
Abbildung 5.5: Complex Mode Indicator Function der ersten MIMO-Analyse	74
Abbildung 5.6: Kurvenanpassung in beiden Referenzpunkten	76
Abbildung 5.7: Kurvenanpassung im p26 auf der Strebe 1 (Referenz 1)	77
Abbildung 5.8: Kurvenanpassung im p26 auf der Strebe 1 (Referenz 2)	78
Abbildung 5.9: Anordnung der zweiten MIMO-Analyse	80
Abbildung 5.10: Verbindungsklotz	81
Abbildung 5.11: Nachgiebigkeit und Kohärenz im ersten Referenzpunkt (zweite MIMO)	82
Abbildung 5.12: Nachgiebigkeit und Kohärenz im zweiten Referenzpunkt (zweite MIMO)	83
Abbildung 5.13: Nachgiebigkeit und Kohärenz im p26 auf der Strebe 1 (zweite MIMO) .	84
Abbildung 5.14: Complex Mode Indicator Function der zweiten MIMO-Analyse	85
Abbildung 5.15: Kurvenanpassung beiden Referenzpunkten (zweite MIMO)	86
Abbildung 5.16: Kurvenanpassung im p26 auf der Strebe 1 (Referenz 2, zweite MIMO)	87
Abbildung 5.17: 98 Hz Modenformen der a) ersten MIMO b) zweiten MIMO	88
Abbildung 5.18: 200 Hz Modenformen der a) ersten MIMO b) zweiten MIMO	89
Abbildung 5.19: CSC-Kriterien der durchgeführten Analysen	91
Abbildung 5.20: Vergleich der CSF-Kriterien	92
Abbildung 5.21: CSF-Kriterium einzelner Referenzen	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Unterschiede im Vorgehen zwischen SIMO- und MIMO-Analyse	27
Tabelle 3.1: Bestehende Messtechnik für SIMO-Analyse	32
Tabelle 3.2: Auswahl der besten Moden in der SIMO 200 Hz Analyse	50
Tabelle 4.1: Bestehende Messtechnik für MIMO-Analyse	57
Tabelle 4.2: Methoden der Kurvenanpassung in ME'scopeVES 4.0 und 5.0 [23]	64
Tabelle 5.1: Auswahl der besten Moden in der ersten MIMO Analyse.....	75
Tabelle 5.2: Auswahl der besten Moden in der zweiten MIMO-Analyse	86

0 Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Martin Kolouch, Ph.D. für die Möglichkeit diese Arbeit bei ihm schreiben zu dürfen und für seine professionelle Betreuung sowie gut gemeinte Ratschläge sehr bedanken.

Weiter möchte ich mich auch bei den Technikern Georg Matschewsky, Dipl.-Ing. Henrik Haftmann und René Fritzsche für die große Hilfe bei der Vorbereitung der Technik sehr bedanken.

Großer Dank gehört Herrn Dr.-Ing. Hirsch und Herrn doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. für ihre Unterstützung und Beratung. Und besonders für die organisatorische Hilfe, die meinen Aufenthalt in Chemnitz realisierte.

Ganz herzlicher Dank gehört besonders meinen Eltern, die mich während meines Studiums ständig materiell und geistig unterstützten. Besonders meiner großartigen Freundin, die mir immer beistand und Rückhalt gab.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Schwingungen entstehen durch bestimmte Vorgänge, bei denen dynamische Kräfte Strukturen anregen. Ein gewisser Schwingungspegel tritt bei jedem dynamischen Vorgang als ein untrennbarer Nebeneffekt auf. Aufgrund der Schwingungen können bei Maschinen Abnutzung, mangelhafte Funktion, Betriebsstörungen oder irreversible Schäden jeden Grades auftreten. Die meisten Schwingungsprobleme sind mit Resonanzfrequenzen verbunden. Resonanz tritt auf, wenn die dynamischen Kräfte eines Vorgangs die Eigenfrequenzen oder sogenannten „Schwingungsmoden“ der betroffenen Struktur anregen. Diese Schwingungsmoden stellen eine Basis zur vollständigen Beschreibung des dynamischen Verhaltens [1].

Zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens dient die sogenannte Modalanalyse, welche die inneren Verhältnisse eines linearen Systems bestimmt, egal ob das System erregt oder in der Ruhe ist. Das Prinzip der Modalanalyse liegt in einer Anregung der Struktur mit festgelegten Kräften und nachfolgend wird das Antwort/Kraft-Verhältnis untersucht [1].

Momentan sind weltweit zwei Einstellungen der Modalanalyse verbreitet, und zwar eine „Single Input Multiple Output“ (SIMO) und „Multiple Input Multiple Output“ (MIMO) Variante. Die SIMO-Analyse findet an der TU-Chemnitz zahlreiche Anwendung, um die Modalparametern der Strukturen zu bestimmen. Zu den großen Nachteilen dieser Analyse gehört eine ungenügende Anregung aller Koordinaten der großen Strukturen [2] wie z. B. Werkzeugmaschinen usw. Demgegenüber ist die MIMO-Analyse fähig, mehrere Systemkoordinaten anzuregen und somit präzisere Modaldaten zu gewinnen. Diese Analyse wurde an der TU-Chemnitz allerdings noch nicht vollständig geprüft.

1.2 Ziele und Gliederung der Arbeit

Ziel der Masterarbeit ist eine vergleichende Analyse der beiden genannten Einstellungen. Dies beruht erst auf einer Recherche der theoretischen Grundlagen beider Analysen. Vor allem sind die praktischen Unterschiede im Vorgehen zu berücksichtigen. Weiter ist eine SIMO-Analyse als eine Bezugsanalyse durchzuführen, um sie nachfolgend mit der MIMO-

Analyse zu vergleichen. Zu einem Hauptziel gehört hauptsächlich eine Erarbeitung des MIMO-Vorgehens mit der bestehenden Messtechnik. Die letzte Aufgabe liegt in der eigenen MIMO-Messung und einer folgenden Interpretation der erhaltenen und ausgewerteten Daten.

Der Erfolgsmaßstab der Masterarbeit kann man in folgenden Punkten abgrenzen:

- Messung und Auswertung einer SIMO-Analyse
- Erarbeitung eines Vorgehens zur MIMO-Messung mit bestehender Technik
- Messung und Auswertung einer MIMO-Analyse
- Interpretation und Vergleich der erhaltenen Ergebnisse

2 Stand der Technik

Im diesen Kapitel werden anfangs der Zweck und die Grundlagen der experimentellen Modalanalyse (EMA) angeführt. Weiter werden die charakteristischen Merkmale von SIMO- sowie MIMO-Modalanalyse ausführlicher beschrieben. Schließlich werden Unterschiede in der Vorgehensweise dieser Methoden besprochen.

2.1 Grundlagen der Modalanalyse

Die Modalanalyse ist eine Vorgehensweise, bei der eine beliebige Struktur in Form von natürlichen dynamischen Eigenschaften beschrieben wird. Zu diesen Eigenschaften zählt man die Modalfrequenz, die Modaldämpfung und die Modenform, die auch als Eigenfrequenz, Eigendämpfung und Eigenform genannt werden kann. Ein Schwingungsmode der Struktur ist durch diese drei Parameter beschrieben. Alle diese Daten werden als Modaldaten bezeichnet. [3]

Die durch experimentelle Modalanalyse festgestellten Modaldaten finden die Geltung vor allem bei der Lösung von folgenden Aufgaben [1]:

- Ermittlung von Modalfrequenzen (Resonanzfrequenzen), die im Betrieb zerstörende Auswirkungen verursachen können
- Darstellung der Modenformen als ein Hilfsmittel zum Verständnis des dynamischen Strukturverhaltens
- Verifizieren und Verfeinern eines numerischen „Finite Element Model“ (FEM)
- Antwort auf bekannte Erregungen vorherzusagen
- Vorhersage von Gesamtverhalten aufgrund verschiedener Strukturmodifikationen (wie z. B. Versteifung)

Um die Modaldaten zu bestimmen, muss man zuerst eine sogenannte Übertragungsfunktion (oder auch „Frequency Response Function“ genannt) messen. Die FRF repräsentiert das Verhältnis zwischen einem Ausgang (Antwort) und einem Eingang (Erregung) im Frequenzbereich [1]. Der Vorgang einer Messung der FRF ist in der Abbildung 2.1 dargestellt. Die Übertragungsfunktion kann man als eine Darstellung der Newtonsche

Bewegungsgleichung im Frequenzbereich betrachten [3]. Diese Funktion besteht aus den realen und komplexen Teilen und ist auf verschiedenen Weisen darstellbar. Für den Zweck dieser Arbeit wird immer das Magnitude-Diagramm (siehe [3]) verwendet.

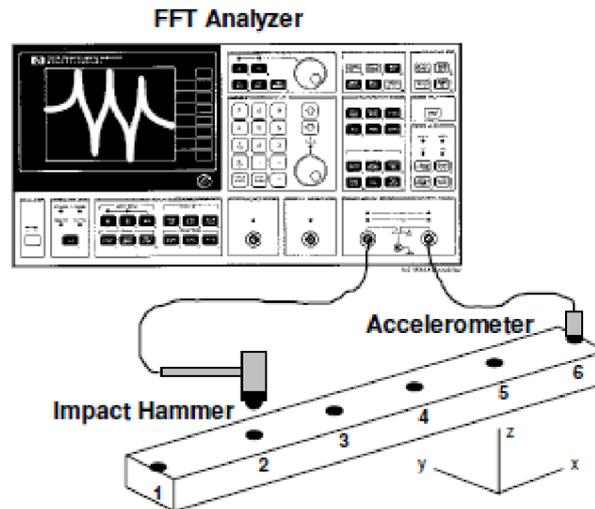


Abbildung 2.1: Messung der Übertragungsfunktion [3]

Wenn man die Übertragungsfunktion als $H(j\omega)$, die Kraftamplitude als $F(j\omega)$ und die Antwortamplitude als $X(j\omega)$ anführt, lautet die Definition [1]:

$$H(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{F(j\omega)} \quad (2-1)$$

In der Praxis erregt man die Struktur z. B. durch einen Impulshammer oder durch einen elektromechanischen Schwingererregter [4]. Der Wert der Erregung wird durch den Kraftsensor auf der Erregungsstelle gemessen. Die Antwort misst man durch die Beschleunigungssensoren an verschiedenen Antwortstellen. Für jede Kombination von Eingang und Ausgang gibt es eine FRF [3].

Die Verarbeitung der Eingangs- und Ausgangssignale, die im Zeitbereich gemessen werden und in der Form einer FRF im Frequenzbereich dargestellt sind, erfolgt in mehreren Stufen in einem FFT-Analysator. Die Verhältnisse zwischen dem Kraft- sowie dem Antwortspektrum im Zeitbereich und der FRF im Frequenzbereich sind schematisch in der Abbildung 2.2 gezeigt.

Fast Fourier Transformation (FFT):

FFT ist ein Algorithmus zur effizienten Transformation von diskreten aperiodischen Zeitsignalen in eine Form von harmonischen Signalen im Frequenzbereich [5]. Die Voraussetzungen der Periodizität und der Vollständigkeit des Zeitsignales sind zu beachten, um die FFT fehlerlos durchzuführen. Die Schwierigkeiten der FFT werden ausführlich in [4], [6] und [7] angegangen.

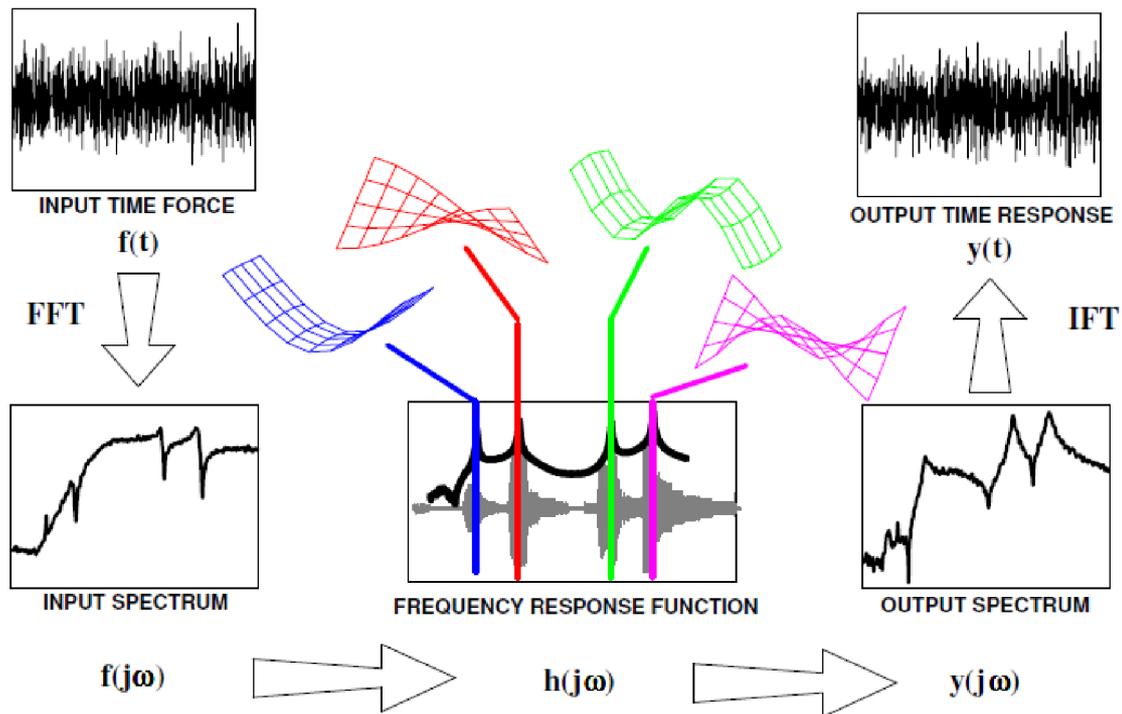


Abbildung 2.2: Verhältnisse zwischen dem Zeit- und Frequenzbereich [3]

Nach der Festlegung der FRF erfolgt die Modalparameterbestimmung. In diesem Schritt werden die Modaldaten aus der FRF durch die Kurvenermittlung bestimmt. In diesem Prozess werden die Parameter einer analytischen Lösung der FRF so ermittelt, um die beste Übereinstimmung mit den experimentellen FRF-Daten zu erreichen. Dies erfolgt meistens mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Eine der am häufigsten angewendeten analytischen FRF-Beschreibung ist in der Gleichung 2-2 in einer sogenannten „Partial Fraction Form“ angeführt [3, 8].

$$[H(j\omega)] = \sum_{k=1}^m \frac{[A_k]}{(j\omega - p_k)} + \frac{[A_k^*]}{(j\omega - p_k^*)} \quad (2-2)$$

Die $[H(j\omega)]$ bezeichnet die Matrix von FRF. $[A_k]$ ist die Residuenmatrix des k-ten Modes. p_k stellt einen Pol des k-ten Modes dar. Den Pol kann ausführlich als $p_k = -\sigma_k + j\omega_k$ geschrieben werden, wobei σ_k der Eigendämpfung und ω_k der Eigenfrequenz entspricht.

Der Pol beinhaltet die Informationen über die Modalfrequenz und die Modaldämpfung. Ein Satz der Residuen beschreibt die Modenformen. Die Pole sind theoretisch für alle FRF gleich, deshalb nennt man sie globale Variable. Das Residuum ist andererseits ein einzigartiger Wert für jede FRF, deswegen bezeichnet man es als lokale Variable [3].

Vor einer Durchführung der experimentellen Modalanalyse ist es nötig, den Zweck des Experimentes und die folgende Anwendung der gewonnenen Daten festzulegen, denn von diesen Aspekten werden die Anforderungen an Zeit und Kosten abgeleitet. Im Grunde genommen sind die Anforderungen an die Messung zur Verfeinerung von FE-Modellen höher als zur Bestimmung der Eigenfrequenzen [3].

Damit die experimentelle Modalanalyse korrekt durchgeführt wird, sind einige Grundvoraussetzungen bzw. Simplifizierungen in der Vorgehensweise zu beachten [9, 10, 11]:

- Struktur weist ein lineares Verhalten auf (Antwort ist linear abhängig von Erregungskraft)
- Struktureigenschaften und Umgebungseinflüsse sind zeitinvariant, stabil, sowie kausal.
- Struktur weist ein reziprokes Verhalten auf (Austauschbarkeit des Eingangs mit dem Ausgang ohne eine Veränderung der FRF)
- Grenzbedingungen, die für FEM benötigt sind, können in der Praxis schwer simuliert werden

Weitere Aspekte wie z. B. Masseneffekt von Beschleunigungssensoren, Rauschen usw., die aber von der eigenen Durchführung des Experimentes bzw. der Messtechnik abhängig sind, sind in [3] und [6] ausführlich besprochen.

2.2 SIMO-Modalanalyse

Bei der SIMO-Modalanalyse wird die Struktur mittels z. B. eines elektromagnetischen Schwingerregers auf einer festen Stelle erregt, während die Antwort gleichmäßig auf mehreren entweder festen oder beweglichen Stellen gemessen wird [3]. In diesem Abschnitt wird auf die Schwerpunkte der Vorgehensweise der SIMO-Analyse eingegangen und diese werden näher beschrieben.

2.2.1 Diskretisierung der gemessenen Struktur

Eine Diskretisierung der untersuchten Struktur beruht auf Zerlegung des Objektes in mehrere „Single Degree of Freedom“ (SDOF), die weiter mit der Lage und Richtung beschrieben sind. Die Anzahl der SDOF wird sowohl von der Komplexität der Struktur als auch den Anforderungen auf Genauigkeit der erwünschten Modenformen beeinflusst [3]. Auf den SDOF werden die Beschleunigungssensoren befestigt, um die Antwortsignale zu messen. In der Abbildung 2.3 ist ein Beispiel der Diskretisierung eines Trägers dargestellt. Die entsprechende FRF-Matrix ist in folgender Gleichung 2-3 angeführt [12]. Für die Bestimmung von Modalparametern reicht entweder eine Spalte oder eine Zeile dieser Matrix.

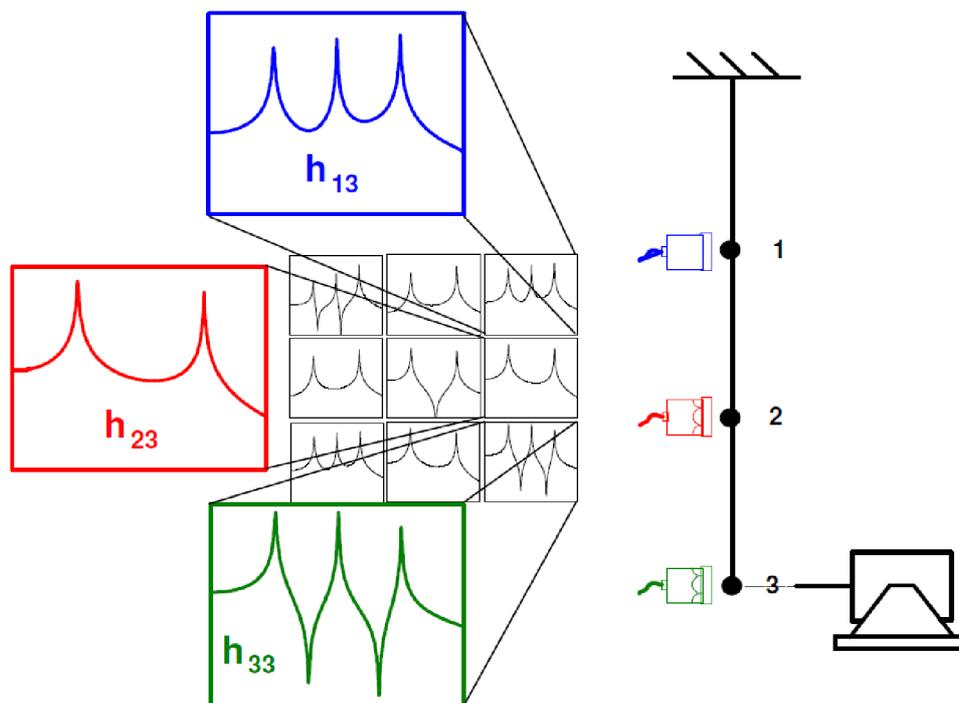


Abbildung 2.3: Messpunkte eines Trägers [3]

$$H(j\omega) = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & h_{1,3} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & h_{2,3} \\ h_{3,1} & h_{3,2} & h_{3,3} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

In der Abbildung ist ein Schwingerreger auf dem Messpunkt 3 positioniert. Da dieser Punkt für alle FRF (bzw. Messungen) gleich ist, nennt man ihn Referenzpunkt („Reference Point“). Im Falle einer Impulshammererregung wird die feste Position des Beschleunigungssensors als Referenzpunkt bezeichnet [3].

Eine Indexbezeichnung von Gliedern der FRF-Matrix $[H(j\omega)]$ erfolgt in der Weise [3]:

$$h(j\omega)_{Outputstelle,Inputstelle} = h(j\omega)_{i,j} = \frac{x(j\omega)_i}{f(j\omega)_j} \quad (2-4)$$

Falls die FRF das Verhältnis zwischen dem Input und dem Output auf einer gleichen SDOF darstellt, spricht man über eine sogenannten „Driving Point Measurement“. Eine weitere Eigenschaft der FRF-Matrix ist Reziprozität. Dank dieser Eigenschaft ist man in der Lage die Modaldaten von entweder einer Zeile (die man durch Impulserregung erhält) oder einer durch Schwingerreger erhaltenen Spalte zu gewinnen [3]. Es gilt:

$$h_{i,j} = h_{j,i} \quad (2-5)$$

Bei der Wahl der SDOF und damit der Diskretisierung der Struktur sind einige Prinzipien zu beachten. Diese helfen, genaue und einfach interpretierbare Daten zu messen [3]:

- Die Messpunkte sollten nicht in der Nähe eines Knotenpunktes („Node Point“) liegen, damit die Schwingauslenkung messbar ist. Falls FEM-Daten vorhanden sind, kann man damit die günstigsten Messpunkte vorhersagen. Sonst muss man im Vorfeld eine Grobmessung durchführen.

Knotenpunkt:

Knotenpunkt ist ein Punkt, dessen Schwingauslenkung für bestimmte Frequenz gleich Null ist [3].

- Der Referenzpunkt muss so festgelegt werden, dass die Schwingauslenkung möglichst groß ist. Aus der modifizierten Gleichung 2-6 für eine Spalte der Residuenmatrix ist klar sichtbar, dass der für alle Residuen gleiche Referenzpunkt die Größe aller anderen Residuen beeinflusst [3].

$$\{a_{i,1,k}\} = q_k \cdot u_{1,k} \cdot \{u_{i,k}\} \quad (2-6)$$

$\{a_{i,1,k}\}$ ist ein Vektor von Residuen k-tes Modes bezogen auf den Referenzpunkt Nummer 1. Weiter ist q_k als Skalierungsfaktor und $u_{1,k}$ als Auslenkung im Referenzpunkt k-tes Modes definiert. Diese Auslenkung ist für alle andere Glieder der Spalte gleich. Schließlich stellt der Vektor $\{u_{i,k}\}$ einen Satz von Schwingauslenkungen in den Antwortstellen dar.

- Bei der Unterbringung der Beschleunigungssensoren muss man einen sogenannten „Mass Loading Effekt“ beachten. Dieser negative Effekt wird durch das hohe Gewicht des Sensors im Verhältnis zum Gewicht der Struktur verursacht. Ein Gewichtverhältnis des Sensors zum partikulären Teil der gesamten Struktur sollte nicht höher als 1/10 sein [13], da es sonst zu einem deutlichen Verzerrern der gemessenen Daten kommt.
- Die Struktur sollte möglichst linear und gleichförmig erregt werden. Die Erregungswirkung sollte nur in der Messrichtung des Kraftsensors auftreten. Falls diese Bedingung nicht erfüllt wird, wird die Struktur durch nicht aufgezeichnete Kräfte erregt, was einen negativen Einfluss auf die FRF hat.

Das Hauptziel der Diskretisierung und folgender Signalmessung ist, möglichst konsistente sowie genaue Daten zu erhalten. Die Anzahl von Punkten soll zu einer befriedigenden Modenformenbeschreibung genügen.

2.2.2 Signalmessung und -verarbeitung

Wie schon im Punkt 2.2 geschrieben wird, beruht die SIMO-Modalanalyse auf der Erstellung von FRF zwischen einem Erregungspunkt und mehreren Antwortstellen. Die Verarbeitung von Zeitsignalen aus den Sensoren erfolgt in einem FFT-Analysator. Vor der Umrechnung des Zeitsignales in den Frequenzbereich durch FFT ist das Zeitsignal zu bearbeiten. Eine ausführliche Beschreibung der Verarbeitung des Zeitsignales befindet sich in mehreren Quellen z. B. [4] und [6].

Nach der FTT werden Autospektren und Kreuzspektren berechnet. Diese werden anschließend zur Berechnung der Kohärenzfunktion und des entsprechenden FRF-Kalkulators genutzt.

Autospektrum:

Ein Autospektrum ist das Produkt eines Spektrums (entweder Antwortspektrum $X(\omega)$ oder Kraftspektrum $F(\omega)$) mit seinem konjugiert-komplexen Spektrum $X^*(\omega)$, bzw. $F^*(\omega)$ [1].

$$G_{XX}(\omega) = X^*(\omega) \cdot X(\omega) \quad (2-7)$$

Kreuzspektrum:

Dieses Spektrum erhält man durch Multiplikation eines konjugiert-komplexen Spektrums mit einem anderen Spektrum. Das Kreuzspektrum ist komplex, seine Phase repräsentiert die Phasenverschiebung zwischen Ausgang und Eingang und sein Betrag das kohärente Leistungsprodukt von ihnen. Ein Beispiel von Kreuzspektrum ist [1]:

$$G_{FX}(\omega) = F^*(\omega) \cdot X(\omega) \quad (2-8)$$

Kohärenzfunktion:

Diese Funktion charakterisiert die Linearität zwischen Eingangs- und Ausgangssignal. Bei der SIMO-Analyse handelt es sich um die Beschreibung der Linearität zwischen jedem partikulären Ausgang und einem für alle Messungen gleichen Eingang, d. h. für jede FRF gibt es eine Kohärenzfunktion. Die Grenzwerte der Kohärenzfunktion sind 1 bei einer deutlichen Linearabhängigkeit und 0, falls der Eingang und der Ausgang unabhängig sind. Die Kohärenz („Ordinary Coherence“) ist durch Gleichung 2-9 definiert und auf der Abbildung 2.4 dargestellt [1].

$$\gamma(j\omega)^2 = \frac{|G_{XF}(\omega)|^2}{G_{XX}(\omega) \cdot G_{FF}(\omega)} \quad (2-9)$$

Für die Werte der Kohärenz gilt: $0 \leq \gamma(\omega)^2 \leq 1$. Die Autospektren sind als $G_{XX}(\omega)$ und $G_{FF}(\omega)$ bezeichnet und $G_{FX}(\omega)$ ist das Kreuzspektrum. Der Grad der Linearität zwischen dem Eingang und Ausgang und damit die Qualität der gemessenen Daten werden deutlich durch folgende Aspekte beeinflusst:

- Durch Umgebung oder Messtechnik entstandenes Rauschen im Eingangs- sowie Ausgangssignal. Dies vermindert man durch einen entsprechend ausgewählten FRF-Kalkulator [1].
- Nicht-lineares Verhalten der Struktur, welches laut [6] allgemein in der Nähe von Resonanzen und Antiresonanzen auftritt. Es kann auch durch eine ungenügende Erregung verursacht werden. Mit der Benutzung eines geeigneten Erregungssignales und Mittelung der Daten kann man die Kohärenz positiv beeinflussen [4].

- Wegen der FFT-Eigenschaften können entweder eine ungenügende Frequenzauflösung oder ein zeitliches Abbrechen des Signales einen Datenverlust verursachen. Um dieses Problem zu vermindern, benutzt man entweder ein geeignetes Erregungsverfahren oder ein Zeitfenster [1]. Die Anwendung des Zeitfensters ist allerdings nicht empfehlenswert, da ein Datenverzerrern aufgrund der FFT-Eigenschaften (Modaldämpfung scheint größer, als sie tatsächlich ist) auftritt [3].
- Aufgrund einer fremden nicht aufgenommenen Erregung z. B. Antriebe, hydraulisches Aggregat usw. [3].

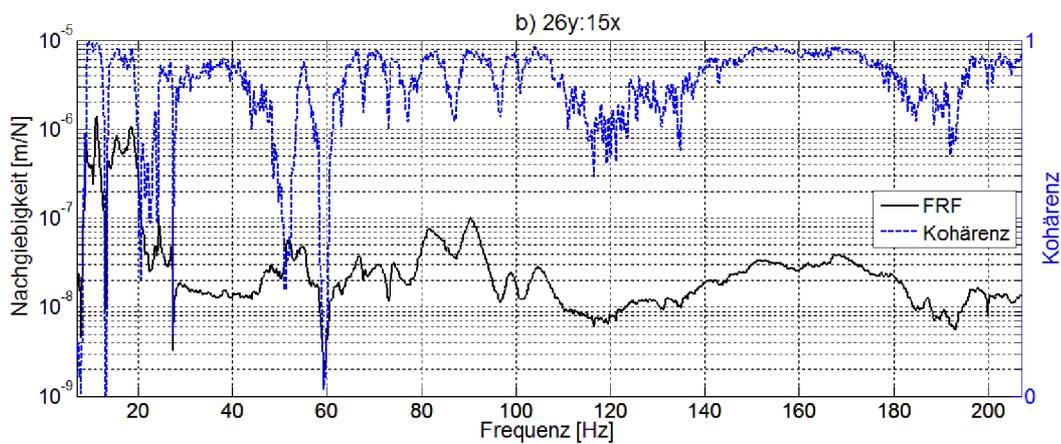


Abbildung 2.4: Eine Darstellung der FRF und der Kohärenzfunktion.

Die Kohärenz bestimmt wie hochwertig die Daten sind. Die Linearität zwischen den Signalen ist eine der wichtigsten Anforderungen an die Daten, weil die Kurvenanpassungsverfahren das mathematische lineare System voraussetzen. Andererseits bedeutet die perfekte Kohärenz, dass das System ausschließlich linear ist. Sie beschreibt nur die Linearität zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangssignal.

FRF-Kalkulatoren:

Um sowohl das Eingangs- als auch das Ausgangsrauschen zu vermindern bzw. zu vermeiden, sind die verschiedenen FRF-Kalkulatoren zu verwenden. Die am meisten angewendeten Kalkulatoren sind:

- Der Kalkulator, der als H_1 bezeichnet wird, dient zur Eliminierung des stochastischen Rauschens im Ausgangssignal (z. B. äußere Störung) durch die Mittelung des Kreuzspektrums. Laut [6] und [1] ist H_1 nicht geeignet, um die FRF in Resonanznähe zu ermitteln. Die Definition von H_1 lautet [1]:

$$H_1(j\omega) = \frac{G_{FX}(j\omega)}{G_{FF}(j\omega)} \quad (2-10)$$

- Zu einer Verminderung des Eingangsrauschens wird der H_2 -Kalkulator angewendet. Mit zunehmender Anzahl von Mittelungen des Kreuzspektrums konvergiert H_2 gegen H ebenso wie H_1 . Im Gegensatz zu H_1 ist nach [6] H_2 nicht in der Lage die FRF in der Nähe von Antiresonanzen exakt zu ermitteln. Die Formel ist [1]:

$$H_2(j\omega) = \frac{G_{XX}(j\omega)}{G_{XF}(j\omega)} \quad (2-11)$$

- Eine Lösung, um Eingangs- sowie Ausgangsrauschen zu vermindern, findet man im H_V -Kalkulator. Man kann mathematisch beweisen, dass H_1 den Wert des realen H unterschätzt, während H_2 überschätzt. H_V ist ein geometrisches Mittel von H_1 und H_2 und sollte deshalb auch mit einer niedrigeren Anzahl von Mittelungen eine bessere Abschätzung der tatsächlichen Übertragungsfunktion H bieten [6].

2.2.3 Datenauswertung und Modaldatenermittlung

Wenn die Daten mit einem befriedigenden Verlauf der Kohärenzfunktion entlang des untersuchten Frequenzbereiches erfasst sind, kann man an die Datenauswertung und Modalparameterbestimmung herantreten. Dies erfolgt durch verschiedene mathematische Modelle. Hinsichtlich des mathematischen Apparates muss zuerst eine Abschätzung von in der Struktur aufgetretenen Moden erfolgen. Die einfachste Weise der Ermittlung der Modenanzahl ist das Addieren von Spitzen in FRF (am besten in einem Magnitudendiagramm). Eine Spitze stellt ein Mode dar [11]. Das ist in manchen Fällen allerdings nicht einfach ausführbar, beispielsweise bei einer komplizierten oder stark gedämpften Struktur. Deswegen wurde für den Zweck der SIMO-Analyse eine „Mode Indicator Function“ (MIF) entwickelt.

Mode Indicator Function:

MIF dient zur Bestimmung der Modenanzahl in einem gewählten Frequenzbereich. Diese Methode ist sicherer und genauer als das einfache Addieren von FRF-Spitzen. Im Prinzip besteht die MIF aus dem Verhältnis des realen Teiles und der Magnitude der FRF. Da der reale Teil der FRF nahe der Modalfrequenz rasch auf null sinkt (oder anders ausgedrückt: die Antwort zögert um 90 Grad gegen Eingang), zeigt die MIF einen rasanten Rückgang des Wertes [3]. Im Bereich der Resonanzfrequenz soll die MIF gegen Null konvergieren. Eine von mehreren Darstellungsmöglichkeiten der MIF kann man in der Abbildung 2.5 betrachten. Die Pfeile zeigen einen Einbruch des Wertes, deshalb handelt es sich vermutlich um die Moden der Struktur.

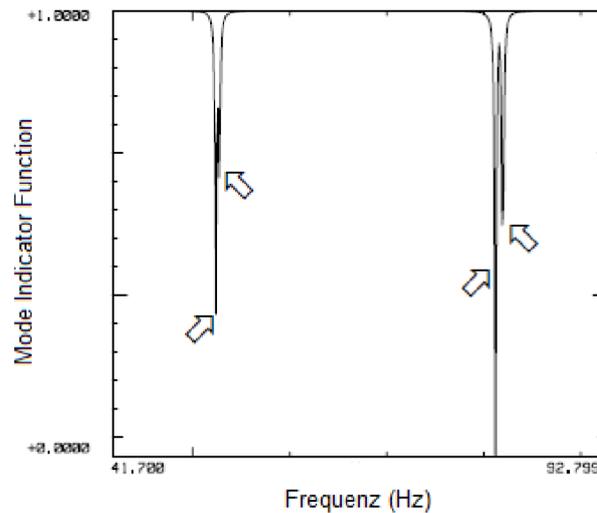
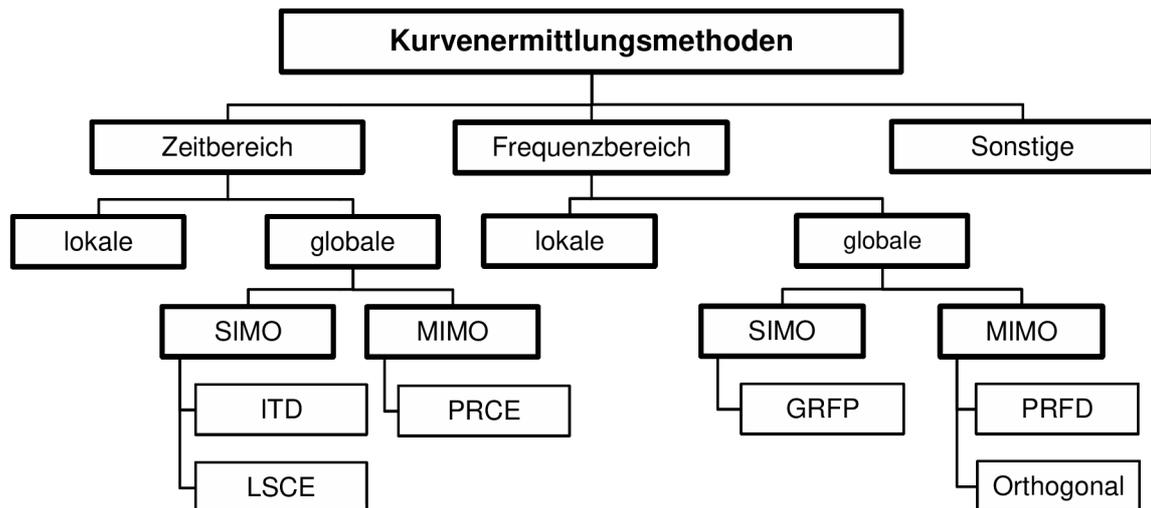


Abbildung 2.5: Modal Indicator Function einer Struktur [3]

Nach der Modenanzahlbestimmung folgt die Ermittlung von Modalparametern durch sogenannte Kurvenanpassung („Curve Fitting“). In diesem Schritt schätzt man die Modalparameter mittels verschiedener mathematischer Modelle ab. Eine Auswahl der bedeutendsten Methoden ist in der Abbildung 2.6 abgebildet. Im Prinzip geht es um die Bildung einer Kurve, die bestmöglich den gemessenen FRF (bzw. dem Zeitverlauf) entspricht [11]. Die Hauptmerkmale bzw. Vor- und Nachteile verschiedener Methoden werden weiter kurz erläutert.



ITD - Ibrahim Time Domain
 LSCE - Least Squares Complex Exponential
 PRCE - Polyreference Complex Exponential
 GRFP - Global Rational Fraction Polynomial
 PRFD - Polyreference Frequency Domain

Abbildung 2.6: Gliederung der Kurvenermittlungsmethoden [6]

Zeitbereichs- x Frequenzbereichsmethoden:

Die Zeitbereichsmodelle basieren auf IRF (Impulse Response Function), die eine Inversion der FRF in den Zeitbereich darstellt. Sie sind fähig, breitere Bereiche mit mehreren Moden zu analysieren und trotzdem stabil zu bleiben [14]. Sie sind jedoch nicht in der Lage Residuen der Moden außerhalb des untersuchten Bereiches zu berücksichtigen. Aufgrund dessen benutzt man vorwiegend die Frequenzbereichsmodelle, die dank einer Berücksichtigung residualer Effekte der Außenmoden genauer sind [15].

Globale x Lokale Einstellung:

Die Pole der Struktur (d. h. die Modalfrequenz sowie die Modaldämpfung) sind die globalen Variablen und sind deshalb gleich für alle FRF. Demgegenüber unterscheiden sich die Residuen voneinander in jeder FRF. Die lokalen Modelle berechnen die Pole und die Residuen für jede FRF und jeden Mode gesondert [14]. Aus diesem Grund können die Daten aus manchen FRF kaum verwendet werden, da die Messung durch z. B. Rauschen beeinflusst sein könnte. Die globalen Modelle rechnen sämtliche FRF zusammen und werten die Pole gleichzeitig mithilfe der Methode kleinster Fehlerquadrate aus. Damit sind die Pole genauer und die Daten konsistenter für alle FRF und auch für eine partikuläre FRF verwendbar, die z. B. durch Rauschen verzerrt sein werden kann [16]. Die lokalen Modelle sind meistens auch die SDOF-Modelle, d. h. sie berechnen die Parameter nur eines Modus auf einmal. Die MDOF-Modelle sind fähig mehrere Moden gleichzeitig auszuwerten.

Direkte x indirekte Methoden:

Die direkten Methoden berechnen direkt die Massen-, Dämpfungs- sowie Steifigkeitsmatrizen. Die indirekten Methoden beschäftigen sich mit der Ermittlung der Modalparameter (Modalfrequenz, Modaldämpfung, Modenform) [14].

Im weiteren wird kurz die häufig angewendete Methode zur Modalparameterermittlung vorgestellt. Andere Methoden sind z. B. in [6] und [10] umfangreich beschrieben.

Global Rational Fraction Polynomial (GRFP):

GRFP ist die indirekte SIMO-Methode im Frequenzbereich, die im Laufe der Zeit viele Modifikationen und Verbesserungen durchgemacht hat [8] und [16]. Diese MDOF-Methode geht aus der Formel der FRF in "Rational Fraction Form" aus [16]:

$$H(j\omega) = \frac{\sum_{k=0}^m a_k (j\omega)^k}{\sum_{k=0}^n b_k (j\omega)^k} \quad (2-12)$$

Die Formeln 2-2 und 2-12 stellen anschaulich die Bedeutung der Moden dar. Jede FRF (bzw. das Schwingverhalten einer Struktur) kann man als eine lineare Superposition der

Eigenformen beschreiben. Um die Modaldaten aus der Gleichung zu gewinnen, müssen die Koeffizienten des Zählers \mathbf{a} und des Nenners \mathbf{b} festgestellt werden. Der Nenner repräsentiert das charakteristische Polynom. Mit diesen Koeffizienten ist man in der Lage, die Pole und die Residuen zu ermitteln und daraus die Modaldaten zu berechnen. Die eigentliche Kurvenanpassung an die gemessenen Daten wird mittels der Methode kleinster Fehlerquadrate durchgeführt [8]:

$$J = \sum_{i=1}^L e_i^* \cdot e_i \quad (2-13)$$

J ist das Quadratkriterium und e_i ein Fehler auf der i -ten Frequenz. Dieser Fehler ist die Differenz zwischen der analytischen und der gemessenen FRF [8]:

$$e_i = \sum_{k=0}^m a_k (j\omega)^k - h_i \left[\sum_{k=0}^n b_k (j\omega)^k + (j\omega)^n \right] \quad (2-14)$$

Dieser mathematische Apparat kann die Einflüsse von einem Zufallsrauschen vermindern. Eine parallele Lösung der Nenner- und Zählerkoeffizienten ist in der Gleichung 2-12 allerdings nicht einfach ausführbar, da das davon abgeleitete Gleichungssystem schlecht konditioniert und umfangreich ist. Deswegen wurde die FRF in die Form der orthogonalen Polynome umgestellt. Diese Umformung befreit den Nenner von der Abhängigkeit vom Zähler. Dies verbessert die Konditionierung des Gleichungssystems und ermöglicht eine getrennte Lösung der Nenner- sowie Zählerkoeffizienten. Anfangs erfolgt eine Ermittlung des Nenners im globalen Sinne. Der Nenner heißt das charakteristische Polynom der FRF. Wenn die Koeffizienten und damit die Pole des Systems bekannt sind, folgt die lokale Bestimmung der Residuen im Zähler. Eine ausführliche Beschreibung der Methode ist in [16] zu finden.

Zu den Vorteilen dieser Methode zählt man [16]:

- Erhöhung der Ordnung m des Zählerpolynoms ermöglicht die Kompensierung von Residuen der Moden außerhalb des untersuchten Bereiches
- Bessere Ergebnisse als lokale Kurvenanpassungsmethoden
- Leicht anwendbar, rechnerisch stabil und anspruchslos
- Fähigkeit einer Entdeckung von lokalen Moden

Die Nachteile sind:

- Notwendigkeit der möglichst konsistenten Daten. Bei einer großen Änderung von Modalfrequenz und Modaldämpfung (zwischen den Messungen) treten Fehler auf
- Referenzpunkt muss gut erregt sein

2.3 MIMO-Modalanalyse

Bei der MIMO-Modalanalyse wird die Struktur auf mindestens zwei Stellen erregt und gleichzeitig wird die Antwort an mehreren Messpunkten festgestellt. Dies erfolgt mithilfe von mehreren Schwingerregern [17]. Die Grundsätze sind in vielen Hinsichten gleich wie bei der SIMO-Analyse. In diesem Kapitel werden vor allem die Unterschiede erläutert.

Die MIMO-Analyse verfügt gegenüber der SIMO-Analyse über einige Vorteilen und Nachteilen. Zu den Vorteilen zählt man vor allem [3]:

- Bessere d. h. gleichförmige Anregung der großen Struktur in mehreren Richtungen und infolgedessen auch teilweise eine Unterdrückung des nicht-linearen Verhalten
- Entdeckung von "Repeated Roots" und "Coupled Roots", die in der vor allem stark gedämpften und symmetrischen Struktur auftreten können [18, 19]
- Präzisierung der Modaldaten
- Verkürzung von Messzeiten durch gleichzeitiger Messung mehrerer FRF [12]

Die Anforderungen an die Messtechnik sind als Nachteile zu nennen. Die zusätzliche Ausstattung ist notwendig. Die unabhängigen Erregungssignale sind zu gewährleisten.

"Repeated Roots":

Die sogenannten "Repeated Roots" (siehe Abb. 2.7) treten in den Strukturen auf, die einen bestimmten Grad der Symmetrie aufweisen. Zu diesen zählt man vor allem verschiedene Scheiben, Zylinder, Ringe usw. Die "Repeated Roots" sind mindestens zwei Moden auf einer bestimmten Eigenfrequenz mit gleicher Modaldämpfung, wobei die Modenformen unterschiedlich sind [18]. In der FRF sind solche Moden nicht auf dem ersten Blick sichtbar. Diese Moden können entweder dank mehrerer Referenzpunkte (mehrmals durchgeführte SIMO-Analyse auf verschiedenen Erregungsstellen) oder mithilfe einer MIMO-Analyse entdeckt werden [3].

“Coupled Roots”:

Die “Coupled Roots” sind mindestens zwei auf fast gleicher Frequenz liegende Moden, die in der FRF kaum erkennbar sind. Sie stellen sich in der FRF als ein Mode dar. Im Vergleich zu den “Repeated Roots” treten die “Coupled Roots” vor allem in den stark gedämpften Strukturen auf, wo die Moden eng verbunden sind [3].

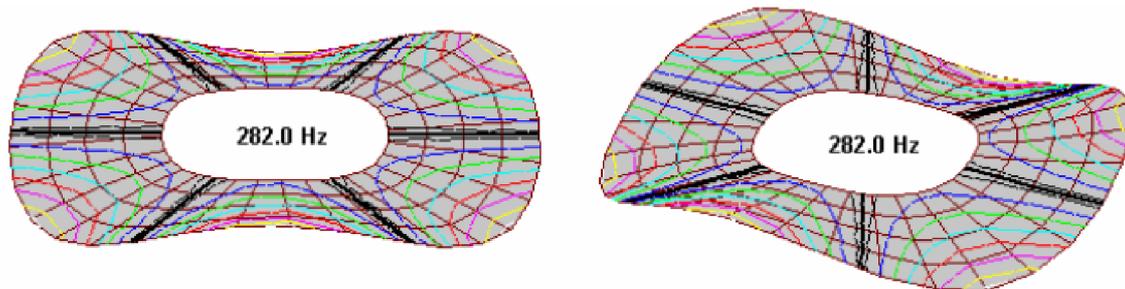


Abbildung 2.7: “Repeated Roots” auf der achsensymmetrischen Struktur [19]

Nicht-lineares Verhalten:

Solches Verhalten tritt laut [6] manchmal in niedrigen Frequenzen bzw. in der Nähe von Resonanzen sowie Antiresonanzen auf. Dieses Verhalten zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Eigenfrequenzen ändern sich durch die Position und den Beitrag der Erregung
- Nahe bei der Resonanzfrequenz sind die Daten verzerrt
- Messungen (d. h. die erhaltenen Daten) sind nicht konsistent und reproduzierbar

Falls die Struktur ein nicht-lineares Verhalten aufweist, werden verschiedene Arten der Linearisierung verwendet. Eine Random-Erregung oder eine Kraft- sowie Antwort-Pegelregelung usw. sind in der Lage dieses Verhalten zu vermindern [4].

2.3.1 Diskretisierung

Bei der Diskretisierung der Struktur für den Zweck der MIMO-Analyse sind die gleichen Grundsätze wie bei der SIMO-Diskretisierung zu beachten. Der Fakt, dass gleichzeitig mindestens zwei Referenzpunkte gemessen und infolgedessen zwei Spalten in der FRF erhalten werden, bringt die Vorteile als bessere Anregung der Struktur und eine eventuelle Entdeckung der „Repeated“ sowie „Coupled Roots“ [12].

In der Abbildung 2.8 sind eine einfache Struktur und ihre ersten sechs Moden dargestellt. Diese Moden weisen ein gerichtetes, orthogonales Verhalten auf, d. h. die Auslenkung tritt vorwiegend in einer Richtung auf. Wenn zwei verschiedene „Driving Point“ Messungen in der horizontalen und vertikalen Richtung realisiert werden, bekommt man die in der Abbildung 2.9 gezeigten FRF.

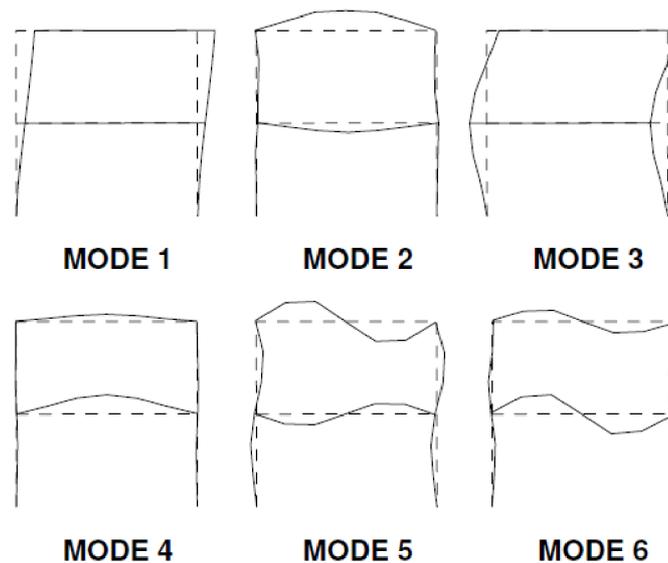


Abbildung 2.8: Erste sechs Moden einer Struktur [3]

Man kann sehen, dass in der vertikalen Richtung vier statt sechs Moden sichtbar sind. In der horizontalen Richtung sind sogar zwei statt sechs Moden erkennbar. Im Fall einer Verwendung nur eines Erregers kommt es zur erheblichen Messfehler. Dies ist verursacht durch die Eigenschaften der Residuenmatrix bzw. des Knotenpunktes.

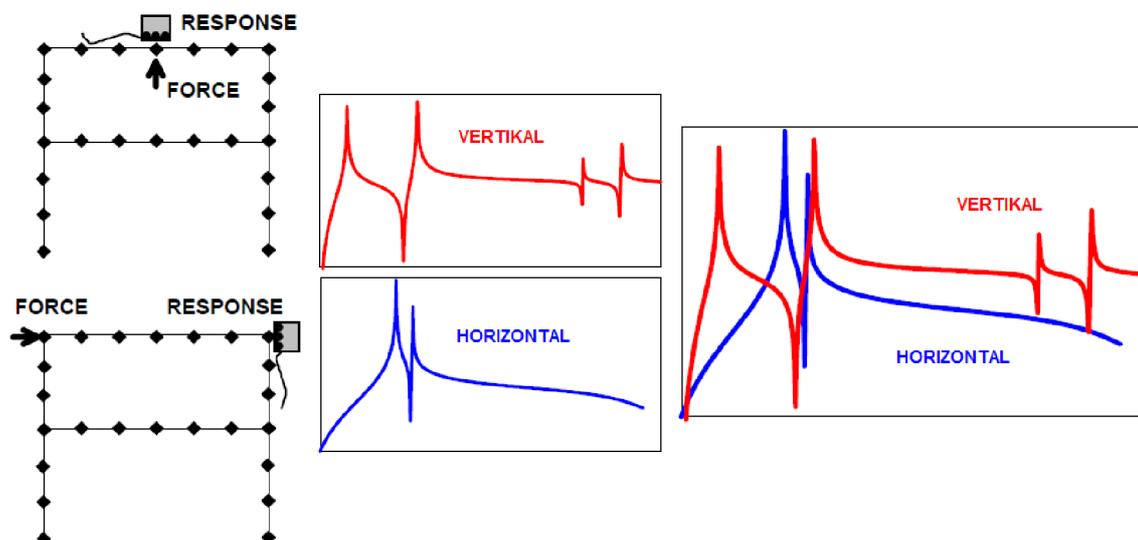


Abbildung 2.9: Erregungsstellen und entsprechende FRF der Struktur [3]

Aus der Gleichung 2-6 ergibt es sich, dass die annähernde Nullauslenkung des Referenzpunktes (auf dem Knotenpunkt des Modes) alle anderen Residuen des partikulären Modes beeinflusst. Deshalb sind in der horizontalen Richtung nur die Moden 1 und 3 sichtbar, da für alle anderen Moden die Auslenkung des Referenzpunktes annähernd Null ist.

Die MIMO-Analyse verringert das Risiko einer ungünstigen Auswahl des Referenzpunktes. Es kann eine SIMO-Analyse auf mehreren Erregungsstellen durchgeführt und dann die FRF-Matrix zusammengesetzt werden [3]. Eine solche Lösung verlängert allerdings die Messzeiten und führt zu einer Beeinflussung der FRF-Daten durch eine wechselhafte Befestigung des Erregers („Mass Loading Effekt“) [12]. Dagegen sind die gemessenen Daten bei der MIMO-Analyse konsistent, denn die Befestigung der Erreger ist invariabel.

2.3.2 Signalverarbeitung

Die Signalmessung und Umwandlung in einen diskreten Bereich verwirklicht man in gleicher Weise wie bei der SIMO-Analyse. Andererseits kommt es zu einigen Änderungen in der Bewertung der Datenqualität, d. h. in der Kohärenzfunktion. Im Vergleich zur SIMO-Analyse sind im Grunde zwei Arten der Kohärenzfunktion zu beachten.

- *Partielle Kohärenzfunktion:*

Falls sie zwischen einem Eingang und einem Ausgang verwendet wird, entspricht sie der SIMO-Kohärenzfunktion. Bei der MIMO-Analyse findet allerdings noch eine Anwendung. Sie kann die Kohärenz zwischen den Inputsignalen nach der Beseitigung einer Kreuzbeeinflussung beschreiben [20]. Falls die Kohärenz zwischen den Inputs gleich Null ist, sind die Inputs unabhängig und umgekehrt. Wenn die Struktur nur durch zwei Inputsignale erregt wird, ist die Formel der partiellen Kohärenz mit der klassischen SIMO-Kohärenz identisch.

Eine Berechnungsmöglichkeit der partiellen Kohärenz ist die Verwendung der „Singular Value Decomposition“ (SVD) [3, 21]. Der mathematische Apparat der SVD ist in der Gleichung 2-15 abgebildet [20].

$$[G_{F'F'}(j\omega)] = [Q]^H [G_{FF}(j\omega)] [Q] \quad (2-15)$$

$[G_{FF}(j\omega)]$ ist die Matrix der Eigangspektren. $[Q]$ ist die komplexe Matrix der Eigenvektoren und $[G_{F'F'}(j\omega)]$ beschreibt die diagonale Matrix, wobei die diagonalen Elemente die sogenannten „Principal Power Spectra“ sind. Falls einige Eigen-

werte der $[G_{FF}(j\omega)]$ gleich (bzw. annähernd) Null sind, wird $[Q]$ singular, d. h. die Eingänge stehen in Beziehung.

– *Multiple Kohärenzfunktion:*

Diese beschreibt lineare und kausale Beziehungen zwischen einem Ausgang und allen Eingängen. Jeder Ausgang besitzt eine Multiple Kohärenzfunktion. Wenn diese Funktion gleich Eins ist, hängt der Ausgang von allen Eingängen ab. Eine andere Zahl bedeutet, dass die Messung durch einige unbekannte Eingänge wie z. B. Rauschen beeinflusst ist. In der Gleichung 2-16 ist die Formel aufgeführt [20].

$$\gamma_{X_i F}^2 = 1 - \frac{|[G_{X_i F F}]|}{G_{X_i X_i} |[G_{FF}]|} \quad (2-16)$$

Die FRF-Kalkulatoren werden in gleicher Weise wie bei der SIMO-Analyse berechnet. Es gibt allerdings mehrere mathematische Grundsätze, die die Anwendung der Kalkulatoren limitieren [20].

- H_1 vermindert die Einflüsse vom Ausgangsrauschen. Im Vergleich zu einer SIMO-Variante ist die Benutzung des H_1 in der MIMO-Analyse durch einige Bedingungen beschränkt. Die Definition lautet [20]:

$$[H_1(j\omega)]_{L \times P} = [G_{XF}(j\omega)]_{L \times P} \cdot [G_{FF}(j\omega)]_{P \times P}^{-1} = \frac{[G_{XF}(j\omega)]_{L \times P}}{[G_{FF}(j\omega)]_{P \times P}} \quad (2-17)$$

$[G(j\omega)]$ bezeichnet die entsprechende Matrix von Auto- bzw. Kreuzspektren. Der Index L ist die Anzahl der Ausgänge und der Index P zeigt die Anzahl der Eingänge. Aus der Gleichung kann man deutlich sehen, dass die Matrix der Kraftautospektren $[G_{FF}(j\omega)]$ invertiert werden muss. Folgende Bedingungen sind zu erfüllen, um die Invertierung zu gewährleisten [20].

- Kein Inputsignal darf gleich Null sein. Die Matrix wird sonst singular
- Die Inputsignale müssen unabhängig sein. Die Werte der partiellen Kohärenzfunktion sollten gegen Null konvergieren, sonst ist die Matrix singular
- Die Matrix $[G_{FF}(j\omega)]$ sollte gut konditioniert werden, sonst wird keine Lösung gefunden

- H_V und H_S umfassen die Kompensation sowohl des Eingangsrauschens als auch des Ausgangsrauschens. Diese Kalkulatoren werden mithilfe der Methode kleinster Fehlerquadrate ermittelt. Diese Abschätzung der FRF ist genauer als bei der einfachen H_T -Abschätzung [20].

Insofern die Anzahl der Eingänge und Ausgänge nicht gleich ist, ist man nicht in der Lage den H_2 -Kalkulator zu berechnen [20]. Diese Beschränkung ist in den meisten Fällen erfüllt, deshalb findet H_2 bei der MIMO-Analyse kaum eine Anwendung.

2.3.3 Ermittlung der Modalparameter

In einer MIMO-Analyse sind die Mittel zu einer Modenanzahlidentifizierung um folgende zwei Methoden erweitert. Andere Methoden sind in [22] angeführt. Die zwei hier vorgestellten Methoden können auch bei einer SIMO-Analyse eingesetzt werden, sie ist jedoch nicht in der Lage, das Potenzial der Methoden auszunutzen [23].

- *Multivariate Mode Indicator Function (MMIF):*

MMIF verfügt über einen gleichen mathematischen Apparat wie MIF in einer SIMO-Analyse [3]. Diese Funktion ist fähig, die normalen „Coupled“ sowie „Repeated“ Moden zu entdecken. Falls ein normaler Mode erregt wird, ist der reale Teil der Antwort im Vergleich zur gesamten Antwort klein. Die normalen Moden sind einfach zu entdecken, wenn man ein Minimierungsproblem definiert [24]:

$$\|F\|_{min} = 1 \frac{\|X_r\|^2}{\|X_r + iX_i\|^2} = \lambda \quad (2-18)$$

$\|X_R\|^2$ ist der reale Teil der Antwort und $\|X_R + iX_i\|^2$ entspricht der gesamten Antwort. Der kleinste Wert des Eigenvektors λ wird gesucht. Bei einer Wiederholung der Prozedur für den zweiten kleinsten Wert des Eigenvektors werden die Eigenfrequenzen der zweiten Referenz entdeckt. Falls sich die aus beiden Eigenvektoren ermittelten Eigenwerte auf der gleichen Frequenz befinden, kann es sich um die „Repeated“ Moden handeln [3]. Eine grafische Darstellung ist in der Abbildung 2.10 gezeigt. Die erste schwarze Kurve stellt die durch eine konventionelle MIF entdeckten Moden der ersten Referenz dar. Wenn auf derselben Frequenz sinkt auch die rote Kurve der zweiten Referenz, kann man die Schlussfolgerung ziehen, dass es sich um die „Repeated“ Moden handelt.

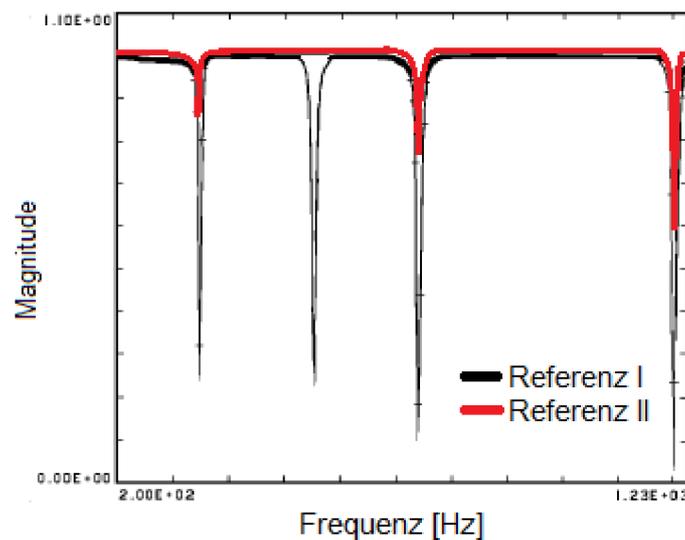


Abbildung 2.10: MMIF [24]

MMIF kann also als ein Unterstützungsmittel für eine einfache SDOF-Kurvenanpassung dienen. Die Beschränkung der MMIF beruht auf der Identifikation der normalen Moden [24]. Im Falle einer Verzerrung oder der komplexen Moden muss die „Complex Mode Indicator Function“ eingesetzt werden.

– *Complex Mode Indicator Function (CMIF):*

CMIF ist eine einfache, effektive Methode zur Bestimmung der normalen sowie komplexen Moden (für komplexe Moden siehe [4]). Das Konzept der CMIF besteht in der Durchführung einer SVD auf jeder spektralen Linie. Sie ist definiert als das Quadrat der singulären Werte der normalen Matrix [25]:

$$[H(j\omega)]^H [H(j\omega)] = [U(j\omega)] [\Sigma^2(j\omega)] [V(j\omega)]^H \quad (2-19)$$

$[H(j\omega)]^H [H(j\omega)]$ entspricht der normalen Matrix. $[U(j\omega)]$ ist ein linker singulärer Eigenvektor, der zu den Modenformen proportional ist. $[V(j\omega)]^H$ ist ein rechter singulärer Eigenvektor, der die „Modal Participation Vector“ darstellt. Dieser Vektor beschreibt die einzelnen Anteile der Erregungssignale in der gesamten Antwort. Dies gilt allerdings nur bei der Erfüllung der Bedingung, dass die kleinere Abmessung der FRF-Matrix kleiner oder gleich der Anzahl von „Repeated“ Moden auf einer Spektrallinie ist. Weiter $[\Sigma^2(j\omega)]$ bedeutet weiterhin das Quadrat der singulären Werte. Die Eigenwerte der normalen Matrix werden grafisch als der Logarithmus der Magnitude bezogen auf Frequenz dargestellt. Dies kann man in der Abbildung 2.11 betrachten.

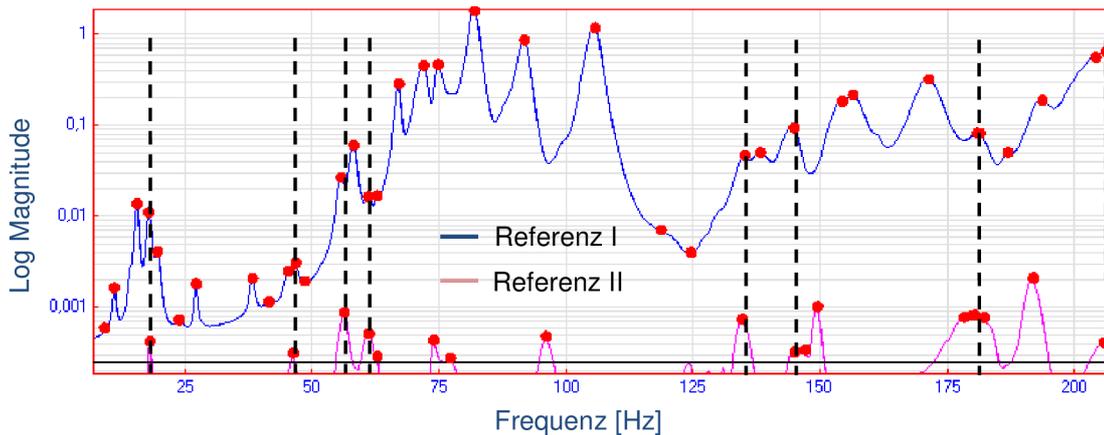


Abbildung 2.11: CMIF

Zuerst wird die Kurve mit den größten Eigenwerten generiert. Jeder Gipfel der CMIF stellt die nächstliegende Spektrallinie der gedämpften Eigenfrequenz dar. Die Höhe der Kurve entspricht der relativen Magnitude. Die zweite Kurve entspricht zweiter Referenz usw. Alle von CMIF erhaltenen Daten können bei globaler Modalparameterabschätzung zur Geltung kommen. Weiter werden die Vorteile der CMIF zusammengefasst [25]:

- Entdeckung von „Repeated“ und komplexen Moden
- Eigenwerte können als eine Gewichtsfunktion bei FRF-Kurvenanpassung dienen
- CMIF zeigt die physischen Magnituden aller Referenzen
- Bedienungseinfach, robust auch für verzerrte Daten

Es gibt auch einige Nachteile zu erwähnen:

- Multiple Referenzen werden benötigt, um das Potenzial auszunutzen
- Genauigkeit ist durch Frequenzauflösung und Datenqualität beeinflusst
- Erhaltenen Modenformen sind unskaliert. Ein zusätzlicher Berechnungsschritt ist notwendig, falls CMIF zur Parameterabschätzung verwendet wird

Wenn die Modenanzahl bestimmt ist, ist man in der Lage an Modalparameterabschätzung durch Kurvenanpassungsmethoden heranzugehen. Eine Übersicht der Methoden wurde im vorigen Kapitel 2.2.3 vorgestellt. Hier wird die Alternative der GRFP-Methode für die MIMO-Analyse erläutert.

Orthogonal Polynomial:

„Orthogonal Polynomial“ geht auf die GRFP-Methode zurück. Die Grundformel in „Rational Fraction Form“ für mehrere Inputs und Outputs lautet [26]:

$$[H(j\omega)]_{N_i \times N_o} = \frac{\sum_{k=0}^m [A_k]_{N_i \times N_i} (j\omega)^k}{\sum_{k=0}^n [B_k]_{N_o \times N_i} (j\omega)^k} \quad (2-20)$$

N_i entspricht der Anzahl von gleichzeitig gemessenen Inputs und N_o den gleichzeitigen Outputs. $[A_k]$ und $[B_k]$ sind die Matrizen der Zähler- und Nennerkoeffizienten. Wie bei der GRFP-Methode ist diese Gleichung schlecht konditioniert und die Lösung des Gleichungssystems sehr anspruchsvoll, deswegen ist die Einführung von orthogonalen Polynomen wünschenswert. In dieser Form ist wieder der Zähler unabhängig von dem Nenner. Damit ist die Anzahl von Gleichungen zur Anzahl der Moden in den Daten proportional und von der Anzahl der Eingangs- sowie Ausgangsstellen unabhängig. Mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wird eine entsprechende Kurve an die gemessenen Daten angepasst. Wie bei der GRFP-Methode werden die Pole im globalen Sinne und die Residuen im lokalen Sinne bestimmt. Die Methode ist in [26] ausführlich beschrieben. Die Vorteile können in folgenden Punkten zusammengefasst werden [26]:

- Entdeckung der „Repeated“ sowie „Coupled“ Moden, wobei die maximale Anzahl der auf einer Frequenz entdeckten Moden von der Anzahl der Erregungsstellen abhängig ist (zwei Inputstellen entdecken zwei „Repeated“ Moden) [3]
- Ordnung des charakteristischen Polynoms (der Nenner) bestimmt die Anzahl der Moden im untersuchten Frequenzbereich. Diese Ordnung erhält man mittels CMIF. Durch die Ordnung des Zählers ist man in der Lage die Einflüsse der Moden außerhalb des Frequenzbereiches einfach zu kompensieren
- Einfach anwendbar, rechnerisch stabil und anspruchslos
- Orthogonal Polynomial im Zusammenwirken mit der CMIF ist in der Lage, die Modal Participation Factors zu berechnen

Zwei Referenzen in der MIMO-Analyse ermöglichen eine Einsetzung eines Stabilitätsdiagramms. Eine Diagrammanwendung bedeutet eine Alternative zu den MIF- sowie den Kurvenanpassungsmethoden [3].

Stability Diagram (SD):

Das Stabilitätsdiagramm findet eine Anwendung bei einer Modenanzahl- sowie bei einer Modalfrequenz- und Modaldämpfungsabschätzung. Es stellt eine Alternative zu der MMIF, CMIF sowie den Kurvenanpassungsmethoden dar.

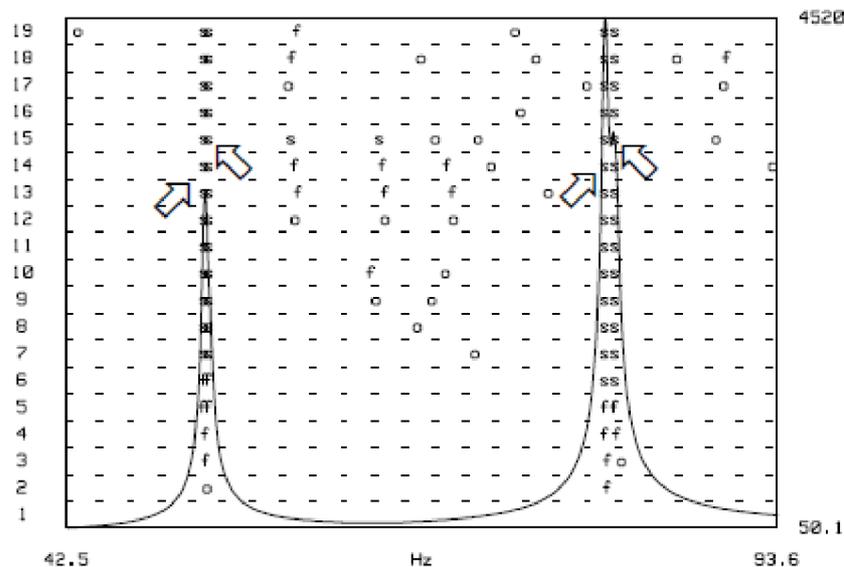


Abbildung 2.12: Stabilitätsdiagramm [3]

Das Prinzip des Diagramms besteht in einer Ordnungserhöhung des verwendeten mathematischen Modells [3]. Zwischen den Ordnungen des Modells kommt es zu Frequenz- sowie Dämpfungsabweichungen. Wenn aber die abgeschätzten Pole sich auch in höheren Ordnungen des Modells wiederholen und sich in einer bestimmten Toleranz bewegen, hält man diese Pole für stabil und für eine globale Charakteristik der Struktur [27]. Die im Stabilitätsdiagramm verwendeten Modelle sind speziell geeignete Kurvenanpassungsmodelle für die unterschiedlich großen Frequenzbereiche (z. B. AF-Polynomial, Z-Polynomial u. a.) [23]. Eine typische Darstellung des Stabilitätsdiagrammes zeigt die Abbildung 2.12. Die Nummern auf der linken Seite stellen die Ordnung des Modells dar. Die vertikalen Linien der Zeichen repräsentieren die entdeckten Modalfrequenzen. Je mehr Zeichen übereinander steht, desto stabiler ist der Mode.

2.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden in Kürze nur die Unterschiede zwischen beiden Einstellungen der EMA angeführt (bzw. die Vor- und Nachteile der MIMO- im Vergleich zur SIMO-Analyse). Zu den Vorteilen der MIMO-Analyse zählt man:

- Neben einer gleichmäßigen Anregung der Struktur auch eine Anregung der anderen Richtungen und somit die mögliche Entdeckung mehrerer Moden
- Entdeckung von sowohl „Coupled“ als auch „Repeated“ Moden
- Mögliche Anwendung von Stabilitätsdiagrammen
- Zeitersparnis im Vergleich zur zweimal durchgeführten SIMO-Analyse als ein MIMO-Ersatz. Daten werden also nicht durch die wechselhafte Befestigung des Shakers verzerrt und sind deshalb konsistenter.

Ein Nachteil ist der Aufwand der Messtechnik. In folgender Tabelle 2.1 sind die Unterschiede im Vorgehen erwähnt. Die Unterschiede zwischen den mathematischen Apparaten (z. B. Kurvenanpassungsmethoden) sind nicht einberechnet.

Tabelle 2.1: Unterschiede im Vorgehen zwischen SIMO- und MIMO-Analyse

	SIMO-Analyse	MIMO-Analyse
Technik	Ein Shaker	Mindestens zwei Shaker
Signal- verarbeitung	H_{1r} , H_{2r} und H_v -Kalkulatoren	H_{1r} und H_v -Kalkulatoren
	Kohärenzfunktion	Partielle Kohärenzfunktion
		Multiple Kohärenzfunktion
Auswertung	Modal Indicator Funktion	Complex Mode Indicator Function
		Multivariate Mode Indicator Function
		Stabilitätsdiagramm

3 Experimentelle SIMO-Analyse

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise der experimentellen SIMO-Modalanalyse auf der vorgelegten Maschine besprochen. Die Wahl der Diskretisierungspunkte, die Messbedingungen sowie die Ergebnisse sind die Schwerpunkte des Kapitels, wobei Schlussfolgerungen, die die Ergebnisse betreffen, gezogen werden.

3.1 Untersuchte Maschine

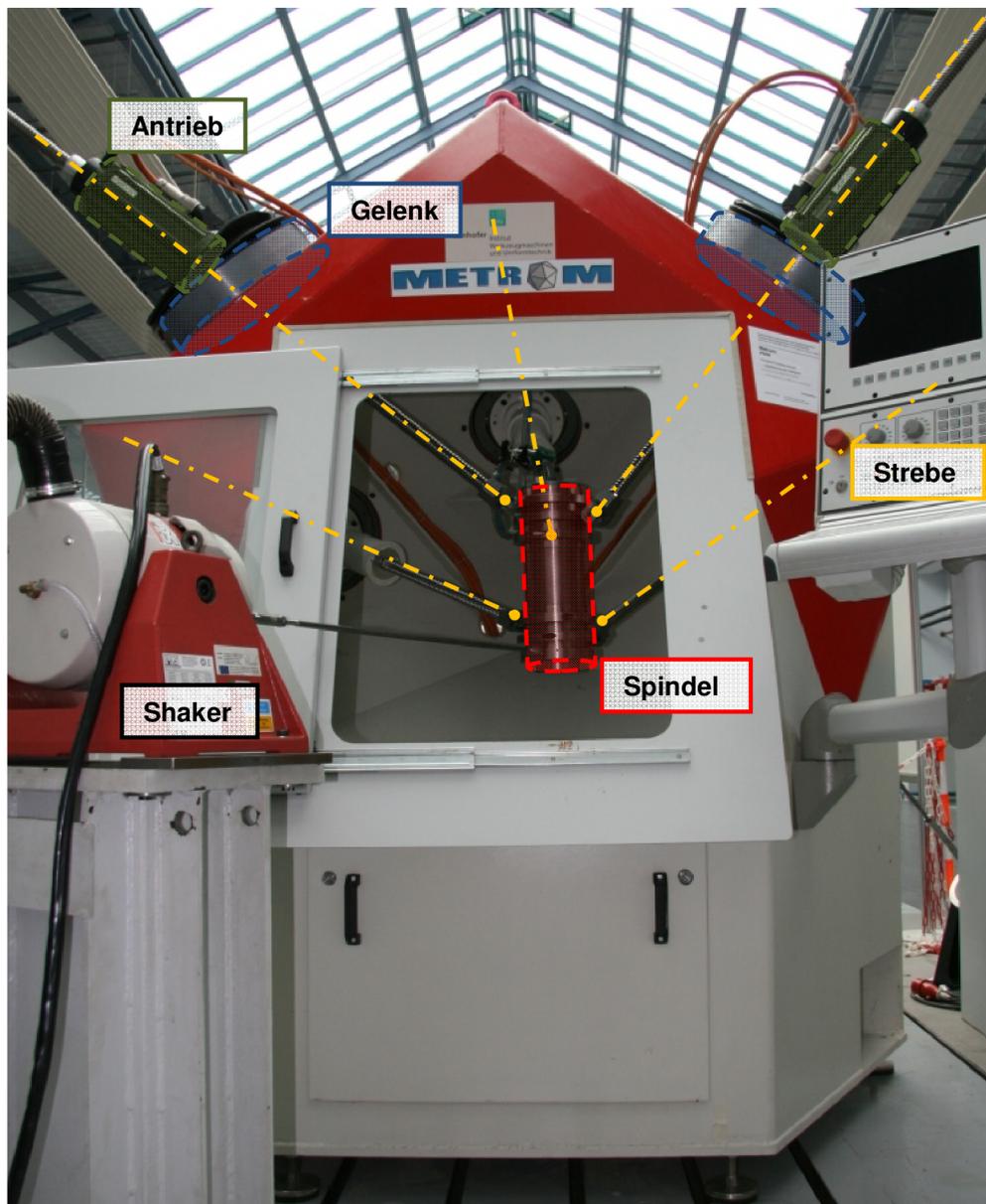


Abbildung 3.1: SIMO-Versuchstand METROM P800

Die untersuchte Maschine ist eine Parallelkinematik-Fräsmaschine METROM P800, die sich an der TU-Chemnitz befindet. Die Maschine steht der „Forschungsabteilung Werkzeugmaschinen“ für die Versuche zur Verfügung. Die Abbildung 3.1 zeigt den Versuchstand mit einem Schwingerreger und der Maschine. Diese Maschine verfügt über fünf programmierbare Achsen (Streben in einer Kugelrollspindelbauweise), die mittels Hohlnebenantriebe angetrieben werden. Die Frässpindel wird durch diese Streben bewegt und gehalten. Die spezielle Konstruktion der Spindelträger ermöglicht das Schwenken der Spindel um 90°, was im Zusammenwirken mit einem Drehtisch eine 5-Achsbearbeitung zulässt. Die Bauweise der Maschine bietet hohe Dynamik und Steifigkeit [28].

Hinsichtlich des Schwingverhaltens ist die spezielle Bauweise der Maschine zu berücksichtigen. Die Maschine steht auf einem isolierten Fundament. Die Frässpindel wird durch fünf Streben bewegt. Diese Streben werden von Gelenken gehalten. Auf jedem Gelenk ist ein Hohlnebenantrieb befestigt. Die Gelenke sind im Gestell gelagert. An das Gestell wird der Tisch angekoppelt, der diese Bauteilkette schließt. Die Position dieser erwähnten Bauteile ist in der Abbildung 3.1 hervorgehoben.

3.2 Diskretisierung der Maschine

Der Erregungspunkt (und somit also der Referenzpunkt) ist an der Frässpindel in der Nähe des „Tool Centre Point“ (TCP) gewählt. Die Lage des TCP wurde von der letzten EMA übernommen. Diese Wahl ermöglicht die beste Erregung der Spindel und der Streben, deren Bewegung für die Zerspanungsprozesse von großer Bedeutung ist. Der Schwerpunkt der Diskretisierung liegt also in der Beschreibung der Bewegung der Streben.

In der Abbildung 3.2 sind der Referenz- sowie die Messpunkte innerhalb der Maschine (im Arbeitsraum) dargestellt. An der Frässpindel liegen in Axialrichtung zwei Messpunkte (als F1 und F2 bezeichnet) und der Referenzpunkt (R). Auf jeder Strebe sind im Arbeitsraum fünf Punkte (S1-S5) zu messen. Die ersten drei Punkte liegen in einem konstanten Abstand von der Gelenkscheibe. Der vierte Punkt liegt in der Mitte der im Arbeitsraum unbedeckten Strebe. Der Fünfte liegt knapp vor der Kapsel. In der Abbildung sind zwei von insgesamt vier Messpunkten auf dem Tisch (T1-T4) abgebildet. Jeder von diesen Punkten entspricht einem SDOF. Das Koordinatensystem dieser SDOF wurde primär hinsichtlich des Maschinenkoordinatensystems gewählt. Allerdings mussten mehrere SDOF geschwenkt werden, um effektiv messbar zu sein.

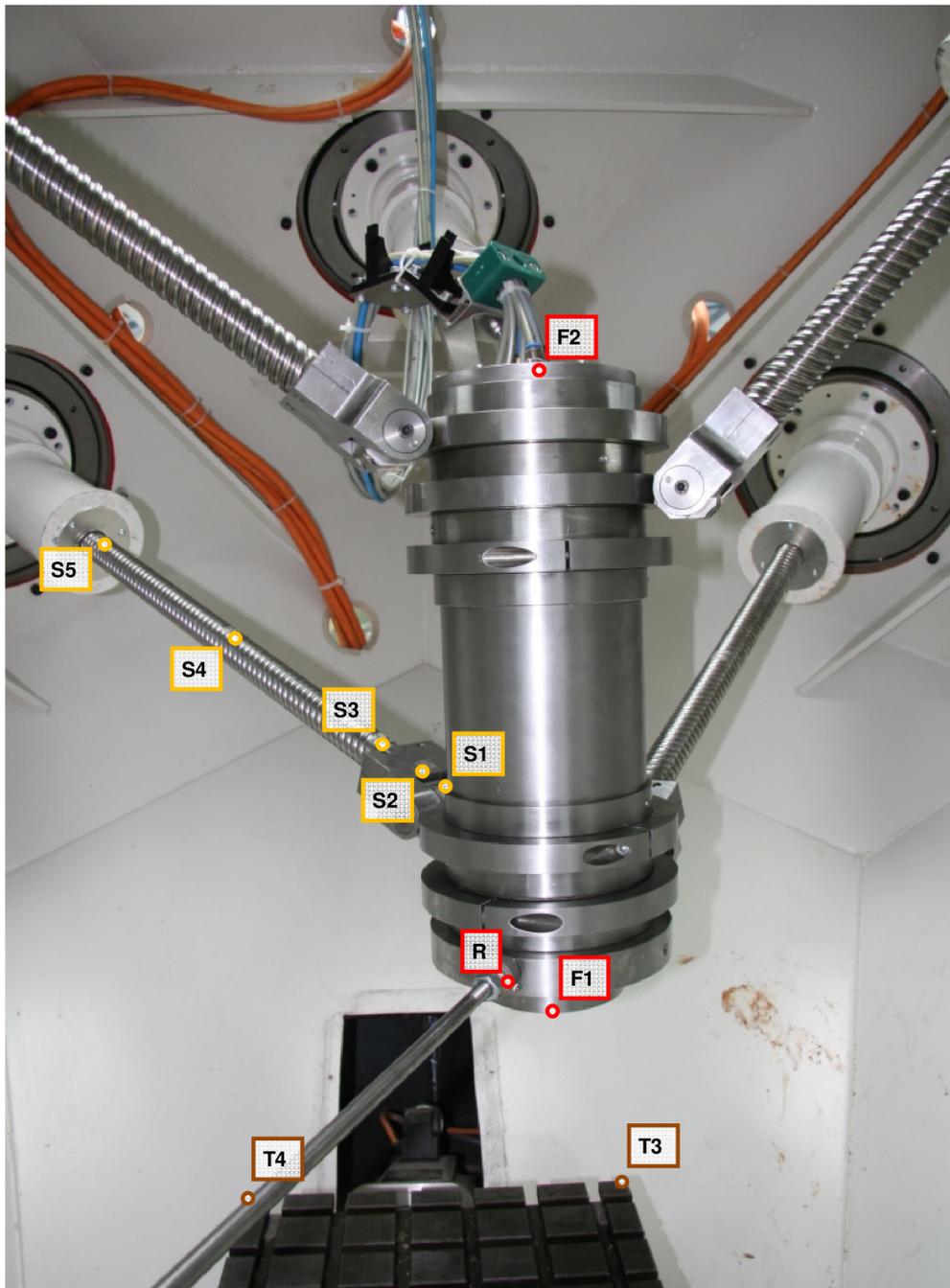


Abbildung 3.2: Diskretisierung des Arbeitsraumes

In der Abbildung 3.3 sind die SDOF außerhalb des Arbeitsraumes dargestellt. Auf dem Gestell sind insgesamt 14 SDOF (G1-G14). Sechs von ihnen liegen auf dem unteren Sechseck. Weitere Punkte sind auf jedem Eckpunkt des Dreieckes, wo die Gelenke angeordnet sind. Das Schwingverhalten der Gelenke wird durch zwei SDOF (E1 und E2) je Gelenk gemessen. Zwei Messpunkte (A1 und A2) liegen auf dem Antrieb im konstanten Abstand von Gelenk. Jede Strebe verfügt außerhalb der Maschine über drei SDOF, und zwar am Anfang (S6), in der Mitte (S7) und am Ende (S8) der unbedeckten Länge.

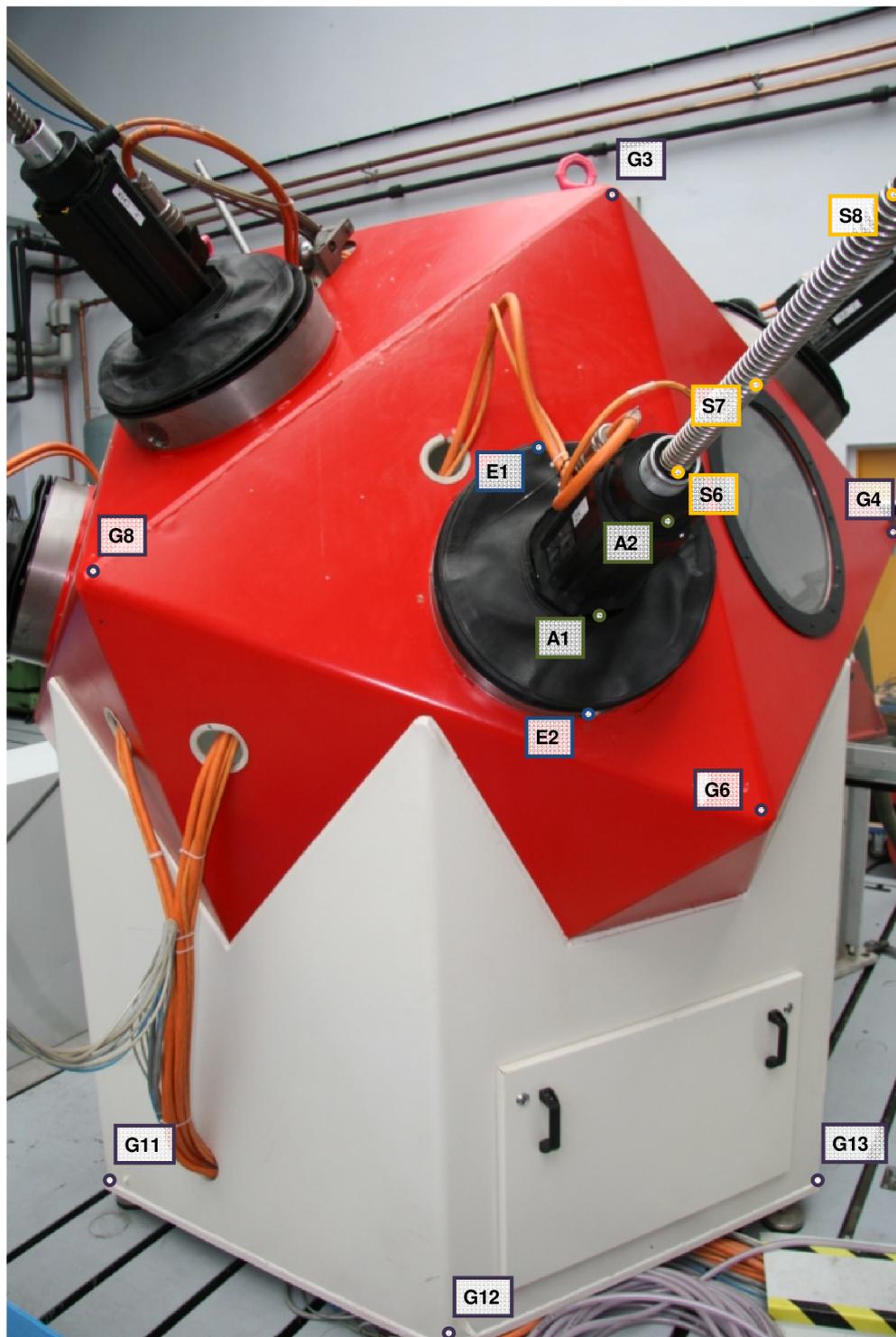


Abbildung 3.3: SDOF außerhalb des Arbeitsraumes

Insgesamt gibt es 81 SDOF einschließlich Referenzpunkt, die in 28 Messungen unterteilt wurden. Die Lage der SDOF hinsichtlich des Maschinenkoordinatensystems und die Position des TCP sind in der Anlage A angeführt.

3.3 400 Hz SIMO-Analyse

Es wurden zwei eigenständige SIMO-Modalanalysen unter verschiedenen Bedingungen mit verschiedenen Parametern durchgeführt. Diese zwei Analysen werden im Weiteren aus Anschaulichkeitsgründen in 400 Hz und 200 Hz Analyse unterteilt.

3.3.1 Parameter der 400 Hz Analyse

Die in der Tabelle 3.1 angeführte Messtechnik steht von der TU-Chemnitz zur Verfügung und wird für den Zweck der SIMO-Analyse verwendet.

Tabelle 3.1: Bestehende Messtechnik für SIMO-Analyse

Gerät	Typ
FFT-Analysator	B&K 3035 + 7540A
Leistungsverstärker + Energieversorgung	LDS PA1200 + FPS12
Schwingerreger (Shaker)	LDS V555, M6-CE
3x Beschleunigungssensor	B&K 4506B
Kraftsensor im Zusammenwirken mit einem Ladungswandler	B&K 8201 + 2647A

Der untersuchte Frequenzbereich beträgt 400 Hz, und zwar von 7 bis 407 Hz. Die untere Grenze wurde gewählt, um mögliches Rauschen auf niedrigeren Frequenzen zu vermindern und eine Sensorlinearität sowie richtige Sensorempfindlichkeit zu gewährleisten. Vor den Messungen wurden noch alle Sensoren nach der Gebrauchsanweisung kalibriert. Die gesamte Anzahl von Spektrallinien betrug 3200 in einer Messung, was einer Frequenzauflösung von 0,125 Hz entspricht. Die Gesamtzeit einer Messsequenz war also 8 s. Diese Messsequenz wurden 40-mal wiederholt und gemittelt. Als ein Erregungssignal wurde „Burst Random“ angewendet. Der Schwingerreger war auf maximale mögliche Kraft eingestellt, bei der der Kraftsensor noch nicht überlastet war.

Die zusammengefassten Angaben:

Frequenzbereich: 400 Hz (von 7 bis 407 Hz)

Anzahl von Spektrallinien: 3200

Frequenzauflösung: 0,125 Hz

Erregungssignal Burst Random (2/6)

Zeit der Messung 8 s

Mittelungen 40-mal

Burst Random:

Burst Random ist zurzeit ein Erregungssignal von größter Bedeutung. Es erfüllt die Bedingung der Periodizität (wegen FFT-Anforderungen), da die erregte Antwort abklingt in der gemessenen Zeitperiode [29]. Andererseits wird dank des stochastischen Charakters das nicht-lineare Verhalten teilweise vermindert [4]. Ein Beispiel solches Signales ist in der Abbildung 3.4 dargestellt. In der Abbildung kann man klar sehen, dass die Struktur nach einer Abschaltung des Schwingerregers abklingen kann. Zeit der Erregerabschaltung muss man immer auf die konkrete Struktur anpassen. Im Grunde gilt es: Je größer die Modaldämpfung ist, desto kürzer sind die Zeiten des Abklingens.

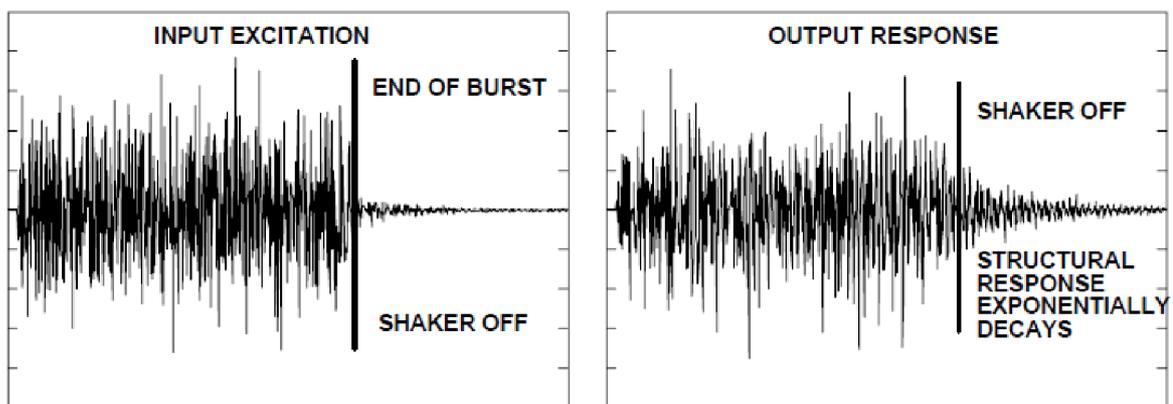


Abbildung 3.4: Burst Random Erregung [3]

Die Zeit der Erregung wurde in der Analyse auf 2 s eingestellt, nach dieser Zeitspanne wurde der Shaker abgeschaltet und die restlichen 6 s der Gesamtzeit von 8 s wurden für das Abklingen bestimmt.

Die Messungen wurden während des Tages bei vollem Betrieb der Halle durchgeführt, wobei die Temperatur 25 Grad Celsius nicht überschritt. Zu den bemerkbaren Störquellen kann man zählen: den Betrieb anderer Maschinen, den Schwingerreger (inkl. den Lüfter) sowie eine Störung des Fundamentes (war zu gegebener Zeit verklemmt und nicht völlig funktionsfähig). Der Schwingerreger ist auf dem Fundament platziert und nicht von der Maschine isoliert, deswegen muss man ihn als mögliche Störquelle betrachten. Es kann eine nicht aufgenommene Anregung der Struktur durch eine Rückkoppelung mittels des Ständers entstehen, auf dem der Schwingerreger befestigt ist.

Die Befestigung der Beschleunigungssensoren erfolgte mithilfe von Bienenwachs. Es wurden die Befestigungsprinzipie, die in [9] angeführt sind, möglichst genau eingehalten. Die Befestigung des Kraftsensors wurde mittels einer Gewindeverbindung gebildet.

3.3.2 Erhaltene Daten

Die gemessenen Daten der 400 Hz Analyse werden im Kapitel vorgestellt und besprochen. Alle hier angeführte Ergebnisse wurden mittels der PULSE 15.1 gemessen und der ME'scopeVES 5.0 Software ausgewertet, da diese Programmen an der TU Chemnitz zur Auswertung der Modaldaten zur Verfügung stehen und die erforderlichen Werkzeuge zur Bearbeitung der Messdaten anbieten (siehe Kapitel 2) [23].

Das Antwortsignal wurde in Form der Beschleunigung gemessen, während das Erregungssignal in Form des Kraftspektrums gewonnen wurde. Das Verhältnis dieser Signale stellt die FRF in der Form der Beschleunigbarkeit dar. Für die Auswertung und folgende Überprüfung der Ergebnisse wird jedoch die Nachgiebigkeit (zweimal integrierte Beschleunigbarkeit) benutzt, da sie bessere Ergebnisse gibt. In sämtlichen Messungen wurde der H_T -Kalkulator angewendet, um das vorausgesetzte bedeutende Ausgangsrauschen zu vermindern. Wenn x bezeichnet die Auslenkungsamplitude und F ist die Kraftamplitude, dann lautet die Formel der Nachgiebigkeit [30]:

$$\delta = \frac{x}{F} [mN^{-1}] \quad (3-1)$$

In der Abbildung 3.5 kann man die Nachgiebigkeitsgänge und die Kohärenz betrachten, die im Referenzpunkt p15 erworben wurden. Dies wird in PULSE 15.1 gemessen und verarbeitet. Der Referenzpunkt sollte die besten Voraussetzungen wegen der guten Anregung für hochwertige Messdaten besitzen, aber bei einem näheren Betrachten der Ergebnisse vor allem in der Y-Richtung sind diese nicht so befriedigend, wie sie erwartet wurden. In der X- sowie Z-Richtung sind die Nachgiebigkeitsgänge ohne eine deutliche Störung. Die Kurven sind glatt ohne ein erhebliches Rauschen und die Moden scheinen hinlänglich deutlich, was ein Merkmal von größter Bedeutung für den Referenzpunkt ist. Die Kohärenz ist im Bereich von etwa 30 Hz befriedigend. Die Ausnahme ist die markante Antiresonanz in der Z-Richtung (um 120 Hz). Solche Kohärenz ist jedoch wegen Antiresonanzeigenschaften erwartet, da im Bereich der Antiresonanz die Schwingauslenkung üblich gegen Null konvergieren kann und damit eine schlechte Abhängigkeit zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangssignal entsteht. Im Vergleich dazu besitzt die Y-Richtung im ganzen gemessenen Bereich ein starkes Rauschen des Nachgiebigkeitsganges, das mit der genauso schlechten Kohärenz korrespondiert. Dies könnte mehrere Gründe haben, vor allem eine schlechte Anregung der Y-Richtung bzw. ein nicht-lineares Verhalten der

Struktur. Eine äußere Störung scheint hinsichtlich des befriedigenden Verlaufes der X- sowie Z-Richtung nicht wahrscheinlich.

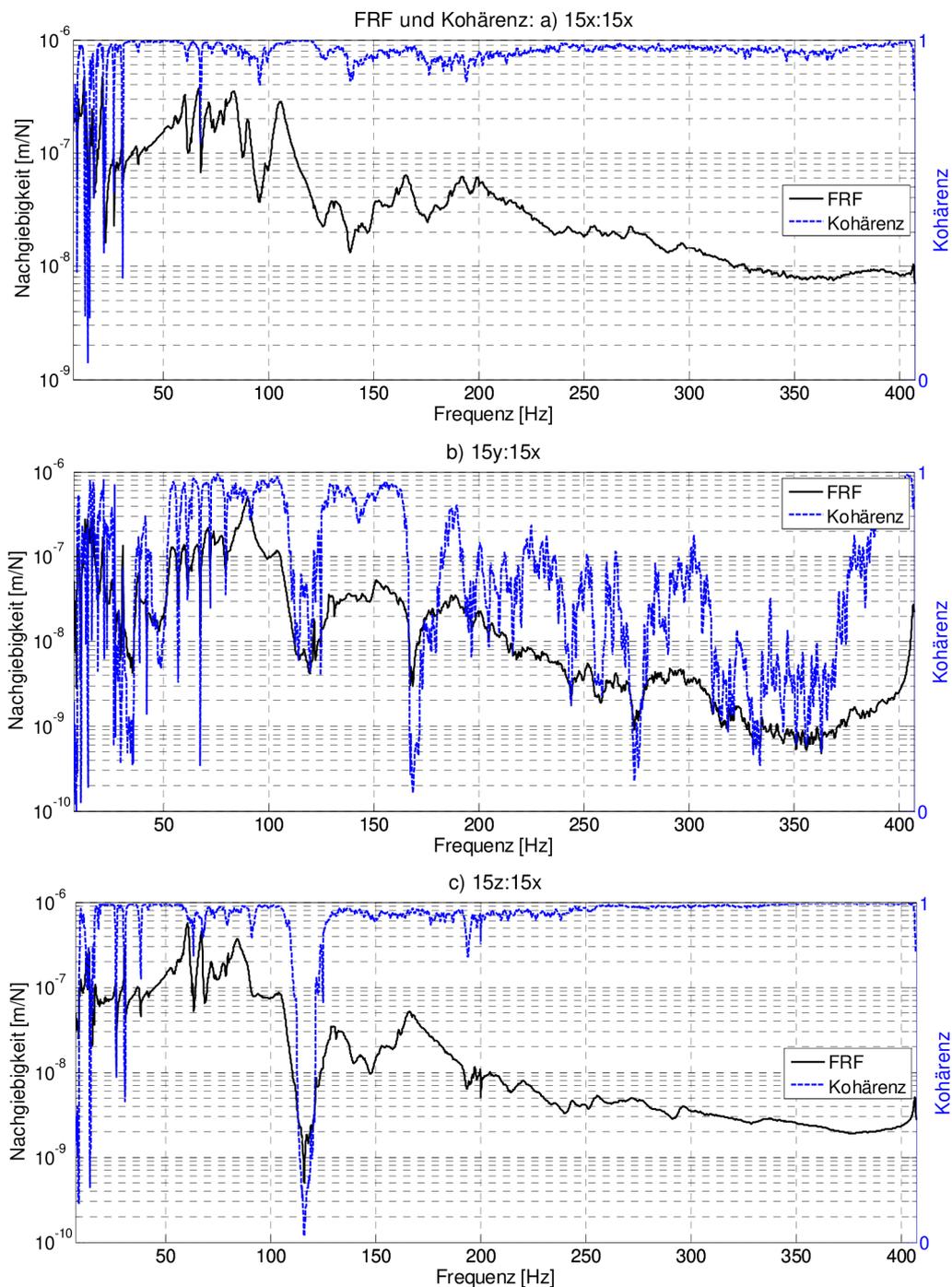


Abbildung 3.5: Nachgiebigkeit und Kohärenz im Referenzpunkt; SIMO 400 Hz

Als anderer Demonstrationspunkt der SIMO-Analyse wurde p26 auf der Strebe 1 gewählt, um die Bewegung der Streben darzustellen. Dieser Punkt und noch andere Beispiele von Punkten sind zusammen mit dem benutzten Koordinatensystem in der Abbildung 3.6 zu sehen. Es war nötig die Koordinatensysteme der einzelnen SDOF so einzustellen, um die

einfache Überprüfbarkeit der richtigen Sensorpositionierung sicherzustellen. Die X-Koordinaten der Beschleunigungssensoren entsprechen auf den Streben den Strebeachsen. In den anderen Punkten wird die X-Koordinate der Sensoren so positioniert, um die Richtung einfach einstellbar und nachprüfbar zu sein. Die X-Richtung der ersten Strebe stimmt ungefähr mit der Erregungsrichtung überein.

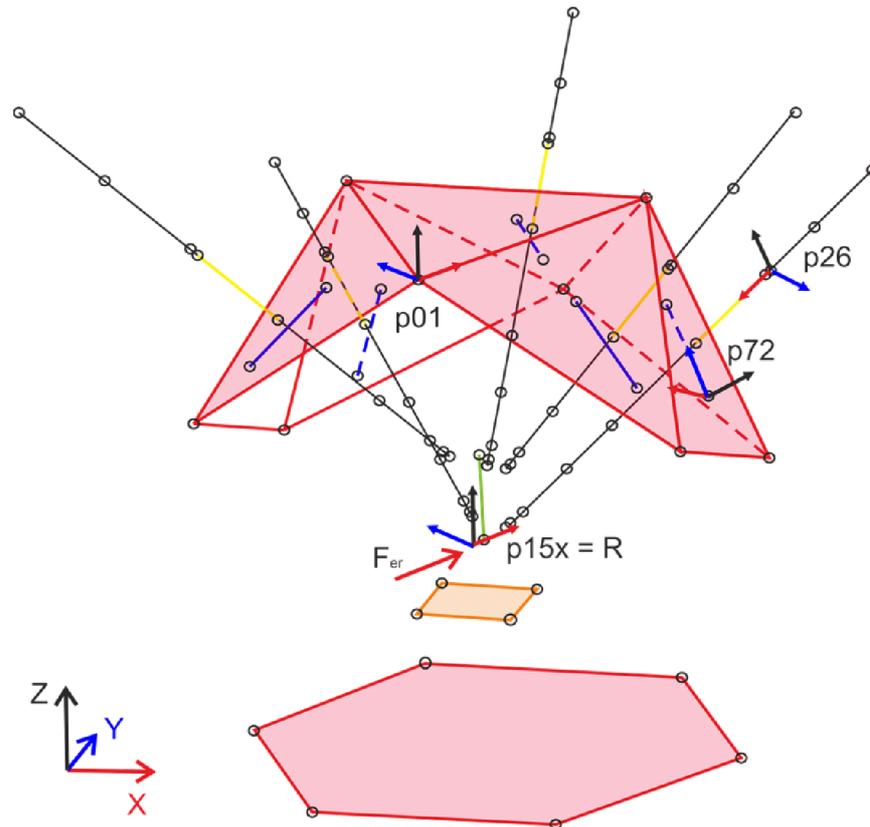


Abbildung 3.6: Diskretisierte Struktur und Beispiele der SDOF

Die Verläufe der Nachgiebigkeit und der Kohärenz des p26 Punktes sind in der Abbildung 3.7 dargestellt. Auf dem ersten Blick sind die stark verzerrten Verläufe der Nachgiebigkeit in Y- und Z-Richtung im ganzen Frequenzbereich bemerkbar. Die Kohärenz in diesen Richtungen ist genauso niedrig. Demgegenüber ist die Nachgiebigkeitskurve in X-Richtung relativ glatt wie beim Referenzpunkt. Trotzdem gibt es hier einige Andeutungen des Rauschens. Dies konnte z. B. entweder durch eine schlechte Ankoppelung der Sensoren bzw. Kabel oder wahrscheinlicher durch eine Störung von äußeren Quellen (andere Maschinen) entstehen und somit auch die Periodizität des Eingangssignales verletzen. Der p26 Punkt liegt außer der Arbeitsraum der Maschine, deswegen ist störungs-anfälliger als der Referenzpunkt im Innenraum. Eine gemeinsame Charakteristik der Nachgiebigkeitsgänge ist eine Absenz von wesentlich deutlichen Moden im Frequenzbereich von etwa 250 Hz in allen Richtungen.

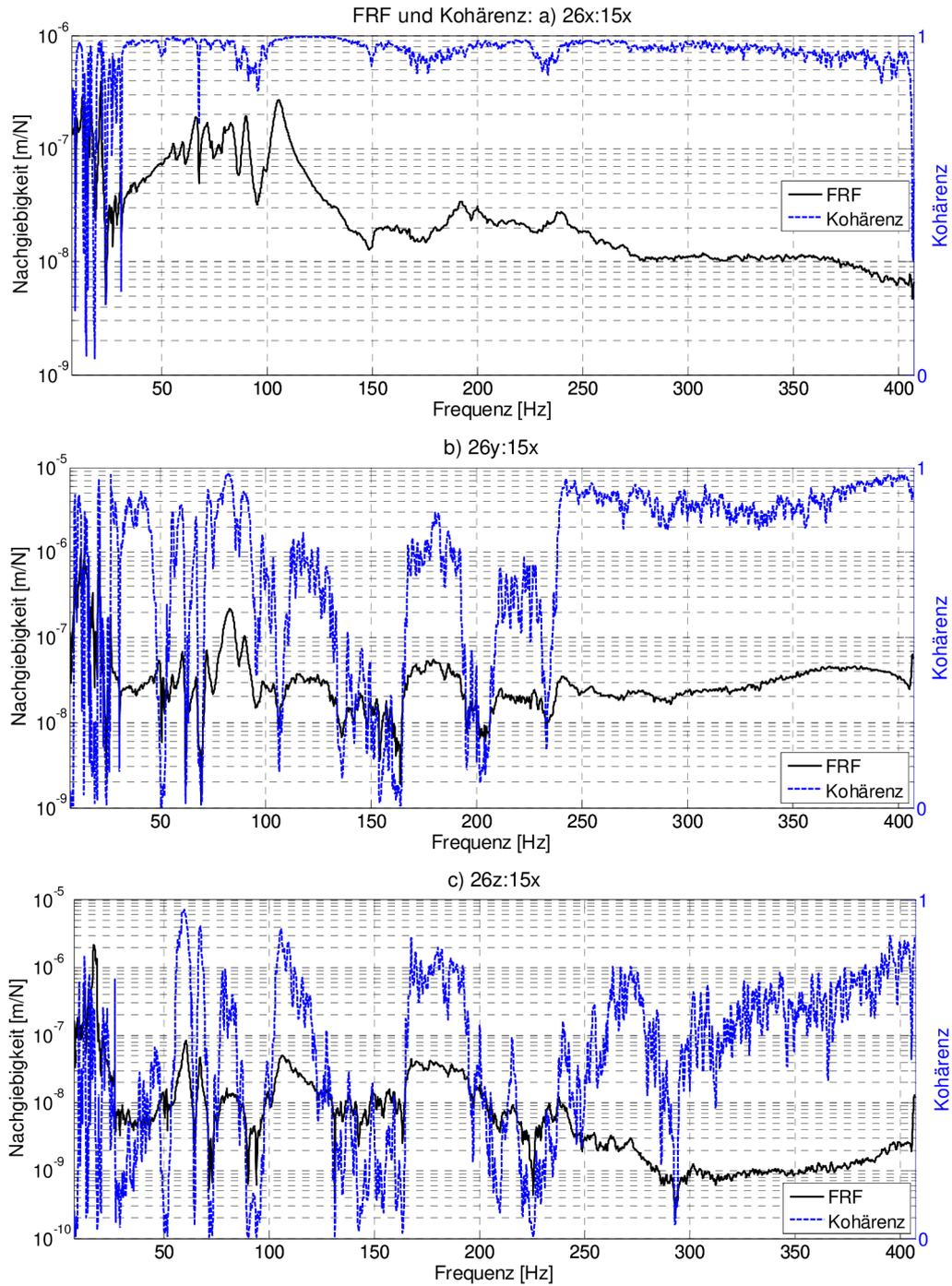


Abbildung 3.7: Nachgiebigkeit und Kohärenz im p26 auf der Strebe 1; SIMO 400 Hz

3.3.3 Auswertung der Daten

Für die Bestimmung der Modalparameter wurde Software ME'scopeVES 5.0 verwendet. Die Ermittlung der Anzahl von Moden wurde mittels der konventionellen MIF (siehe 2.2.3) durchgeführt. Als Kurvenanpassungsmethode wurde Orthogonal Polynomial (im Kapitel 2.2.3 als GRFP genannt) ausgewählt.

Eine sinnvolle Anwendung der MIF wird durch starkes Rauschen in der FRF-Datei begrenzt, deswegen muss eine „Smooth Function“ verwendet werden. Diese Funktion glättet die FRF mittels einer künstlichen Erhöhung der Modaldämpfung. Somit kommt es zur Verzerrung der Daten, da die Modaldämpfung höher scheint, während die Magnitude der Nachgiebigkeit im Bereich von Resonanzen sinkt. Nach der Anwendung dieser Funktion wird eine vernünftige Abschätzung der Modenanzahl ausgeführt, die auf der Abbildung 3.8 abgebildet ist. Die abgeschätzte Anzahl von Moden ist etwa 60.

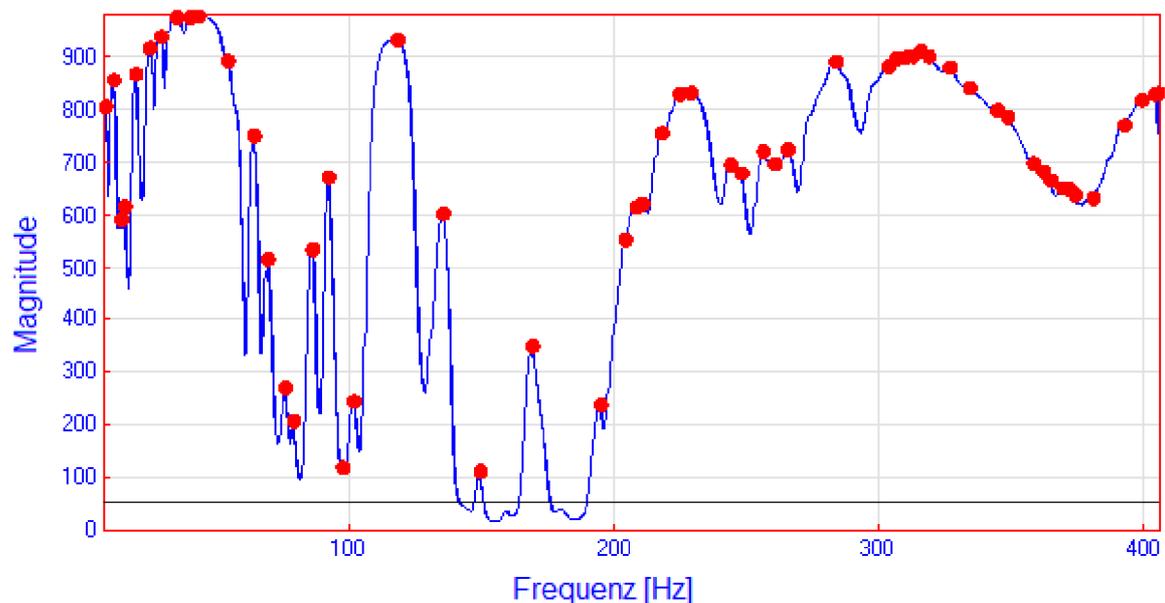


Abbildung 3.8: Mode Indicator Function in 400 Hz Analyse

Nach der Modenanzahlbestimmung kann die Modalparameterabschätzung mittels Orthogonal Polynomial durchgeführt werden. Die Tabelle der Moden mit den Modalparametern steht im Anhang B1 zur Verfügung. Die Gesamtzahl der Moden beträgt 54. Falls alle Modalparameter inkl. Residuen festgestellt sind, wird an eine Validierung der Ergebnisse herangetreten. Dies erfolgt durch ein Synthetisieren der FRF aus der Modalparameterabschätzung. Die synthetisierten Nachgiebigkeitsgänge des Referenz- und p26 Punktes sind in der Abbildung 3.9 bzw. 3.10 dargestellt.

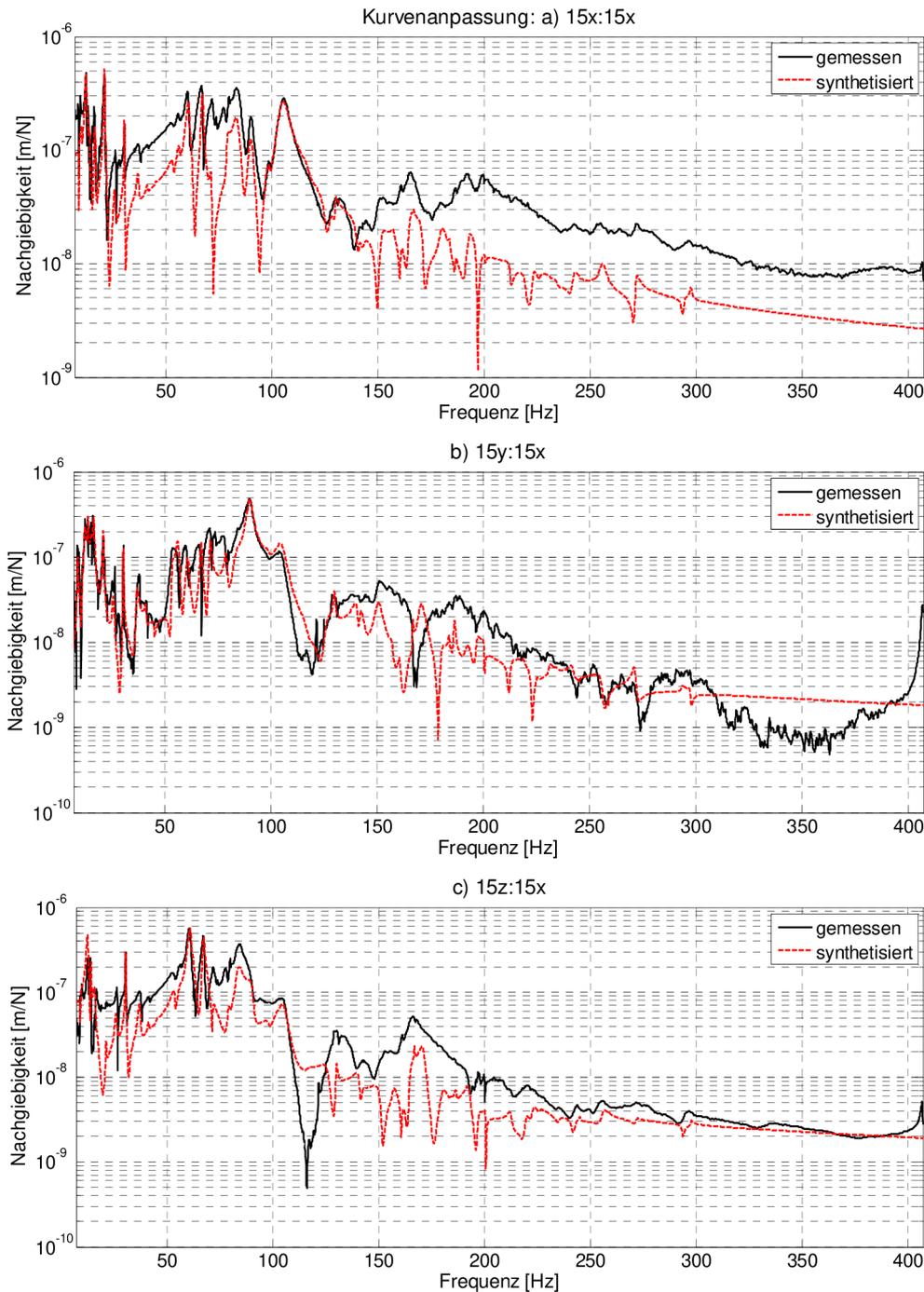


Abbildung 3.9: Kurvenanpassung im p26 auf der Strebe 1; SIMO 400 Hz

Im Referenzpunkt sieht der gemessene Verlauf der Nachgiebigkeit in der X-Richtung befriedigend aus. Das Synthetisieren entspricht jedoch dem gemessenen Verlauf nicht. Bis 30 Hz stimmen die Kurven relativ gut überein. Die Form der Kurven stimmt im 30 - 60 Hz Bereich überein, im Magnitudewert jedoch nicht. Im Bereich von 60 bis 150 Hz wird der beste Einklang in allen FRF für ein paar deutliche Moden (106 Hz, usw.) registriert. Im Bereich von 150 Hz sieht der synthetisierte Nachgiebigkeitsgang falsch aus. In der Y-Richtung, obwohl die gemessene FRF stark verzerrt ist, entspricht die Kurvenanpassung

im Bereich bis 150 Hz teilweise den gemessenen Verlauf. In höheren Frequenzen von 150 bis 300 Hz ist es schwer zu schlussfolgern, ob es sich um die tatsächlichen Moden handelt oder ob es nur um ein Rauschen wegen eines nicht-linearen Verhaltens oder um eine fremde Erregung geht. Also die synthetisierte Z-Koordinate zeigt im höheren Bereich mehr Moden, als gemessen wurden. In der Z-Richtung ist der Einklang insgesamt sehr schlimm. In allen Richtungen war die Orthogonal Polynomial Methode nicht in der Lage, jeden Mode im Bereich von 300 Hz zu entdecken.

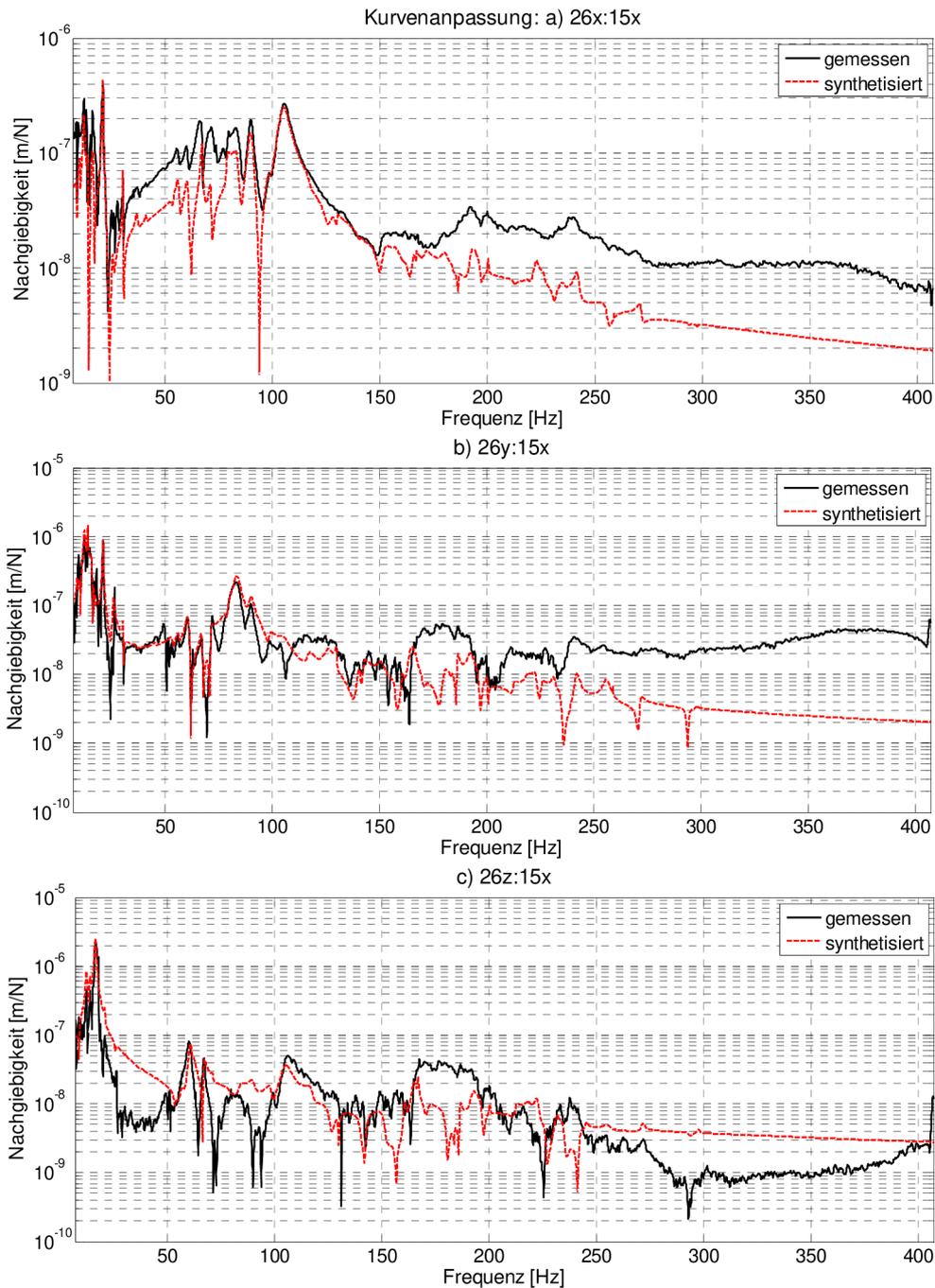


Abbildung 3.10: Kurvenanpassung im p26 auf der Strebe 1; SIMO 400 Hz

Im p26 Punkt weisen die synthetisierten Kurven mehr Moden auf, als in der Struktur wahrscheinlich tatsächlich vorhanden sind. Die Y- sowie Z-Richtung werden, wie vorher erwähnt, stark wegen eines Rauschens verzerrt. Daraus ergibt sich eine niedrige Kohärenz. Dieses Rauschen können die Kurvenanpassungsmethoden mit den tatsächlichen Moden vertauschen und deswegen wird die synthetisierte Kurve von den falschen Moden verzerrt. In allen Punkten der Streben kann man die Tendenz verfolgen, dass die Kohärenz und damit auch das Synthetisieren in den senkrechten Koordinaten zur Erregungsrichtung schlimmer ist. Dies beeinflusst allerdings auch die befriedigenden Nachgiebigkeitsgänge vornehmlich in X-Richtung negativ.

Diese Beeinflussung hängt eng mit der globalen Parameterbestimmung zusammen. Wenn die Kurvenanpassungsmethode im Falle eines starken Rauschens in mehreren FRF falsche Moden (bzw. die Modalparameter) identifiziert, treten diese schlechten Moden in allen anderen FRF auf und zwar auch in der befriedigenden X-Koordinate. Demgegenüber wurden keine markanten Moden im Bereich von 300 Hz entdeckt.

3.3.4 Überprüfung von Voraussetzungen

Für die Überprüfung von Annahmen, die das nicht-lineare Verhalten der Struktur sowie den Einfluss der Erregungsrichtung betreffen, wurden drei Proben durchgeführt.

- *Linearitätstest:*

Dieser Test vergleicht den Verlauf der Nachgiebigkeit im ganzen Frequenzbereich unter zwei verschiedenen Kraftpegeln. Die Bezugsanordnung stellt die Nachgiebigkeit bei einem minimalen merkbaren Kraftpegel dar. Im Vergleich dazu bildet der Nachgiebigkeitsgang bei einem maximalen möglichen Kraftpegel die Vergleichsanordnung ab. Der Vergleich im Referenzpunkt ist in der Abbildung 3.11 zu sehen. Auf den ersten Blick ist die schlechte Übereinstimmung im ganzen Frequenzbereich vor allem bis 60 Hz und allgemein in der Y-Richtung zu bemerken.

Diese Abweichungen von der Linearität können mehrere Gründe haben:

- Reibung, vor allem in den Kontaktflächen
- Spiel in verschiedenen Elementen, zum Beispiel in Verbindungen (lockere Schrauben bzw. schlecht vorgespanntes Kugelgewinde usw.)

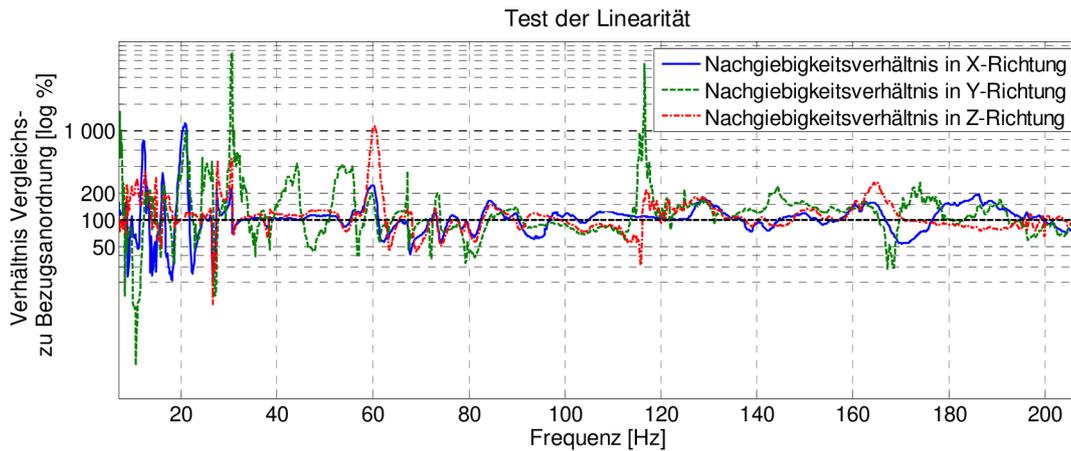


Abbildung 3.11: Linearitätstest

- Nicht-lineare Elemente wie z. B. Federn, Dämpfer
- Auf der Länge der Strebe kann sich in einem Punkt vernachlässigbare Fehler mehrmals vervielfachen

Es wurde überdies ein ungewohntes Röcheln in der Strebe 1 bei dem maximalen Kraftpegel bemerkt, was eine Störquelle darstellen kann.

- *Einfluss der Erregungsrichtung auf die Kohärenz:*
Der nächste Test sollte die Annahme bestätigen, dass die Kohärenz in den senkrechten Koordinaten zur Erregungsrichtung aufgrund einer schlechten Anregung verursacht ist. Dieser Test sollte eine weitere Konkretisierung des Strukturverhaltens bringen. Es wurden zwei Daten im Referenzpunkt gemessen. Im ersten Fall entsprach die X-Richtung des Beschleunigungssensors der Erregungsrichtung, somit war Y- sowie Z-Richtung des Sensors senkrecht auf der Erregung. Im zweiten Fall wurde der Sensor in X- und Y-Richtung um 45 Grad relativ zum ersten Fall gedreht. Die resultierende Kohärenz in allen Richtungen ist in der Abbildung 3.12 gezeigt. Aus dem Vergleich ist die erhebliche Verbesserung in Y-Richtung offensichtlich. Dies bestätigt also die Vermutung, dass es in Y-Richtung der ersten Testmessung zur schlechten Anregung der Struktur kommt. In Z-Richtung betrachtet man solches Verhalten allerdings nicht. Man kann jedenfalls die Schlussfolgerung ziehen, dass das direktionale (orthogonale) Verhalten in der Struktur (vor allem in der horizontalen Richtung) vorkommt.

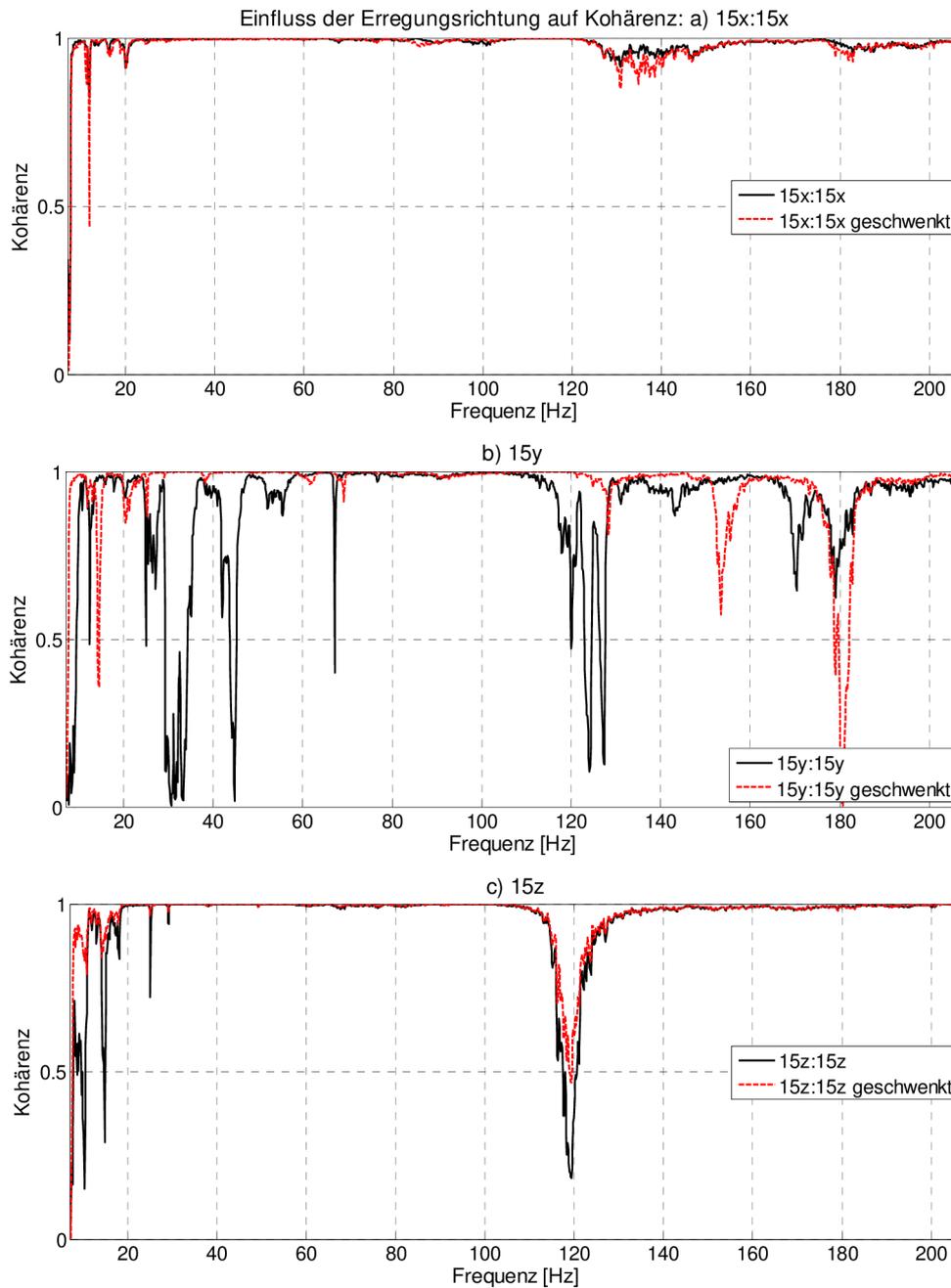


Abbildung 3.12: Einfluss der Erregungsrichtung auf die Kohärenz

– Test der Reziprozität:

Eine von den Anforderungen an die untersuchte Struktur ist die Reziprozität (Kapitel 1). Die FRF zwischen zwei Punkten sollte gleich sein, egal in welchem Punkt die Erregung wirkt. Die Abbildung 3.13 zeigt die Nachgiebigkeitsgänge zwischen dem p15 Punkt auf der Spindel und dem p84 Punkt auf dem Tisch. Das prozentuale Verhältnis ist ebenfalls abgebildet. Im Grunde genommen ist die Bedingung der Reziprozität erfüllt. Die Anregung der Struktur im p84 Punkt wird sehr gestört,

deswegen ist die FRF verzerrt und die Ergebnisse überzeugen auf dem ersten Blick nicht.

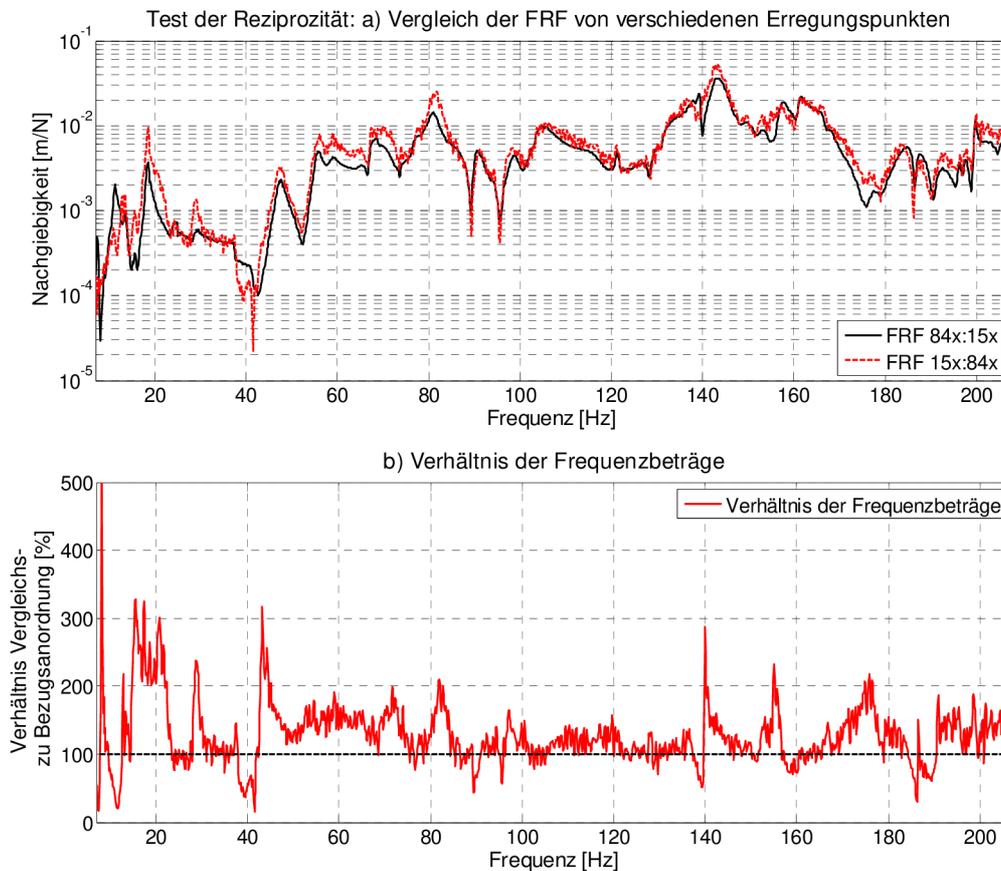


Abbildung 3.13: Test der Reziprozität

3.3.5 Zusammenfassung der 400 Hz Analyse

Die Glaubhaftigkeit der Ergebnisse ist zweifelhaft. Die Kohärenzverläufe sowie die Kurvenanpassung sind unbefriedigend. Die möglichen Gründe dafür sind:

- Struktur ist nicht-linear
- Messungen wurden durch unerwünschtes Rauschen von äußeren Quellen (Maschinen usw.) beeinflusst
- Struktur weist ein deutlich direktionales Verhalten auf bzw. die direktionalen Moden, die in der Y-Richtung ungenügend angeregt werden
- Mögliche Rückkoppelung des Shakers kann als weitere nicht durch die Sensoren aufgezeichnete Erregung wirken und somit eine Verzerrung der FRF verursachen

- In höheren Frequenzen sind die Moden sehr undeutlich, und somit ist die FRF für die Verzerrung aufgrund des Rauschens anfälliger [3]

Eine Optimierung bzw. Lösung der oben genannten Probleme könnte man im Rahmen einer SIMO-Analyse durch folgende Änderungen erreichen:

- Um einer möglichen Anregung des nicht-linearen Verhaltens vorzubeugen, sollte der Kraftpegel herabgesetzt werden
- Der untersuchte Frequenzbereich sollte wegen des oben genannten Grundes auf 200 Hz eingeschränkt werden. Dies kann auch das mögliche Rauschen in FRF vermindern [3]
- Messungen sollten in absoluter Ruhe erfolgen, um äußere Störquellen zu unterdrücken

3.4 Optimierung - 200 Hz Analyse

Diese Analyse beachtet die im vorigen Kapitel angeführten Vorschläge zum Zweck der Gewinnung von hochwertigen Daten, um die Aspekte der SIMO-Analyse gut zu beschreiben. Der Kraftpegel sowie der untersuchte Frequenzbereich wurden vermindert und die Messungen wurden in absoluter Ruhe durchgeführt.

3.4.1 Parameter der 200 Hz Analyse

Bei der 200 Hz Analyse wurde die gleiche Messtechnik, die in der Tabelle 3.1 aufgeführt ist, verwendet. Der untersuchte Frequenzbereich war von 7 bis 207 Hz, wobei die Anzahl von Spektrallinien 1600 betrug und somit die Frequenzauflösung und Zeit der Sequenz gleich wie in der 400 Hz Analyse bleiben. Das Erregungssignal bleibt ohne eine Änderung.

Die zusammengefassten Angaben:

<i>Frequenzbereich:</i>	200 Hz (von 7 bis 207 Hz)
<i>Anzahl von Spektrallinien:</i>	1600
<i>Frequenzauflösung:</i>	0,125 Hz
<i>Erregungssignal</i>	Burst Random (2/6)
<i>Zeit der Messung</i>	8 s
<i>Mittelungen</i>	40-mal

Bei den 200 Hz Messungen waren alle anderen Maschinen nicht im Betrieb. Das Fundament war völlig funktionsfähig. Der Kraftpegel des Shakers wurde absichtlich auf dem niedrigsten möglichen Wert gehalten, um die Störung mittels der Rückkoppelung und das nicht-lineare Verhalten zu vermindern. Die einzige merkbare Störquelle war der Lüfter. Der vom Lüfter herausgebrachte Schall wird als einen Hochfrequenzschall geschätzt, deswegen sollte sich die Störung der Messung bis 207 Hz nicht erheblich auswirken. Die Anzahl der Mittelungen zeigte sich in der 400 Hz Analyse als genügend, da eine Erhöhung der Anzahl keine merkbare Verbesserung der Frequenzgänge brachte. Deswegen wird die gleiche Mittelungszahl in der 200 Hz Analyse angewendet.

3.4.2 Gemessene Daten

In der Abbildung 3.14 sind die Nachgiebigkeitsgänge und Kohärenz im Referenzpunkt dargestellt, die unter neuen Bedingungen gewonnen wurden. Auf dem ersten Blick ist eine deutliche Verbesserung der Kohärenz in Y- sowie Z-Richtung zu sehen. Die Verläufe der Nachgiebigkeit sind befriedigend glatt und ohne ein großes Rauschen in der ganzen Frequenzbreite.

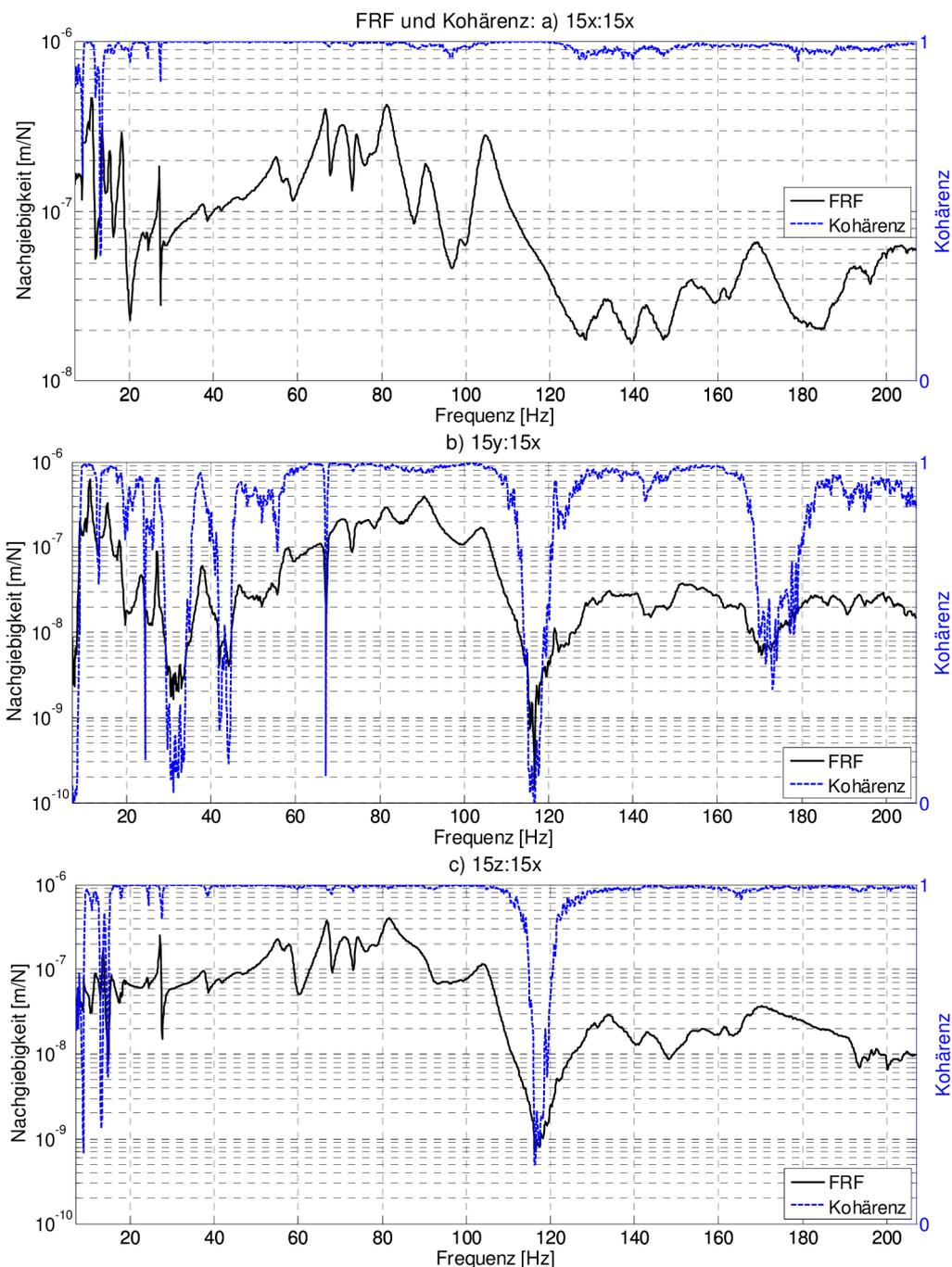


Abbildung 3.14: Nachgiebigkeit und Kohärenz im Referenzpunkt; SIMO 200 Hz

Die Kohärenz stürzt nur im Bereich der Antiresonanz erheblich, was ein erwartetes Verhalten laut [3] in manchen Fällen ist. Trotzdem ist die X-Kohärenz in den Antiresonanzen völlig in Ordnung. In den senkrechten Koordinaten zur Erregungsrichtung prägt sich die Antiresonanz anders aus. Es gibt einen plötzlichen Zusammenbruch der Kurve, als ob die Signalübertragung zwischen dem Eingang und dem Ausgang verloren wird. Dieses Verhalten weist auf eine ungenügende Erregung in der gegebenen Richtung hin. Die Moden sind im ganzen X-Frequenzbereich markant und ohne Rauschen.

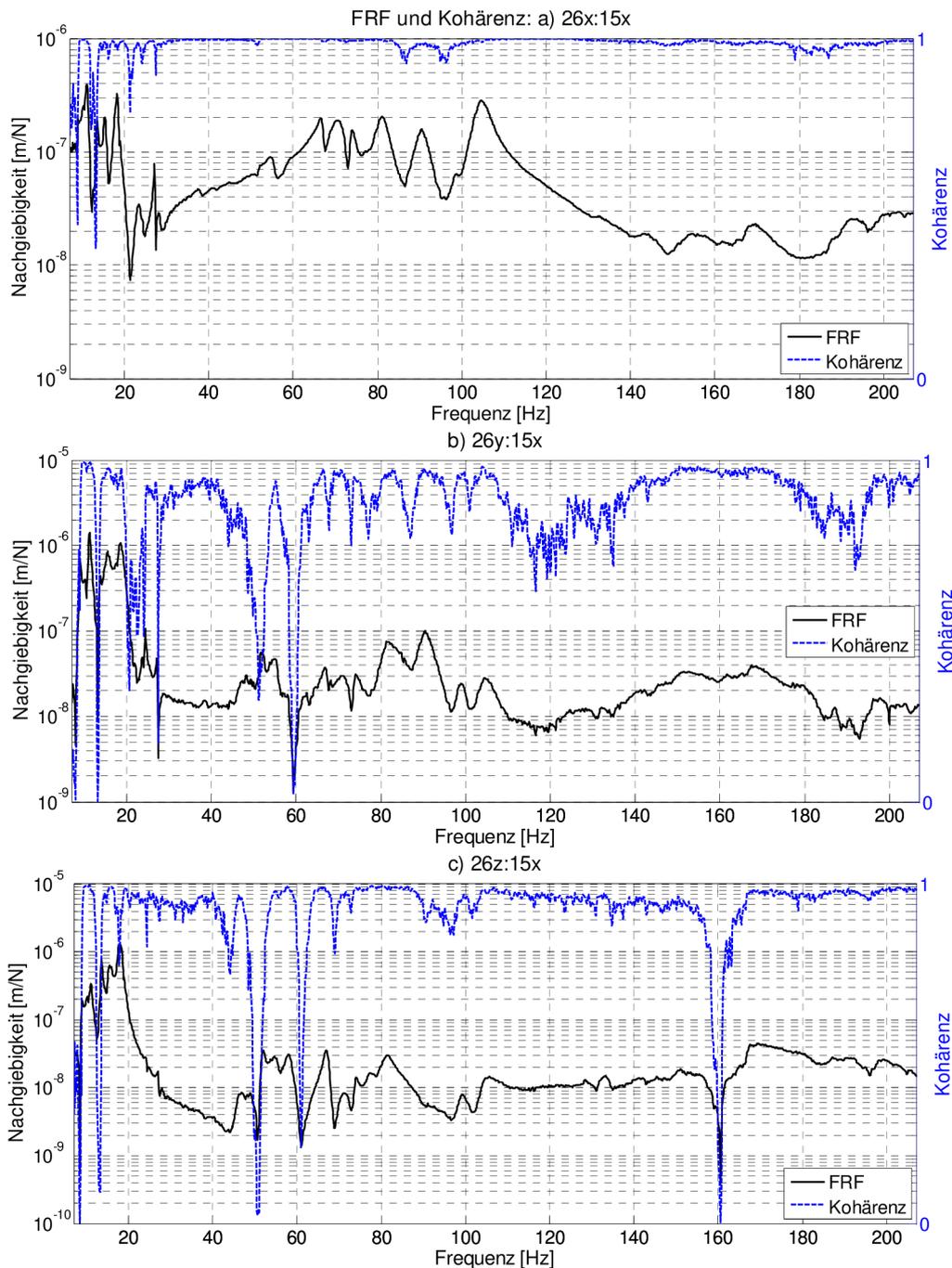


Abbildung 3.15: Nachgiebigkeit und Kohärenz im p26 auf der Strebe 1; SIMO 200 Hz

Die vorgeschlagene Beschränkung von äußeren Störungsquellen sowie die Minderung des Kraftpegels brachten eine merkbare Verbesserung. Daraus kann man schließen, dass der höhere Kraftpegel ein nicht-lineares Verhalten anregt. Die günstige Einstellung des Kraftpegels ist also vor der Messung immer zu finden.

Die Abbildung 3.15 zeigt die Nachgiebigkeitsgänge in allen Koordinaten des zweiten Demonstrationpunktes, also p26. Hier kann man eine markante Verbesserung der Verläufe vor allem der Kohärenz im Vergleich zur 400 Hz Analyse betrachten. In Y-Richtung sind die Werte der Kohärenz nicht so befriedigend. Die Kohärenz ist etwas schlechter auch in den Bereichen ohne Antiresonanz, deswegen ist dieses Verhalten in einer idealen Messung unerwartet. Zur schlechten Anregung der Y-Richtung sollte man auch die Möglichkeit des nicht-linearen Verhaltens zurechnen, da dieses Verhalten unbedingt nach der Verminderung des Kraftpegels nicht verschwindet muss. Der Charakter der Struktur bleibt gleichförmig, also ist z. B. ein Spiel in der Verbindung stets vorhanden. Dank der niedrigeren Ausschlagamplitude wird allerdings ein solches Verhalten unterdrückt. Dieser beschriebene Verlauf der Kohärenz wird in mehreren FRF auf den verschiedenen Punkten der Streben betrachtet. Dafür sind die Verbindungen zwischen den Streben und der Spindel vermutlich verantwortlich (nicht-lineares Verhalten). Eine merkbare äußere Störung entweder durch die Rückkoppelung des Shakers oder durch den Betrieb der anderen Maschinen wurde nicht aufgezeichnet, deswegen sollte das Rauschen ausschließlich durch die oben genannten Gründe verursacht werden. Eine versteckte Störung kann man allerdings nicht ausschließen. Die Bedingungen der FFT wurden durchlaufend kontrolliert und es wurde keine gewichtige Verletzung des Signales (Periodizität usw.) aufgezeichnet.

3.4.3 Bestimmung der Modalparameter

Die Auswertung der gemessenen Daten erfolgte bei der 200 Hz Analyse sorgfältiger als bei der 400 Hz Analyse, um keine unerwünschten Fehler einzutragen. Dennoch wurden die gleichen Auswertungsmethoden wie bei der vorigen Analyse angewendet.

Wegen der korrekten Modenanzahlbestimmung wurde das FRF-Set ausgesondert. Die im ganzen Frequenzbereich falschen FRF wurden vernachlässigt, so dass nur die hochwertigen Daten mittels MIF ausgewertet wurden. Diese Maßnahme hatte zur Folge, die Notwendigkeit der Glättung von FRF („Smooth“ Funktion, siehe 3.3.3) wegen des Rauschens zu vermindern. Die endgültige MIF ist in der Abbildung 3.16 zu sehen. Die roten Punkte bezeichnen die abgeschätzten Moden.

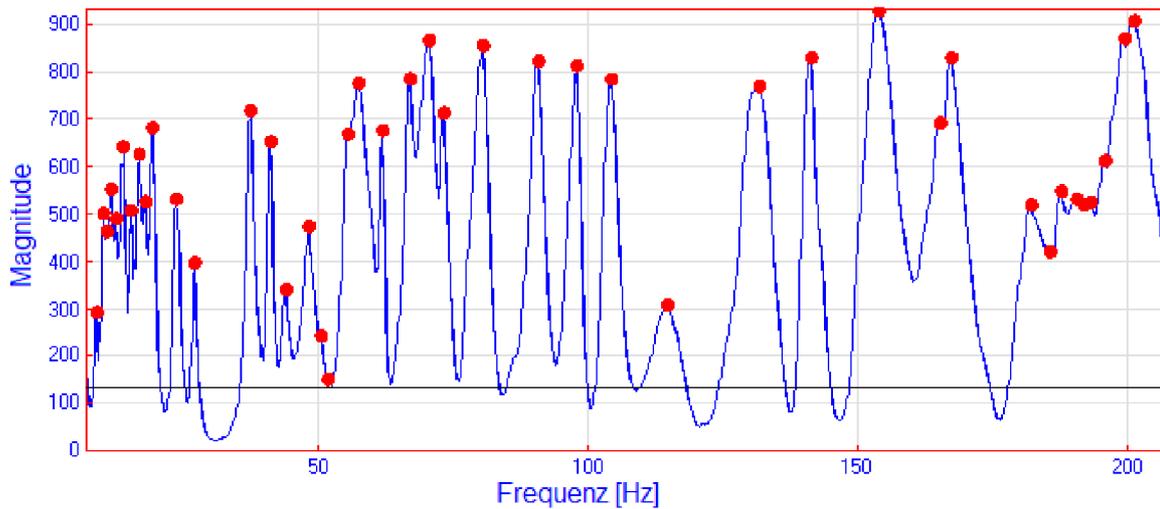


Abbildung 3.16: MIF in 200 Hz Analyse

Bei der Modalparameterabschätzung wurde die Sortierung der Daten verwendet. Der Frequenzbereich wurde in fünf kleinere Bereiche von je 40 Hz geteilt. Für jeden Bereich wurden die schlechtesten FRF aussortiert und nachfolgend die Modalfrequenz sowie Modaldämpfung bestimmt. Die Gewinnung der Residuen erfolgte schon für alle Daten. Die Parameterabschätzung wurde in kleineren Frequenzbändern ausgeführt, um eine möglichst genaue Abschätzung zu erreichen. Die Auswertung wurde mehrmals wiederholt. Die endgültigen Ergebnisse sind im Anhang B2 vorhanden. In der Tabelle 3.2 sind die Moden von 50 bis 110 Hz dargestellt. Diese Moden wurden als die besten bewertet, da sie in allen Messungen mit kleinen Abweichungen auftraten. Sie sind nicht so empfindlich gegen die Einstellung der untersuchten Frequenzbreite. Die Moden in niedrigen sowie höheren Frequenzen ändern sich deutlich je nach dem untersuchten Frequenzband.

Tabelle 3.2: Auswahl der besten Moden in der SIMO 200 Hz Analyse

Nummer	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]	Nummer	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]
16	55,3	1,56	22	73,8	0,461
17	58,0	1,85	23	81,3	1,57
18	62,4	0,827	24	90,4	1,22
19	67,1	0,689	25	98,6	1,04
20	70,5	2,52	26	105,0	1,87
21	73,0	0,749			

In der Abbildung 3.17 ist die Kurvenanpassung für den Referenzpunkt abgebildet. Auf dem ersten Blick scheint das Synthetisieren der Nachgiebigkeit aus den Modaldaten für 200 Hz SIMO-Analyse solider als in der 400 Hz Analyse.

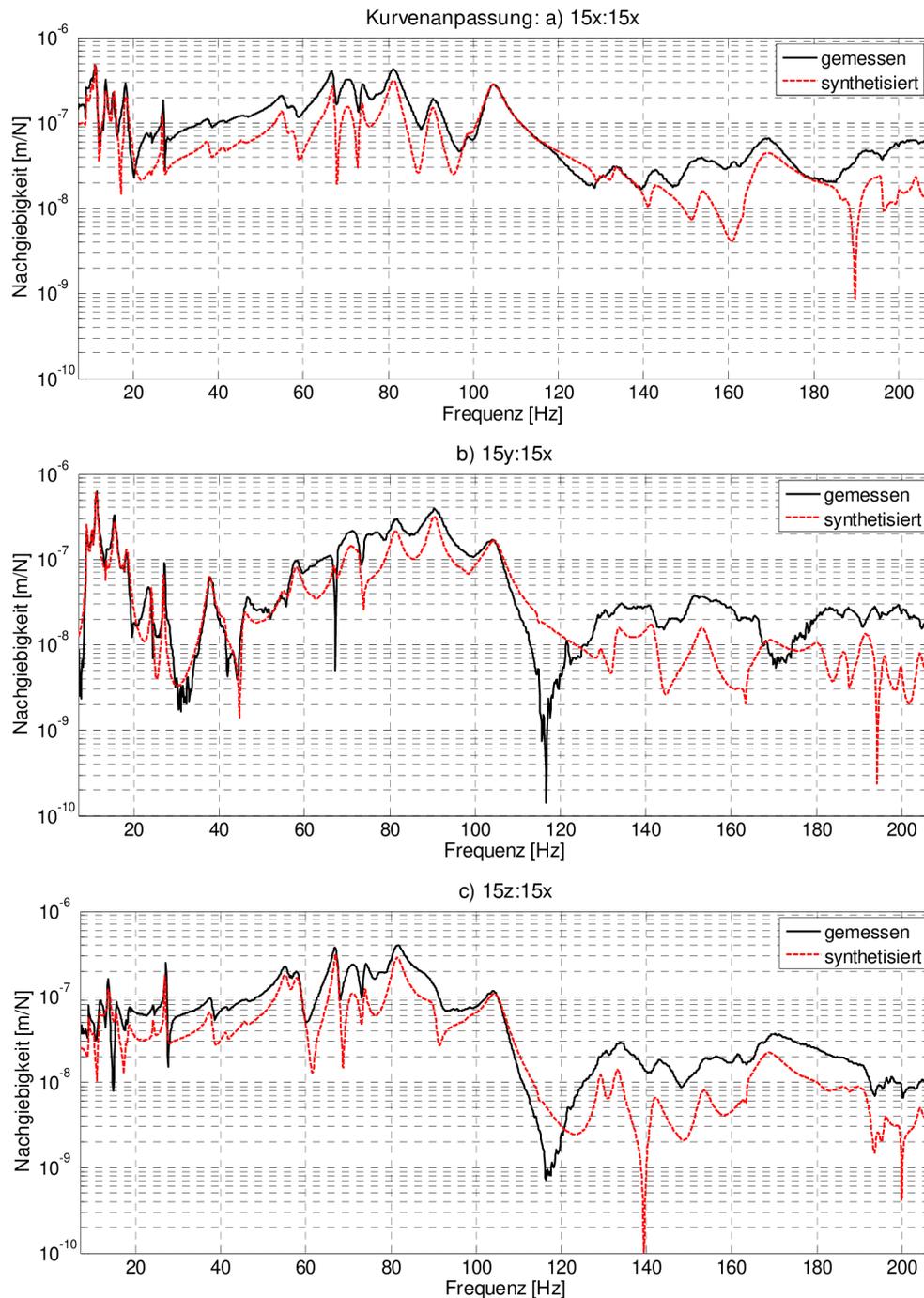


Abbildung 3.17: Kurvenanpassung im Referenzpunkt; SIMO 200 Hz

Bis 20 Hz entspricht die Kurvenanpassung der Messung fast perfekt. Im Bereich bis 50 Hz stimmt die Form der Kurven überein. Die Residuen der Moden wurden jedoch manchmal schlecht ermittelt, deswegen ist die Magnitude etwa niedriger. Vermutlich sind daran Spie-

le bzw. Reibung in der Struktur schuld, dass sie ein nicht-lineares Verhalten verursachen. Von 50 bis 110 Hz ist die Kurvenanpassung konsistent und relativ befriedigend. Die Moden sind deutlich und fast in allen FRF bemerkbar und stabil, wie bereits erwähnt. Das Synthetisieren der Nachgiebigkeitsgänge in den senkrechten Koordinaten zur Erregung ist merklich besser, was in der 400 Hz Analyse ein Problem war. In diesem Bereich sind nur die Werte der Residuen zwischen den Gipfeln ein Problem. Die Residuen passen auf den Gipfeln allerdings ziemlich gut.

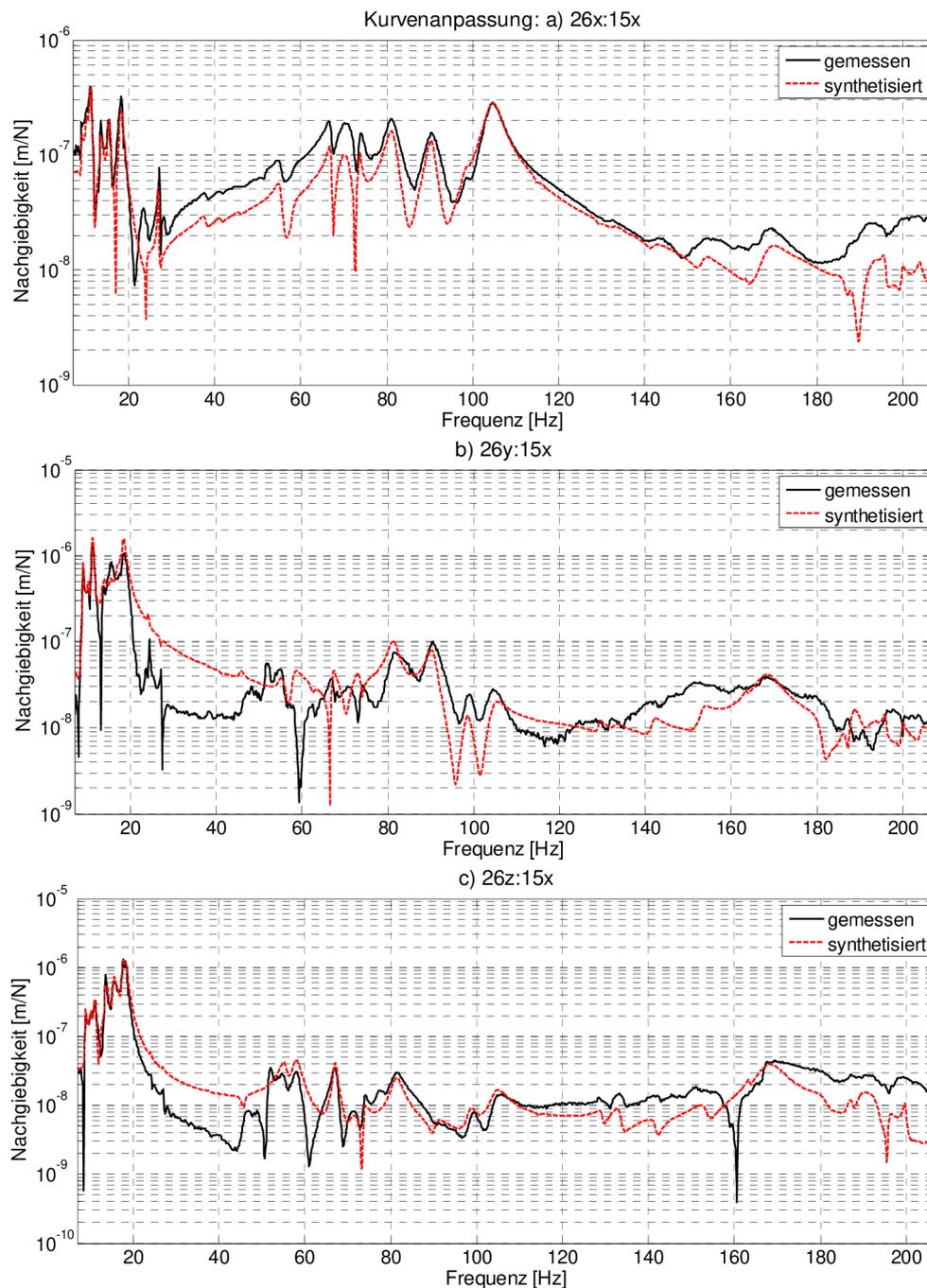


Abbildung 3.18: Kurvenanpassung im p26 auf der Strebe 1; SIMO 200 Hz

In den höheren Frequenzen (von 120 Hz) entsprechen die abgeschätzten Modalfrequenzen den gemessenen Frequenzen gut. Der Einklang der Modaldämpfung ist schwer zu bewerten, aber die Residuen sind hauptsächlich in Y- sowie Z-Richtung unangemessen. Die Modenanzahl erscheint vernünftig. Es gibt keine merklich überflüssigen Moden in der Abschätzung, die durch ein Rauschen verursacht sind wie bei der 400 Hz Analyse. Die Maßnahmen zur Reduzierung des Rauschens waren somit erfolgreich.

Im p26 Punkt (Abb. 3.18) kann man eine deutliche Verbesserung der Kurvenanpassung in Frequenzen bis 20 Hz und im Bereich von 50 bis 140 Hz bemerken. Während die Anpassung im Bereich von 20 bis 50 Hz im Vergleich zum Referenzpunkt schlechter ist, kann man eine Verbesserung in der Abschätzung von Residuen in Frequenzen von 130 Hz sehen. In der Gesamtheit ist es möglich, eine Scheinunterlassung einiger Moden im Synthetisieren (z. B. Y-Richtung um 25 Hz) zu bemerken. Diese Moden sind allerdings im Modenverzeichnis (Anlage B2) vorhanden. Dies hängt mit der schlechten Abschätzung von Residuen zusammen. Eine mögliche Ursache liegt in der FRF des Referenzpunktes. Die Residuen werden mittels der Formel 2-6 bestimmt. Falls der Gipfel des Modes in der FRF des Referenzpunktes nicht deutlich bemerkbar ist, beeinflusst diese Tatsache die Ermittlung des Modes in den anderen FRF, auch wenn die Bestimmung der Residuen in lokaler Weise erfolgt. Der Grund der Absenz des Modes im Referenzpunkt kann mehrere Gründe haben: Z. B. kann es sich um die schlechte Anregung der Struktur oder um einen Knotenpunkt der Struktur für manche Moden handeln. Ein bemerkbarer Mode nur in einer FRF bedeutet allerdings nicht, dass die anderen FRF schlecht angeregt sind. Dieser Mode kann einen lokalen Charakter haben. Alle anderen FRF verhalten sich ähnlich wie im p26 Punkt. Die FRF in den senkrechten Koordinaten zur Erregungsrichtung sind nicht so konsistent jedoch besser als in der 400 Hz Analyse.

3.4.4 Modenformen

Folgendes Kapitel stellt die Modenformen kurz vor. Zu einer Demonstration werden zwei Moden mit möglichst gleichen Frequenz- sowie Dämpfungsabschätzungen in beiden SIMO-Analysen ausgewählt. Erster Mode liegt im Bereich der besten Moden, wo das Synthetisieren überwiegend erfolgreich war. Die in der Abbildung 3.19 dargestellten Moden sind fast identisch, obwohl die Ergebnisse der 400 Hz Analyse nicht so befriedigend sind. Das Maß der Strukturdiskretisierung scheint zu genügen, obwohl noch einige Punkte auf den Streben in der Nähe der Gelenke zugunsten der Bewegungsbeschreibung wären. Dies ist jedoch nicht möglich, da das Gelenk von beiden Seiten gedeckt ist.

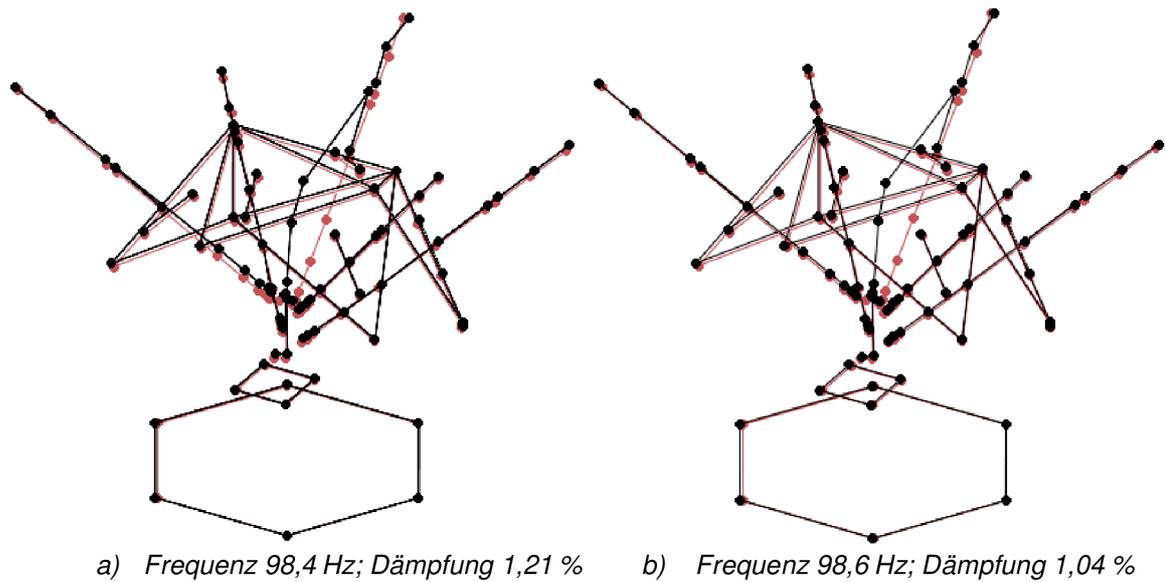


Abbildung 3.19: 98 Hz Modenformen der a) 400 Hz Analyse b) 200 Hz Analyse

Der zweite Mode liegt bei 200 Hz. Die Frequenz- sowie Dämpfungsabschätzungen stimmen ziemlich überein, dennoch gelang die Kurvenanpassung nicht. Aus der Abbildung 3.20 ist klar zu sehen, dass die Modenformen deutlich unterschiedlich sind. Weil die Residuenabschätzung in beiden Analysen nicht angepasst wurde, kann man nicht sagen, ob eines der Ergebnisse der Realität entspricht.

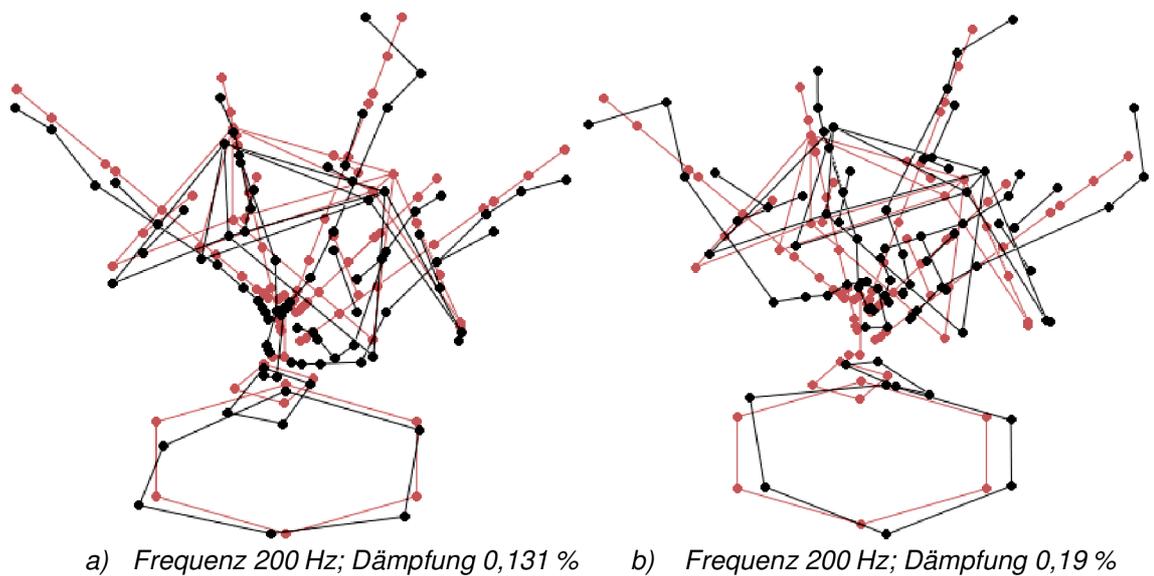


Abbildung 3.20: 200 Hz Modenformen der a) 400 Hz Analyse b) 200 Hz Analyse

3.5 Zusammenfassung der SIMO-Analyse

Es wurden zwei SIMO-Analysen unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Die konkreten Ergebnisse der Analysen wurden ausführlich besprochen und dargestellt. Für die weitere Verwendung der SIMO-Analyse wird im Rahmen der Masterarbeit allerdings nur die 200 Hz Analyse besprochen. Bei dieser Analyse wurden die besten Daten erhalten, deswegen werden die eigentlichen Aspekte der SIMO-Analyse besser beschrieben.

Zu den negativen Einflüssen auf die Kohärenz und den Verlauf der Nachgiebigkeit gehören:

- Störung von Umgebung
- Ungenügende Anregung der zur Erregungsrichtung senkrechten Koordinaten
- Anregung des nicht-linearen Verhaltens mit dem hohen Kraftpegel
- Nicht aufgenommene Erregung der Struktur z. B. durch die Rückkoppelung des Shakers bei hoher Kraftamplitude

Die Grundsätze der Messung sowie der Auswertung, die man berücksichtigen muss, kann man in den folgenden Punkten zusammenfassen:

- Messung im Stillstand
- Ermittlung der günstigen Kraftamplitude
- Sortierung der FRF bei der Auswertung

Die erhaltenen Ergebnisse sind aus folgenden Gründen befriedigend:

- Modalfrequenzen und Modaldämpfung erreichen hauptsächlich im Bereich von 50 bis 110 Hz vernünftige Werte, die vermutlich der Wirklichkeit entsprechen
- Bis 140 Hz ist die Kurvenanpassung entgegen dem nicht-linearem Verhalten befriedigend
- Gute Kohärenz wurde in fast allen Messungen erreicht
- Kohärenz ist in den von der Erregungsstelle fernliegenden Punkten besser, als erwartet wurde

Die offensichtlichen Mängel der SIMO-Analyse auf der bestehenden Maschine sind:

- Schlechte Anregung der Struktur in anderen Richtungen als in der Erregungsrichtung. Somit kann man nicht die orthogonalen Moden entdecken
- Unmöglichkeit einer besseren Kurvenanpassung in höheren Frequenzen, bzw. einer Modalparameterabschätzung (in höheren Frequenzen wurden de facto keine Moden entdeckt)

4 Vorgehen bei einer MIMO-Analyse

Im Kapitel sind alle Schwierigkeiten erwähnt, die mit der Inbetriebnahme der MIMO-Analyse an der TU-Chemnitz in Zusammenhang standen. Die Einstellung der Messtechnik sowie der Auswertungssoftware werden im Kapitel ausführlich beschrieben.

4.1 Technik

Der Überblick der bestehenden Messtechnik, die an der TU-Chemnitz zur MIMO-Analyse vorhanden ist, steht in der Tabelle 4.1 zur Verfügung.

Tabelle 4.1: Bestehende Messtechnik für MIMO-Analyse

Gerät	Typ
FFT-Analysator	B&K 3035 + 7540A
Leistungsverstärker + Energieversorgung	LDS PA1200 + FPS12
Schwingerreger (Shaker)	LDS V555, M6-CE
3x Beschleunigungssensor	B&K 4506B
Kraftsensor im Zusammenwirken mit einem Ladungswandler + für die MIMO-Anwendung	B&K 8201 + 2647A
Leistungsverstärker	B&K PA2707
Schwingerreger	B&K 4801 + Head 4812
Kraftsensor	B&K 8230-002

Wie man in der Tabelle 4.1 sehen kann, ist das die gleiche Ausstattung, wie in der SIMO-Analyse jedoch um einen Shaker, einen Leistungsverstärker sowie ein Kraftsensor erweitert.



Abbildung 4.1: FFT-Analysator mit dem hervorgehobenen Signalgenerator

Die Einstellung des Leistungsverstärkers wurde vom Manual [31] übernommen. Der verwendete FFT-Analysator ist in der Abbildung 4.1 abgebildet. Was die Analysatoreingänge betrifft, passt die Anzahl dem Bedarf. Der Analysator besitzt 11 Eingänge, was exakt für 3x3 Eingänge von Beschleunigungssensoren und zwei Kraftsensoren reicht. Es ist allerdings nur ein Ausgang für einen Signalgenerator vorhanden. Auf dieses Problem wird im folgenden Kapitel eingegangen. Die Anordnung des Versuchstandes für den Bedarf der MIMO-Analyse kann man in der Abbildung 4.2 betrachten. Die Lage des zweiten Referenzpunktes wurde aus dem letzten Experiment übernommen.



Abbildung 4.2: Anordnung zur Messung einer MIMO-Analyse

Im Pulse 15.1 kommen keine grundsätzlichen Änderungen vor. Mit einem Beifügen des zweiten Shakers in der graphischen Schnittstelle, dessen in gleicher Weise wie im SIMO-Fall erfolgt, stellt sich das Programm nach der Initialisierung automatisch auf eine MIMO-Analyse um. Wegen der Absenz des zweiten Signalgeneratorsausganges ist es nötig, einen Trigger einzustellen. Dies wird im folgenden Kapitel ausführlicher beschrieben. Eine letzte Änderung im Vergleich zur SIMO-Handhabung tritt in der Umschaltung zwischen den durchlaufend gemessenen Übertragungsfunktionen bzw. der Kohärenz auf. Die Funktionen werden manuell durch ein „Properties“ Menu umgeschaltet. In der Abbildung 4.3 ist dieser Vorgang klar dargestellt.

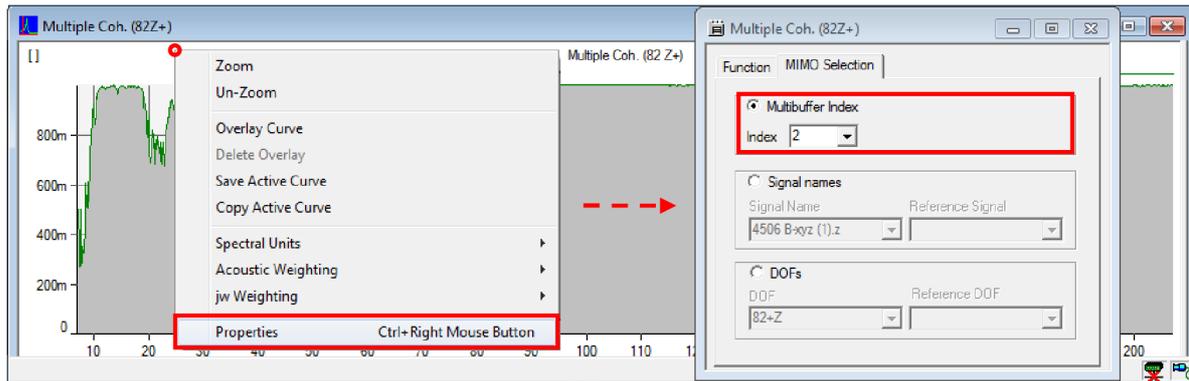


Abbildung 4.3: Umschaltung zwischen den durchlaufend gemessenen Daten

4.2 Unabhängigkeit der Eingänge

Laut dem Kapitel 2.3.2 sind zwei einander unabhängige Eingänge zur korrekten Durchführung einer MIMO-Analyse unvermeidlich, damit die Matrix des H_T -Kalkulators lösbar wird. Beim bestehenden Analysator entsteht mit dieser Bedingung ein Problem, da nur ein Signalgenerator für einen Schwingerreger vorhanden ist. Im Rahmen der Masterarbeit wurden allerdings zwei andere Einstellungen der Signalverteilung entworfen und überprüft.

- T-Stück als ein einfacher Signalverteiler:
Die erste Möglichkeit beruht auf der Verwendung des T-Stückes, das das Signal des Signalgenerators gleichmäßig zu beiden Schwingerregern verteilen würde. Eine Voraussetzung ist, dass es im Laufe der Signalübertragung zu einer Verzerrung kommt und die Endsignale unabhängig werden. Dies bestätigte sich allerdings nicht. Die Abhängigkeit zwischen den Signalen ist in der Abbildung 4.4 abgebildet.
- Ein externer Signalgenerator:
Die zweite Einstellung rechnet mit der Anwendung eines komplett unabhängigen Signals, welches durch den externen Rechner mittels LabVIEW Software generiert wird. Als eine Zusatzausstattung muss noch ein A/D Wandler eingebaut werden. Die Parameter der beiden Signale sind identisch. Die Struktur des Programms ist in der Abbildung 4.5 gezeigt und steht im elektronischen Anhang zur Verfügung. Diese Einstellung brachte die erwarteten absolut getrennten Eingänge. Die leichte Abhängigkeit (Abb. 4.4) zwischen den Eingängen wird wahrscheinlich durch die Beeinflussung der beiden Schwingerreger mittels der Struktur verursacht.

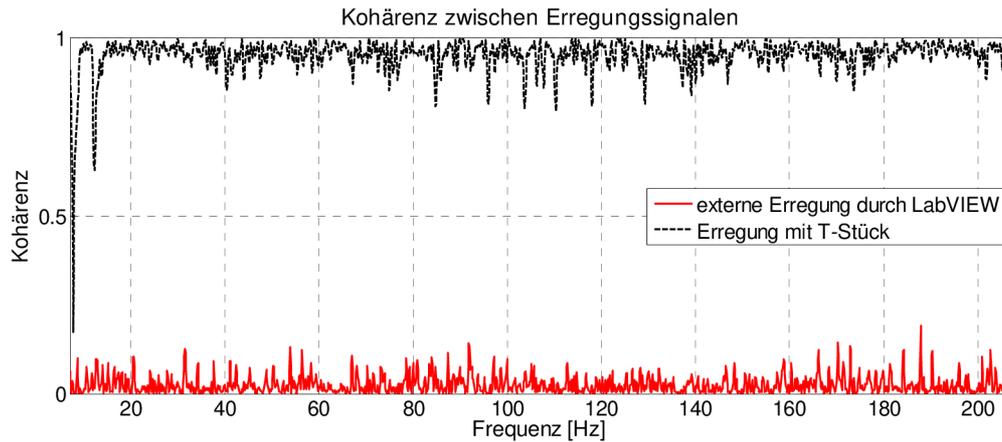


Abbildung 4.4: Kohärenz zwischen Erregungssignalen

Diese Einstellung ist allerdings anspruchsvoller auf die Bedienung, da es sich um zwei getrennte Rechner ohne eine zusätzliche Datenübertragung handelt. Dazu wird eine möglichst synchronisierte Einschaltung der Signale für das korrekte Abklingen in der gemessenen Zeitperiode erforderlich. Für eine Lösung des entstandenen Problems muss man zwischen dem Start der Messung und dem Anschalten des Shakers unterscheiden. Bei der SIMO-Analyse wurden die Messung und der Signalgenerator gleichzeitig automatisch mit dem Starttaster ausgelöst. Bei der MIMO-Anordnung wird eine solche Auslösung unmöglich. Von mehreren Lösungsvarianten wurden zwei erfolgreich geprüft:

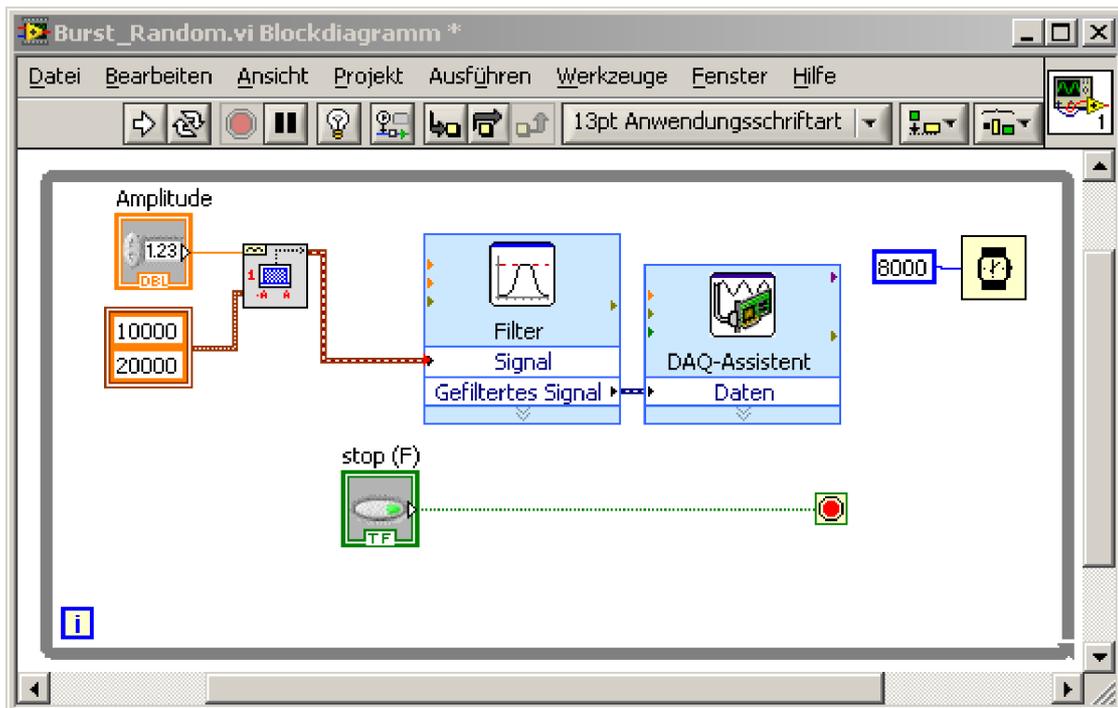


Abbildung 4.5: LabVIEW Programm „Burst Random“

- Nach der Auslösung der Messung wie bei der SIMO Analyse wird möglichst schnell der zweite Shaker eingeschaltet. Solche Lösung ist durch eine ziemlich lange Verzögerung zwischen dem Programmstart und einer physischen Erregereinschaltung gezeichnet. Der Unterschied beträgt in manchen Fällen eine Sekunde. In der Gesamtheit ist solche Auslösung schwierig zu bedienen.
- Die zweite Möglichkeit ist eine Einstellung des Triggers (Abb.4.6) und einer manuellen Erregereinschaltung. Der Trigger funktioniert in folgender Weise: Falls ein definiertes Signal durch den definierten Kraftsensor aufgenommen wurde, löst sich die Messung aus. Die Vorgehensweise ist wie folgt: Auslösung der Messsequenz (wegen der genügenden Initialisierung des Programmes), Einschaltung des zweiten Shakers und somit gleichzeitig der Messung (die Folge der Shakers hängt vom Trigger ab) und anschließend Einschaltung des ersten Shakers. Die Verzögerung wird dank der getrennten Initialisierung vermindert (etwa 0,4 s).

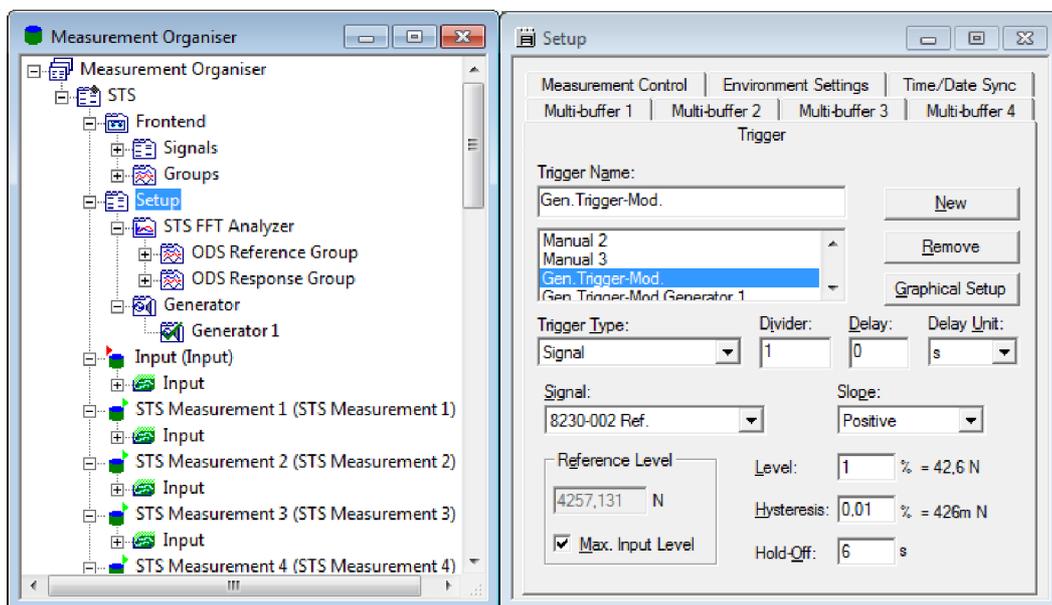


Abbildung 4.6: Signaltrigger zur Zweck der MIMO-Analyse

Das zweite Vorgehen wurde schließlich in der Masterarbeit angewendet. Eine gleichzeitige bzw. bessere Auslösung der Signale wurde bei der bestehenden Ausstattung nicht gefunden. Die PULSE 15.1 Systemeinstellung ermöglichte keine weiteren Verbesserungen des Vorgehens. Trotzdem war entwickelte Einstellung erfolgreich und relativ einfach zu bedienen.

4.3 Einstellung des Kraftpegels

Einer der wichtigsten Aspekte der MIMO-Analyse ist die Einstellung der Kraftpegel beider Shakers. Vor allem im Falle der unterschiedlich leistungsfähigen Schwingererregger ist dieses notwendig. Falls die maximale Kraftamplitude auf beiden Schwingerregger eingestellt ist, kann der resultierende FRF- sowie Kohärenzverlauf ähnlich, wie in der Abbildung 4.7 dargestellt ist, aussehen.

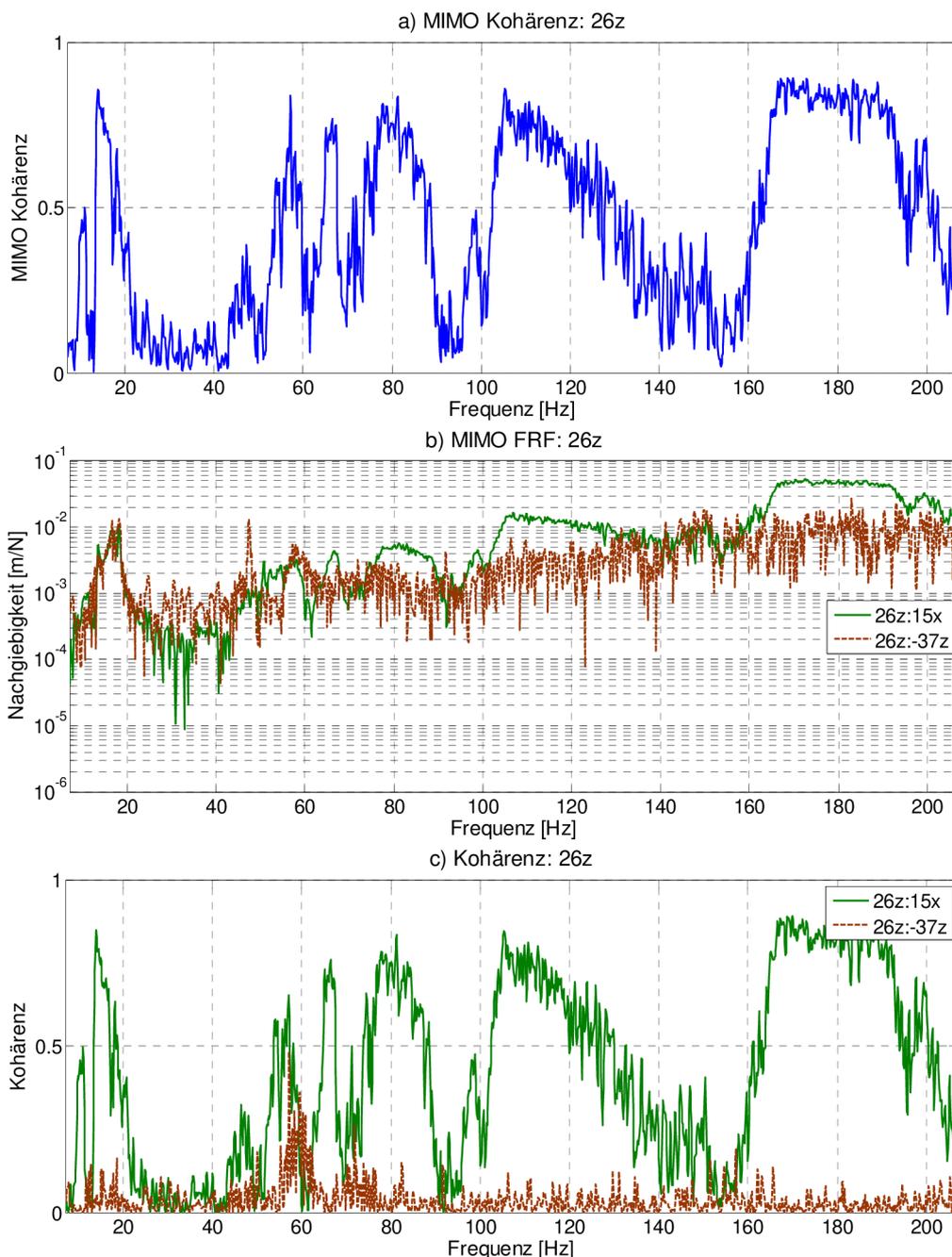


Abbildung 4.7: Kohärenzverläufe und Nachgiebigkeit bei maximalen Kraftamplituden

In diesem Fall ist Shaker 1 etwa zweimal stärker als der Shaker in der Referenz 2. Die FRF bezogen auf die Referenz 2 (Abb. 4.7 b) ist absolut nicht beweiskräftig, weil die vom zweiten Shaker erregte Antwort im entsprechenden Beschleunigungssensor durch das vom ersten Shaker hervorgerufene Signal untergedrückt wird. Andererseits ist die vom ersten Shaker erregte Antwort von dem zweiten Shaker verzerrt, da er nur als ein Rauschgenerator auf dem Sensor bewirkt. Der Vergleich der MIMO-Kohärenz (Abb. 4.7 a) mit der klassischen Kohärenz (Abb. 4.7 c) sagt anschaulich aus, dass die Antwort im p26 Punkt ausschließlich durch die Anregung im Referenzpunkt 1 gebildet wird.

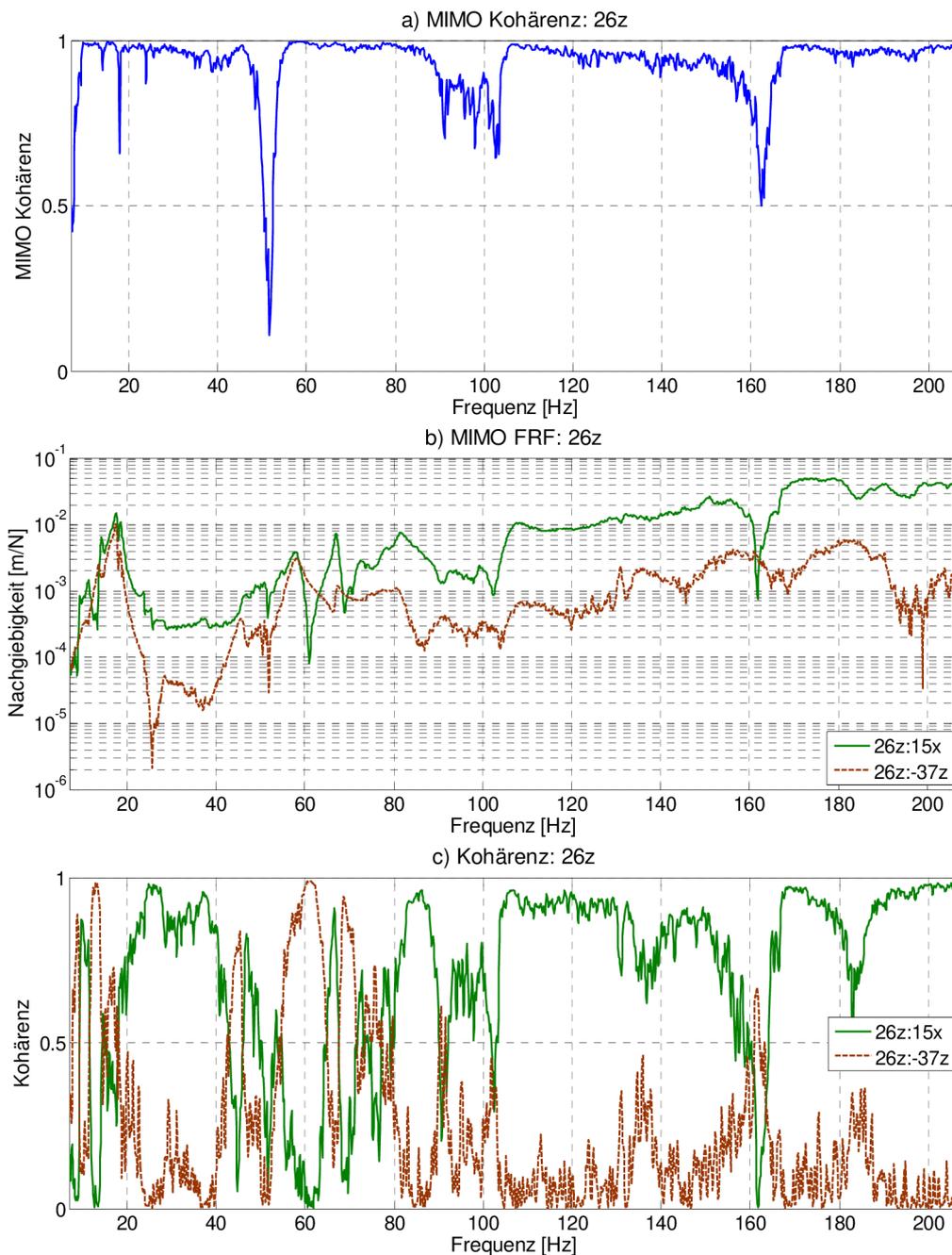


Abbildung 4.8: Kohärenzverläufe und Nachgiebigkeit bei ausgeglichenen Kraftpegeln

Nach einer erheblichen Kraftpegelminderung des ersten Shakers sind die Ergebnisse merklich hochwertiger (Abb. 4.8). Beide Nachgiebigkeitsgänge werden weitaus weniger von dem Rauschen verzerrt. Die Abbildung 4.8 c) also zeigt die markante Verbesserung der auf dem zweiten Referenzpunkt bezogenen Kohärenz. Die MIMO-Kohärenz (Abb. 4.8 a) umfasst dank dieser Maßnahme Signale aus beiden Schwingerregern.

Weiter muss auch die Lage der Sensoren und den Shaker berücksichtigt werden. Der erste Shaker regt zweifellos die Punkte auf den Streben besser an als der Zweite, denn die Kraftübertragung erfolgt durch die Spindel und die Streben. Das Signal vom zweiten Shaker muss durch das Gestell, das Gelenk und schließlich die Streben hindurchgehen. Die höhere Steifigkeit (inverse Nachgiebigkeit) muss zwischen dem zweiten Referenzpunkt und dem p26 Punkt auch berücksichtigt werden. Dies bedeutet also eine schwierigere Anregung vom zweiten Referenzpunkt. Im dargestellten Beispiel wurde Shaker 1 auf den minimalen und Shaker 2 auf den maximalen Kraftpegel eingestellt, damit die besten Ergebnisse erreicht werden. Alle oben erwähnten Aspekte sind bei jeder Struktur zu beachten und die Parameter günstig einzupassen. Es ist beabsichtigt, dass im untersuchten Punkt beide Signale umfasst werden.

4.4 Kurvenanpassung in ME'scopeVES

Der letzte Unterschied zwischen dem SIMO- und MIMO-Vorgehen liegt in den Kurvenanpassungsmethoden in der ME'scopeVES Software. In der Tabelle 4.2 sind die Methoden im Frequenzbereich in der 4.0 sowie 5.0 Version angeführt. Obwohl diese Methoden zur MIMO-Analyse laut [23] geeignet sind, funktioniert nur die grün markierte.

Tabelle 4.2: Methoden der Kurvenanpassung in ME'scopeVES 4.0 und 5.0 [23]

ME'scopeVES 4.0		
Mode Indicator Funktion	Frequenz- & Dämpfungsabschätzung	Residuenabschätzung
MMIF	Ortho Polynomial	Ortho Polynomial
CMIF		
Z-Polynomial (Stability Diagram)		
ME'scopeVES 5.0		
Mode Indicator Funktion	Frequenz- & Dämpfungsabschätzung	Residuenabschätzung
MMIF	Ortho Polynomial	Ortho Polynomial
CMIF		
AF-Polynomial (SD)	AF-Polynomial	AF-Polynomial
Z-Polynomial (SD)		

Alle anderen Methoden weisen falsche Ergebnisse auf. Es wurden drei verschiedene Dateien inkl. einer Demodatei getestet und ME'scopeVES beging die gleichen Fehler. Egal ob das Stabilitätsdiagramm oder die konventionellen Methoden angewendet werden, die Abschätzung von Residuen entspricht nicht den gemessenen Daten. Darüber hinaus detektieren die Stabilitätsdiagramme in ME'scopeVES 5.0 im untersuchten Frequenzbereich im Grunde nur die sogenannten Rechenmoden [23]. Diese Moden besitzen die unreale Werte der Modalfrequenz sowie -dämpfung. Der Grund der Fehler bleibt unbekannt. Die Fehler stammenden aus der möglich fehlerhaften Datei können wahrscheinlich ausgeschlossen werden, da drei ziemlich unterschiedliche Dateien untersucht wurden. Alle Datei wurden auf der verschiedenen Strukturen mit verschiedenen Referenzpunkten gemessen, was eine ausreichende Probe bietet und trotzdem treten die gleichen Fehler in der Residuenabschätzung auf. Alle MIMO-Programmeinstellungen wurden ohne eine positive Änderung überprüft. Als eine letzte Möglichkeit wurde entgegen der Nachteile (Kapitel 2.2.3) die Zeitbereichmethode „Complex Exponential“ geprüft. Zur Anwendung dieser Methode ist allerdings die „Impulse Response Function“ (IRF) notwendig. Wegen der fehlerhaften Transformation der FRF in IRF führte auch diese Methode nicht zum Erfolg.

Bei der Auswertung mittels der markierte Kombination von Methoden sind in ME'scopeVES nur folgende Einstellungen in die MIMO-Variante umzuschalten (Abb. 4.9).

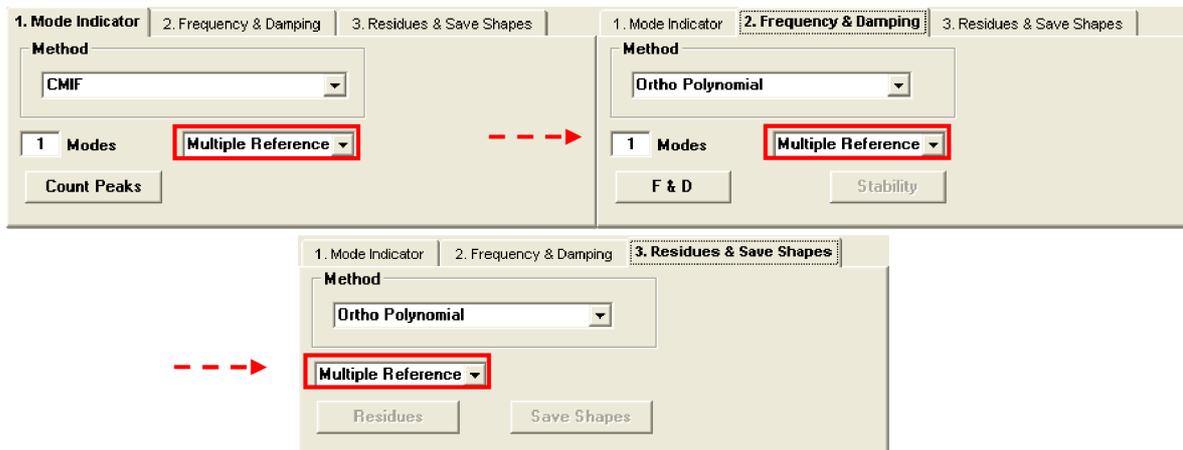


Abbildung 4.9: Einstellung von ME'scopeVES 4.0

Bei der Speicherung der Residuen tritt eine neue Möglichkeit der MIMO-Analyse auf. Die auf der Abbildung 4.10 dargestellte Tabelle hat allerdings nur Informationscharakter, der zu einer Veranschaulichung der Modenstärken auf einzelnen Referenzen dient. Ein letzter Unterschied liegt im Synthetisieren der FRF. Es ist notwendig, die beiden Referenzpunkten auszuwählen, um die richtige FRF zu erhalten (Abb. 4.11).

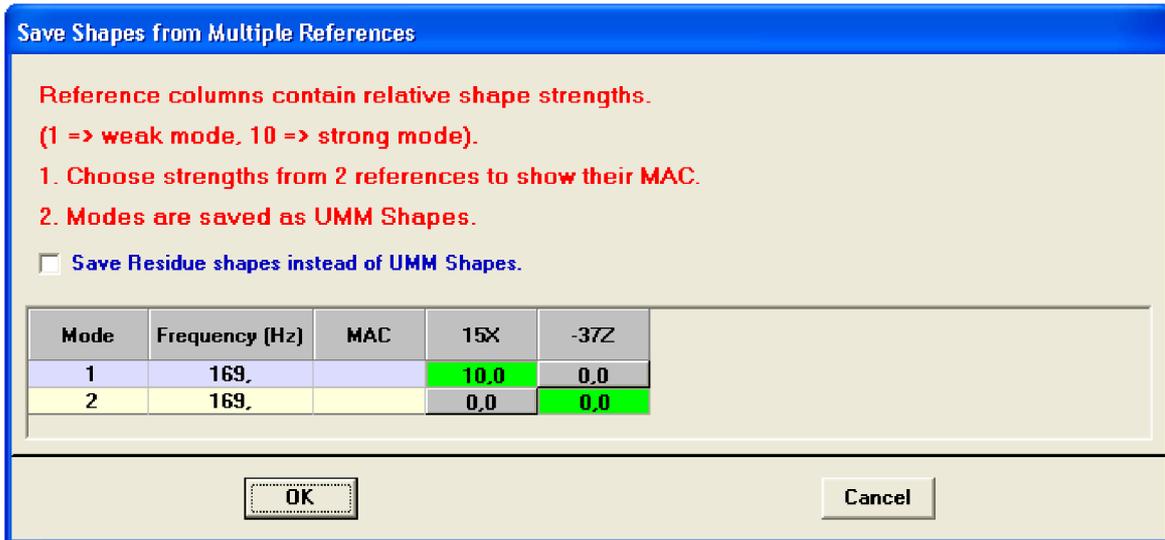


Abbildung 4.10: Informationen über die Modenstärken

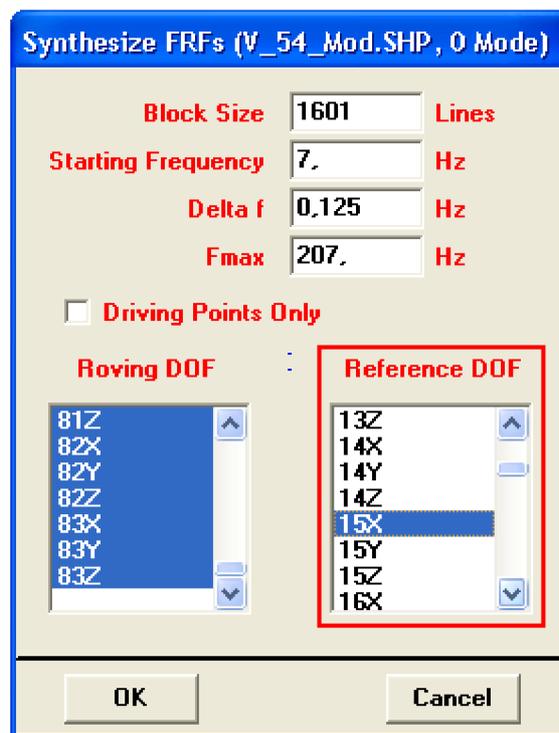


Abbildung 4.11: Synthetisieren der Parameterabschätzungen

5 Experimentelle MIMO-Analyse

Es wurden ähnlich wie im SIMO-Kapitel zwei MIMO-Analysen durchgeführt. Die Parametereinstellungen wurden von der 200 Hz Analyse übernommen, um den Vergleich der beiden Analysenaspekte zu vereinfachen. Der Unterschied zwischen den beiden MIMO-Analysen liegt nur in der Referenzpunktwahl.

5.1 MIMO-Analyse mit der Referenz auf dem Gestell

Der Referenzpunkt in der ersten MIMO-Analyse wurde auf dem Gestell gewählt. Die Anordnung des zweiten Referenzpunktes ist in der Abbildung 4.2 dargestellt.

5.1.1 Parameter der MIMO-Analyse

Wie oben erwähnt ist, wurden die möglichst gleichen Parameter sowie Bedingungen wie in der SIMO-Analyse (200 Hz) gewählt. Die umliegenden Maschinen waren außer Betrieb, deswegen sollten die Ergebnisse durch äußere Störquellen nicht beeinflusst werden. Die Temperatur war im Vergleich zur SIMO-Analyse ungefähr um 2 Grad Celsius erhöht. Dies sollte jedoch nicht die Bienenwachseigenschaften und somit die Qualität der Sensorbefestigung erheblich beeinflussen [13]. Die Parameter der Anregung bzw. des untersuchten Bereichs sind:

<i>Frequenzbereich:</i>	200 Hz (von 7 bis 207 Hz)
<i>Anzahl von Spektrallinien:</i>	1600
<i>Frequenzauflösung:</i>	0,125 Hz
<i>Erregungssignal</i>	Burst Random (2/6)
<i>Zeit der Messung</i>	8 s
<i>Mittelungen</i>	40-mal

Die Kraftamplitude des ersten Shakers wurde auf dem Minimum gehalten. Im Vergleich dazu wurde der zweite Shaker auf die maximale ablesbare Kraftamplitude eingestellt, damit eine befriedigende Antwort in allen Messpunkten überhaupt aufgenommen wird. Die Messungen wurden nicht durch die Rückkoppelung des zweiten Shakers verzerrt, da er außerhalb des Fundaments lag.

5.1.2 MIMO-Diskretisierung

In der Abbildung 5.1 sind die zwei Referenzpunkte mit den entsprechenden Koordinatensystemen sowie den Erregungsrichtungen ausführlicher abgebildet.

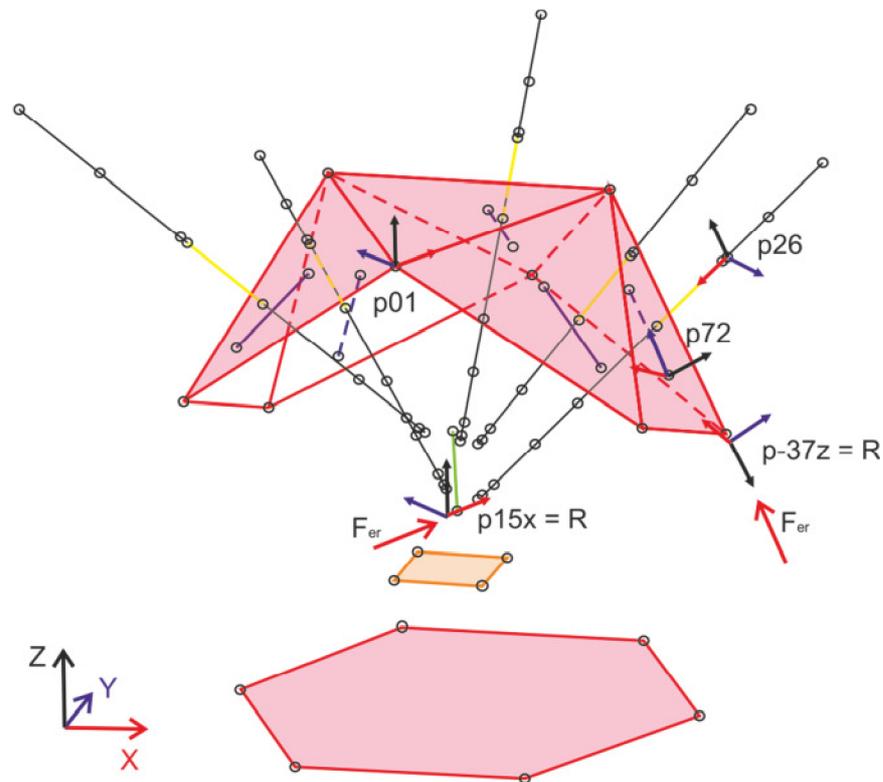


Abbildung 5.1: Diskretisierte Struktur in der MIMO-Analyse

Die Position des zweiten Referenzpunktes wurde vom letzten Experiment übernommen, wo die Lage wegen sowohl der Zugänglichkeit des Punktes als auch der besseren Anregung des Gestells und der Y-Koordinate ausgewählt worden war.

Dadurch, dass die zweite Referenz sich in dieser Lage befindet, ist es nicht nötig den entsprechenden Shaker auf das Fundament zu legen. Der Shaker liegt in dieser Analyse außerhalb des Fundaments ohne spezielle Befestigung, was einige Vorteile bringt: die maximale mögliche Erregung, keine Rückkoppelung und keine Spannvorrichtungen.

5.1.3 Erhaltene Daten

Die Abbildung 5.2 stellt die Nachgiebigkeitsgänge und die Kohärenz im Referenzpunkt 1 dar. Auf dem ersten Blick ist eine markante Verbesserung der Kohärenz sichtbar und zwar vor allem in der Y-Richtung. In der SIMO-Analyse war in den Antiresonanzbereichen der senkrechten Koordinaten ein Signalverlust und somit wurde der Kohärenzabfall betrachtet.

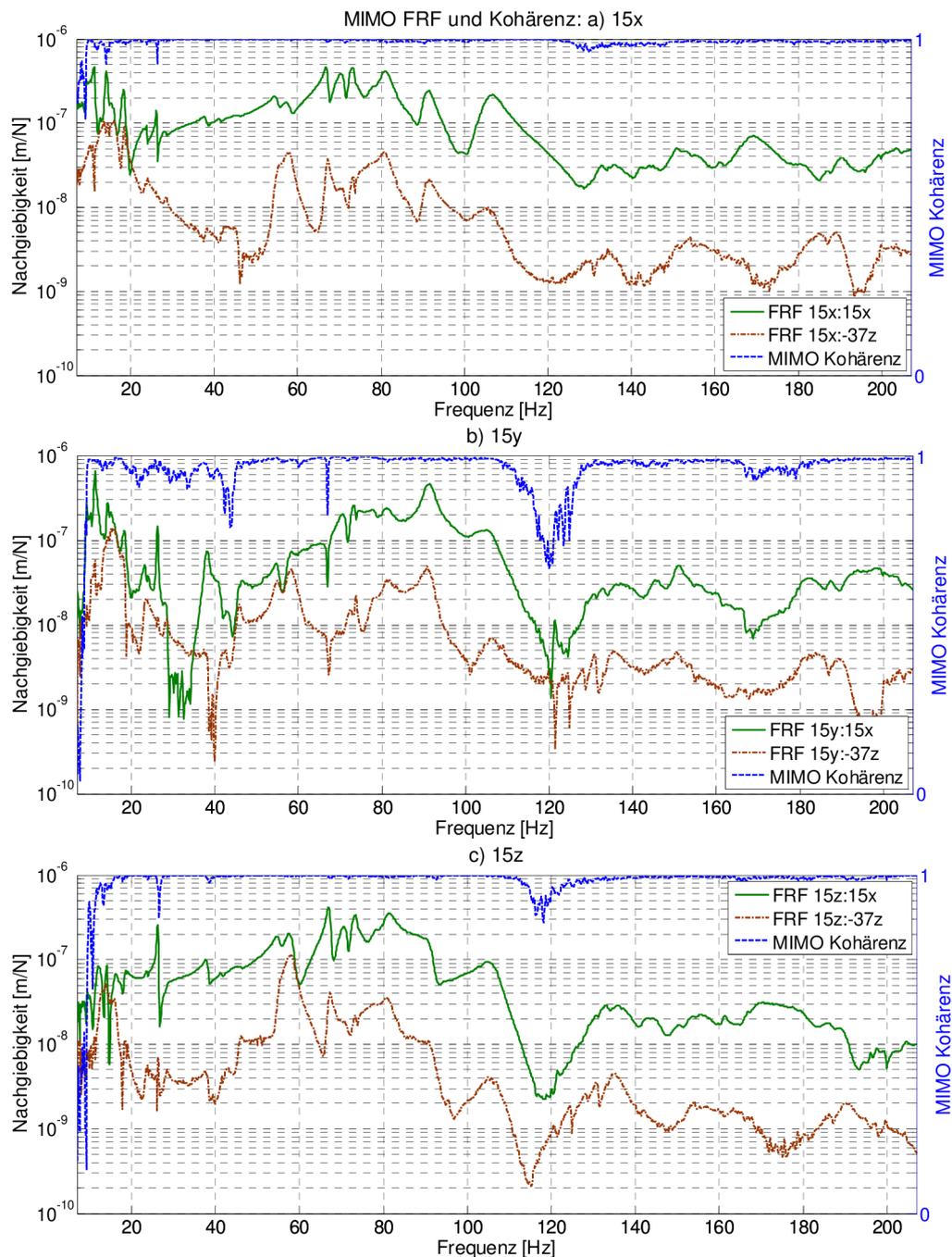


Abbildung 5.2: Nachgiebigkeit und Kohärenz im ersten Referenzpunkt

Dieses Verhalten wird in der MIMO-Analyse unterdrückt, da die gute Referenz den Antiresonanzbereich anderer Referenzen ausgleicht. Z. B. ist eine Antiresonanz in der Y-Richtung um 30 Hz im 15y:-37z Nachgiebigkeitsgang bemerkbar, obwohl die Kohärenz sehr gut ist. Um 120 Hz sind allerdings die Antiresonanzen in beiden Y-Nachgiebigkeitsgängen vorhanden, deswegen ist also ein Kohärenzabfall bemerkbar. Insgesamt verbessert sich die Kohärenz im Vergleich zur SIMO-Analyse auch in niedrigeren Frequenzen.

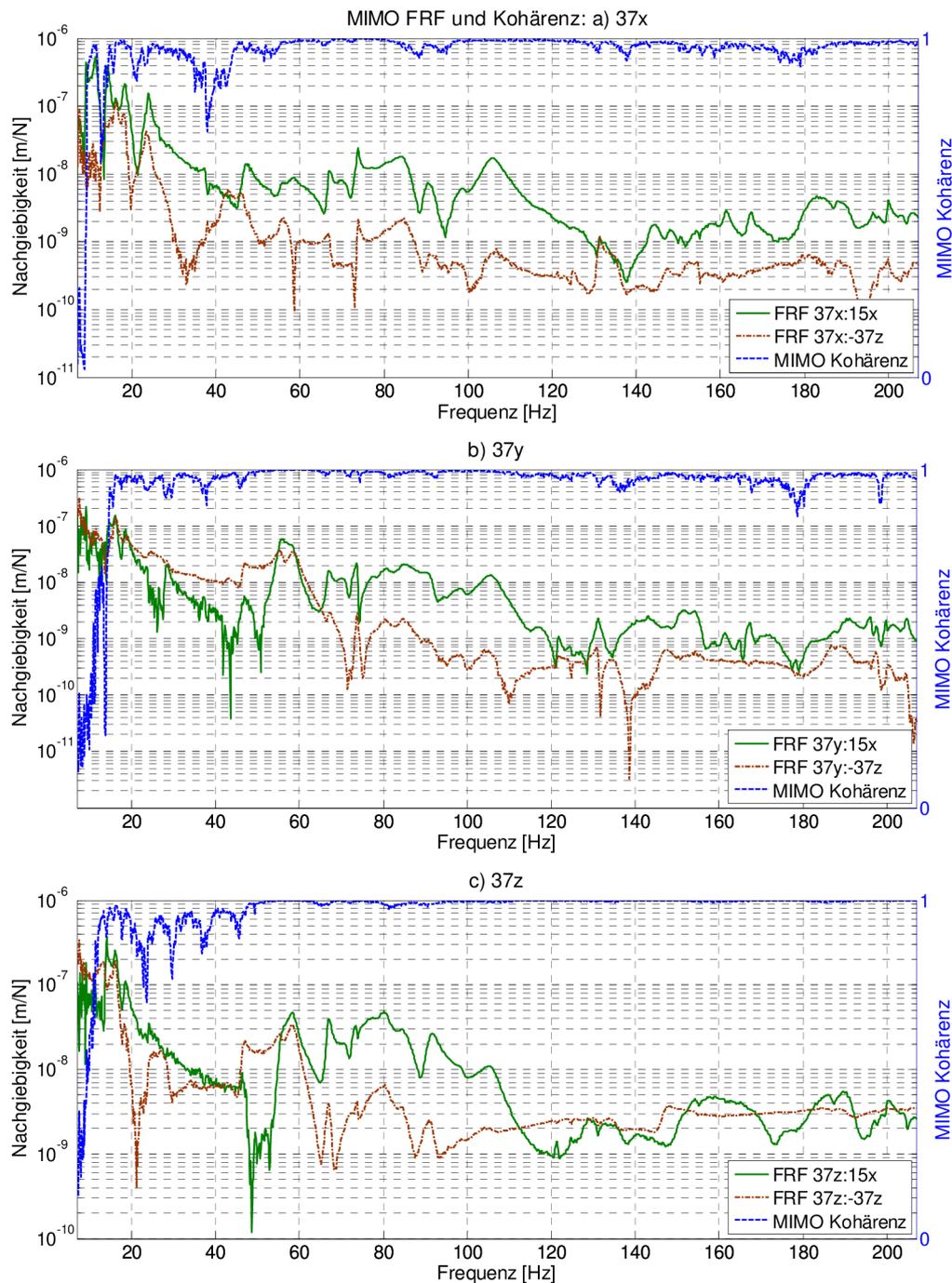


Abbildung 5.3: Nachgiebigkeit und Kohärenz im zweiten Referenzpunkt

Die auf die erste Referenz (15x) bezogenen Nachgiebigkeitsgänge werden durch kein Rauschen verzerrt und sind deswegen mit geringen Ausnahmen glatt. Die auf die zweite Referenz (-37z) bezogenen Verläufe werden vor allem in den Bereichen außer der am besten abgeschätzten Moden (50 - 110 Hz) durch Rauschen verzerrt. Dies kann mehrere Gründe haben: Ein Signalverlust kann aufgrund des Abstandes bzw. des nicht-linearen Verhaltens zwischen dem Erregungspunkt und dem Messpunkt entstehen. Den ersten Referenzpunkt regt der erste Shaker eindeutig besser an und unterdrückt somit das Signal des zweiten Shakers. Weiterhin bilden der Lüfter und der zweite Shaker ein unteilbares Ganzes, deswegen ist der Kraftsensor ständig mit der Lüfterschwingung gering ange-regt, was die FFT-Bedingung der Periodizität mäßig verletzt. Weiter ist zu bemerken, dass in den Frequenzen von 140 Hz einige Moden vor allem in den Y- und Z-Richtungen be-merkbar sind, die in der SIMO-Analyse verborgen blieben. Dies hat die Teilanregung die-ser Richtungen mittels des zweiten Shakers zur Folge.

Die Nachgiebigkeitsgänge sowie die Kohärenz des zweiten Referenzpunktes sind in der Abbildung 5.3 dargestellt. Konkret liegt die Referenzrichtung in der Z-Koordinate (37z:-37z). Die Verläufe der Kohärenz sind fast perfekt im ganzen Frequenzbereich. Eine Ausnahme gibt es im Bereich bis 50 Hz in allen Richtungen, wo die schlechtere Kohärenz mit dem Rauschen im Nachgiebigkeitsgang korrespondiert. Der Vergleich der Nachgiebigkeitsmagnituden verdient Beachtung, da die Magnitude der auf die zweite Referenz bezogenen Nachgiebigkeit deutlich niedriger ist. Dies weist auf die hohe Steifigkeit in die-sem Punkt sowie auf die anstrengende Anregung der Struktur hin. Weiter ist eine Absenz von deutlichen Moden in der Referenzrichtung zu bemerken. Im Bereich von ungefähr 95 Hz gibt es keine deutlichen Moden, wobei die Deutlichkeit der Moden für den Refe-renzpunkt von großer Bedeutung ist.

Als der weitere Demonstrationsschritt wurde, wie in der vorigen Analyse, der p26 Punkt auf der ersten Strebe ausgewählt, um eine bessere Beschreibung der Unterschiede zu gewährleisten. Die Verläufe der Nachgiebigkeit sowie der Kohärenz sind in der Abbildung 5.4 abgebildet. Die Kohärenzverläufe sind jedoch nicht besser als in der SIMO-Analyse, auch wenn eine Verbesserung in der Y- sowie Z-Richtung aufgrund der zweiten Erre-gungsstelle erwartet wurde. Dadurch, dass die Kohärenz in der Y-Richtung im ersten Re-ferenzpunkt (Abb. 5.2) sehr befriedigend ist, ist solches Verhalten im p26 Punkt unerwar-tet. Um dieses Verhalten zu erläutern, muss man sich der Strukturgestaltung bewusst werden. Die Spindel ist durch die Streben in fünf Gelenke gehalten, deshalb muss nicht die Y-Koordinate im Referenzpunkt ausschließlich durch das erste Gelenk und die erste Strebe aus der zweiten Referenz angeregt werden. Das erste Gelenk kann ein nicht-

lineares Verhalten (Spiel usw.) aufweisen, was die Kraftübertragung zwischen der zweiten Referenz und dem p26 Punkt verletzen würde. Ein Röcheln wurde im Gelenk 1 aufgezeichnet (siehe 3.3.4). Die auf der ersten Referenz bezogenen Nachgiebigkeitsgänge sind wie in anderen FRF sehr gut. Die Nachgiebigkeit ist zwischen der zweiten Referenz und dem p26 Punkt vor allem im Bereich von 100 Hz sehr verzerrt und entspricht vermutlich nicht dem wahren Strukturverhalten.

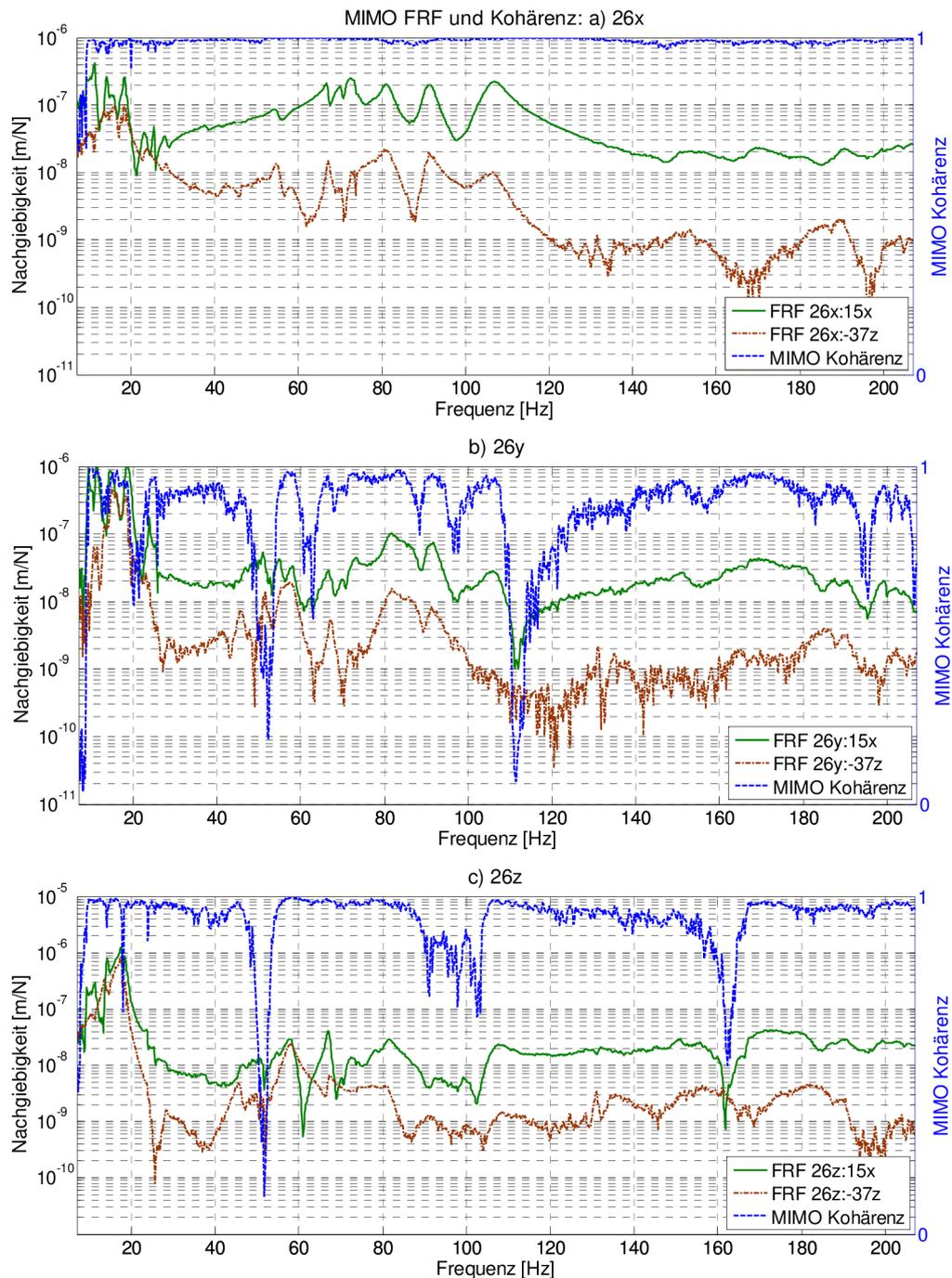


Abbildung 5.4: Nachgiebigkeit und Kohärenz im p26 auf der Strebe 1

Im Grunde genommen kommt es in anderen FRF zur spürbaren Verbesserung der Kohärenz in allen Koordinaten. Zu den Ausnahmen zählt man jedoch die Punkte auf der Strebe 1. Es hängt vermutlich mit dem stark nicht-linearen Verhalten im ersten Gelenk zusammen. Die auf die zweite Referenz bezogenen FRF sind oftmals vom starken Rauschen verzerrt. Dies hängt entweder mit der ungünstigen Lage des Referenzpunktes oder mit der Verletzung der Signalperiodizität durch den Erregerlüfter zusammen. Ein „Hannigan“-Zeitfenster kombiniert mit dem „Random“ Erregungssignal [29] wurde angewendet, um die Störung der Lüfterschwingungen zu vermindern. Trotzdem brachte es kaum eine Kohärenzverbesserung. Durchgehend wurde auch die Signalperiodizität in den Beschleunigungssensoren überprüft und in seltenen Fällen wurde sie von unbekanntem Störquellen verletzt. Der Grund der Störung wurde jedoch nicht entdeckt. Eine deutliche Beeinflussung der FRF-Qualität soll allerdings durch die Mittelungenanzahl vermindert werden.

5.1.4 Auswertung

Im Vergleich zur SIMO-Analyse wurde die Kombination von CMIF und der Orthogonal Polynomial Kurvenanpassungsmethode ME'scopeVES 4.0 im Fall der MIMO-Analyse aus den im Kapitel 4 geschriebenen Gründen angewendet. Es wurde wieder eine Sortierung der hochwertigen Daten angestrebt, um die Parameter möglichst exakt zu bestimmen. Aufgrund des CMIF-Charakters ist dies jedoch nicht möglich. Die CMIF berechnet die SVD auf jeder spektralen Linie für beide Referenzen in einer Matrix zusammen (Formel 2-19), und deswegen ist eine Vernachlässigung z. B. der schlechten Referenz 2 ohne eine gleichzeitige Vernachlässigung der perfekten Referenz 1 nicht möglich. Falls man diese Sortierung durchführen will, muss man mit einem Verlust der Qualität einer Referenz rechnen. In der vorhandenen Datei sind die auf die erste Referenz bezogenen Nachgiebigkeitsgänge sehr gut, deswegen wurde auf eine Sortierung verzichtet. Dadurch, dass die Mehrheit der verzerrten FRF in der Datei bleibt, werden die Ergebnisse durch das Rauschen etwas verzerrt. Den Verlauf der CMIF im untersuchten Frequenzbereich kann man in der Abbildung 5.5 betrachten. Eine mäßige Glättung der FRF (mittels „Smooth“ Funktion) war notwendig.

Die vorgestellten Ergebnisse wurden von mehreren Kurvenanpassungsversuchen als die besten ausgewählt. Wie in der SIMO-Analyse wurden in den niedrigeren Frequenzen vor allem Frequenz- sowie Dämpfungsabweichungen von Versuch zu Versuch bemerkt. Im hohen Frequenzband wurden demgegenüber erhebliche Abweichungen in den Residuen betrachtet, die vor allem vom untersuchten Frequenzband abhängig waren.

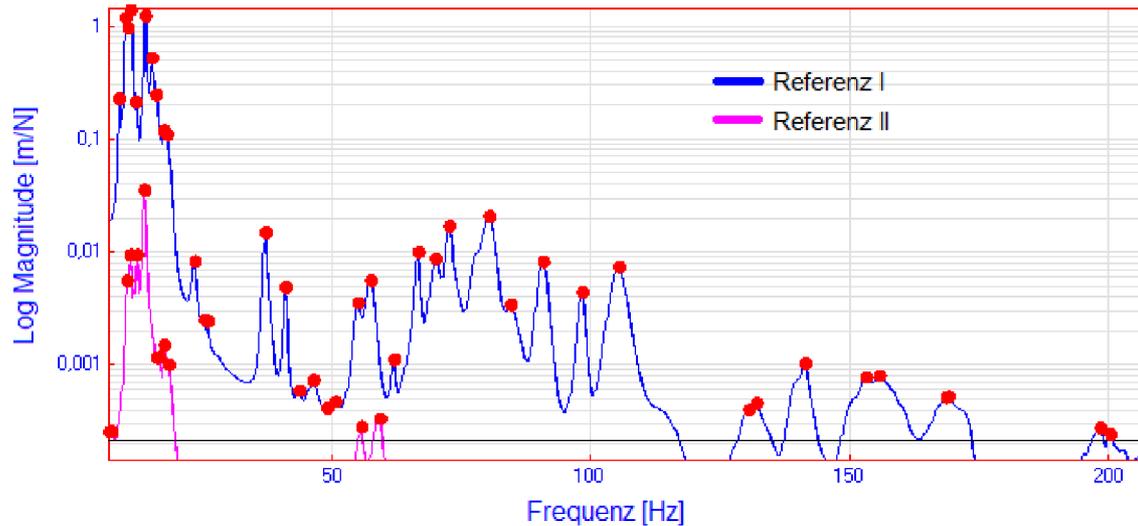


Abbildung 5.5: Complex Mode Indicator Function der ersten MIMO-Analyse

Die blaue ausgewertete Kurve bezeichnet die CMIF der ersten Referenz. Die lila Kurve repräsentiert die zweite Referenz. Der Kurvenverlauf bestätigt vorige Vermutungen. Die Kurve der ersten Referenz entdeckt eindeutig mehr Moden als die Zweite. Im ganzen Frequenzband enthält die erste Kurve also die größten Eigenwerte. Diese Fakten skizzieren ein deutliches Übergewicht der ersten Referenz. Die zweite Referenz erwirbt die Bedeutung nur in den niedrigeren Frequenzen. Die Vermutungen über die schlechte Strukturanregung aufgrund der zweiten Referenzlage scheinen sich zu bewahrheiten. Auf alle Fälle stimmen einige Modenfrequenzen der sowohl ersten als zweiten Kurve überein, deswegen kann es sich um entweder „Coupled“ oder „Repeated“ Moden handeln. Die wurden in der vorigen SIMO-Analyse nicht aufgedeckt. Insgesamt wurden 54 Moden im gleichen Frequenzband abgeschätzt (davon 13 durch die zweite Referenz), d. h. 11 mehr als in der sorgfältig durchgeführten 200 Hz SIMO-Analyse. Wie in der SIMO-Analyse kann man das Band von 50 - 110 Hz für das Bereich mit den besten Moden halten. Die abgeschätzte Modalfrequenz und Modaldämpfung der entdeckten Moden sind in diesem Bereich in der Tabelle 5.1 dargestellt. Die durch die zweite Referenz ermittelten Moden sind grau markiert. Die Referenznummer ist also in Klammern eingeschlossen. also in Ein Verzeichnis sämtlicher Moden dieser Analyse ist im Anhang B3 vorhanden. Die Abweichung der dargestellten Modalfrequenzen zwischen der SIMO- und MIMO-Analyse bewegt sich in ein paar Prozenten. Die Dämpfungsabweichung ist etwas größer. Eine bedeutende Differenz gibt es nur im Vergleich zwischen dem Mode Nr. 38 in der MIMO- und dem Mode Nr. 23 in der SIMO-Analyse. Die MIMO-Analyse deckte im Bereich von 50 - 110 Hz zwei zusätzlichen Moden aus der zweiten Referenz auf, wobei sie in der Nähe von anderen Moden sind. Die „Coupled“ Moden wurden mittels SIMO-Analyse nicht entdeckt.

Tabelle 5.1: Auswahl der besten Moden in der ersten MIMO Analyse

Nr. (Ref.)	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]	Nr. (Ref.)	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]
30 (1)	55,3	1,52	37 (1)	72,3	1,01
31 (2)	55,6	1,73	38 (1)	81,1	0,629
32 (1)	58	1,67	39 (1)	81,6	2,64
33 (2)	58,7	1,62	40 (1)	90,9	1,35
34 (1)	62,3	0,695	41 (1)	98,7	1,16
35 (1)	67	0,641	42 (1)	106,0	1,89
36 (1)	71,7	2,25			

Die Ergebnisse der Kurvenanpassung in beiden Referenzkoordinaten sind in der Abbildung 5.6 abgebildet. Auf dem ersten Blick sind klare Unterschiede in der Anpassungsqualität bemerkbar. Während die Kurvenanpassung im ersten Referenzpunkt merklich besser ist, entspricht die Kurvenanpassung der neuen zweiten Referenz der Form von gemessenen Daten überhaupt nicht. Auch die besten Moden, die in der ersten Referenz überwiegend befriedigend angepasst wurden, passen den gemessenen Nachgiebigkeitsgängen im Bereich von 50 bis 110 Hz nicht, sie sind aber hierbei in den FRF sichtbar. Dies bestätigt auch die Behauptung bezüglich der Probleme mit der zweiten Referenz. Diese Referenz stimmt im ganzen Bereich nicht überein vermutlich aufgrund der hohen Steifigkeit, unbedeutender Moden und schlechter Anregung. Eine Modenabsenz kann von 100 Hz durch die lokalen Struktureigenschaften in der gegebenen Stelle verursacht werden.

Im ersten Referenzpunkt kann man eine Verbesserung der Abschätzung von Residuen sehen. Die Modenanzahl scheint in Ordnung zu sein, d. h. es gibt keine überflüssigen Moden. Deutliche Abweichungen sind nach wie vor in den höheren Frequenzen. Die angepasste und die gemessene Kurve gehen diesmal jedoch erst bei 190 Hz deutlich auseinander. In der SIMO-Analyse trennen sich die Kurven schon von 140 Hz. In diesem Referenzpunkt gibt es auch eine Differenz im Frequenzbereich von 30 - 50 Hz ebenso wie in der SIMO-Analyse. Die Gründe dafür sind wahrscheinlich ein nicht-lineares Verhalten und Reserven in der Anregung. Man kann natürlich nicht ein äußeres Rauschen ausschließen, dennoch ist es nicht wahrscheinlich, da dieses Rauschen die FRF sichtlich verzerren würde. Die Diskrepanzen in den Antiresonanzbereichen sind erwartet, weil die Kurvenanpassung hauptsächlich auf die Gipfel der FRF gerichtet wird. Diese Antiresonanzbereiche sind nämlich außerhalb der Interessensphäre.

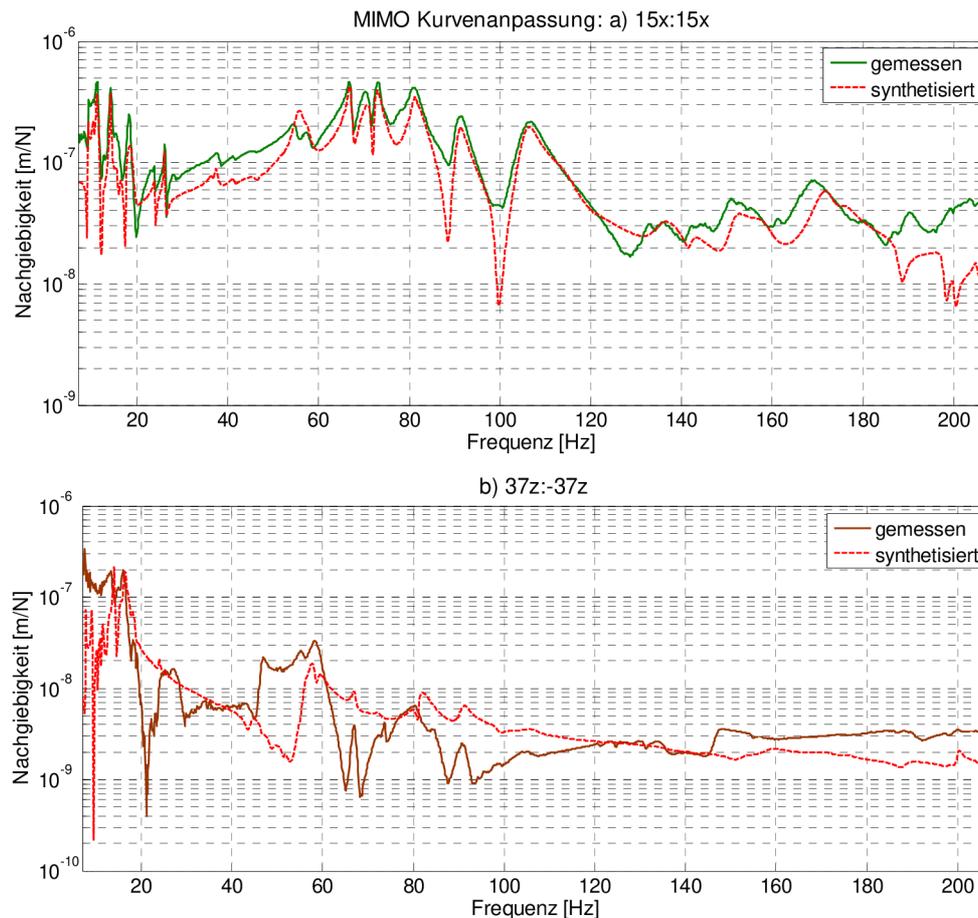


Abbildung 5.6: Kurvenanpassung in beiden Referenzpunkten

Der p26 Punkt wurde wieder aufgrund des transparenten Vergleichs der Methoden ausgewählt. Die synthetisierten FRF zwischen dem p26 Punkt und der ersten Referenz sind in der Abbildung 5.7 vorhanden. In der X-Richtung ist eine Verbesserung von Residuenabschätzung im Bereich bis 190 Hz merkbar. Die Form der FRF ist also besser. In der Y- sowie Z-Richtung kommt es jedoch zu einer Verschlechterung im Bereich von 120 bis 150 Hz im Vergleich zur SIMO-Analyse. In den höheren Frequenzen ist die Kurvenanpassung im Vergleich zur SIMO-Analyse besser. In der Y-Koordinate verbesserte sich die FRF überdies auch im Problembereich von 30 bis 50 Hz. Eine vernünftige Erläuterung dieses verschiedenen Verhaltens ist allerdings schwierig. In sämtlichen FRF kommt es in höheren Frequenzen zu einer Verbesserung des angepassten FRF-Verlaufes. In niedrigen Frequenzen scheint die erste Referenz durch die Modenabschätzungen beeinflusst zu sein, die mittels der zweiten Referenz bestimmt sind. Deswegen ist der Kurvenverlauf in Frequenzen bis 30 Hz manchmal nicht so genau, wie in der SIMO-Analyse.

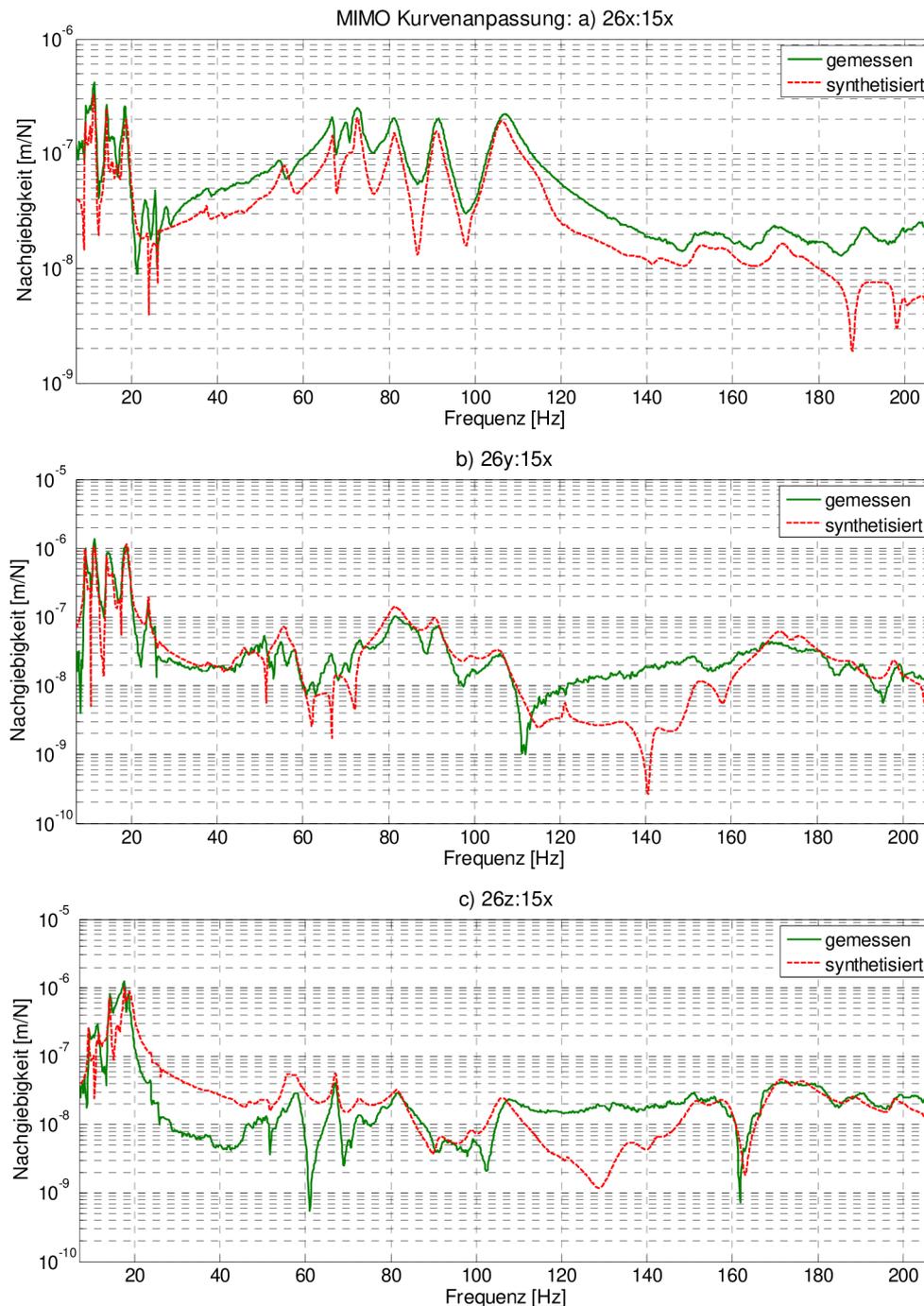


Abbildung 5.7: Kurvenanpassung im p26 auf der Strebe 1 (Referenz 1)

Die Abbildung 5.8 zeigt die Verläufe im p26 der auf die zweite Referenz bezogenen Nachgiebigkeit. Die synthetisierten Verläufe in Y- sowie Z-Richtung passen den gemessenen Verläufen überhaupt nicht, auch wenn ein paar Moden sehr deutlich sind. In der X-Richtung ist das Synthetisieren besser und zwar wahrscheinlich aufgrund der ersten Referenz, da die deutlichen Moden global bestimmt werden. Die Kurvenanpassung ist vornehmlich in den Bereichen unbefriedigend, wo die beiden FRF-Verläufe schlecht sind und sind deshalb keine bewertbaren Daten vorhanden.

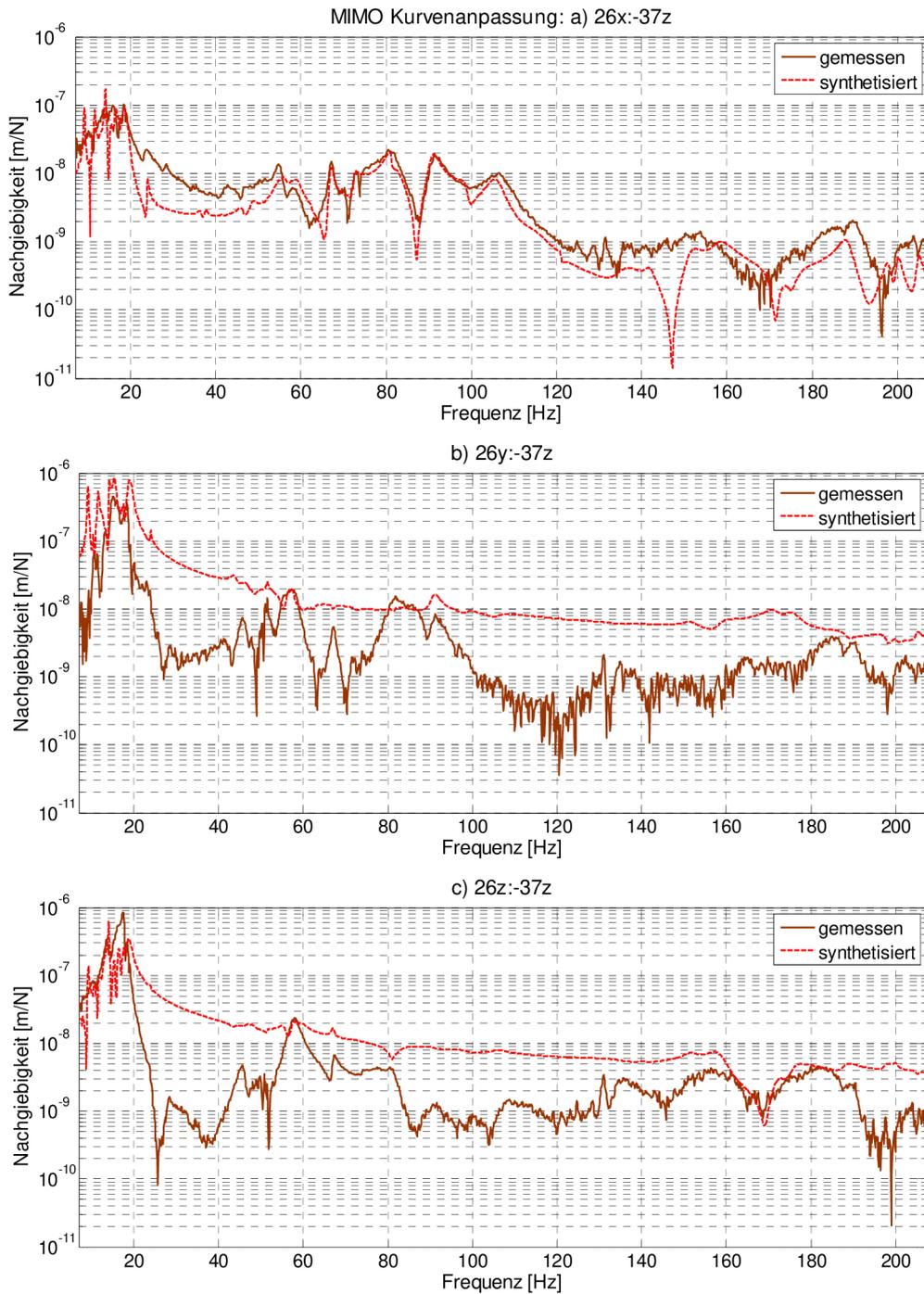


Abbildung 5.8: Kurvenanpassung im p26 auf der Strebe 1 (Referenz 2)

Die zweite Referenz wird allgemein stark in den höheren Frequenzen durch Rauschen verzerrt. Die Kurvenanpassung der zweiten Referenz ist in der Mehrheit der FRF nicht vertrauenswürdig auch bei den guten und deutlichen Moden.

5.1.5 Zusammenfassung

In vorigen Abschnitten wurden die Ergebnisse der ersten MIMO-Analyse vorgestellt und besprochen. Der ersten Referenzpunkt wurde von der SIMO-Analyse übernommen. Die zweite Referenz wurde aufgrund der Zugänglichkeit ohne weitere ausführlichere Überlegungen ausgewählt. Die besseren Ergebnisse wurden jedoch erwartet. Sie sind kontrovers und bringen einige Optimierungsaufgaben.

Folgende Punkte kann man positiv bewerten:

- Bessere Anregung der Mehrheit der Messpunkte
- Bemerkbare Verbesserung von Kohärenzverläufen
- Entdeckung von „Coupled“ Moden
- Mäßig bessere Kurvenanpassung der auf die erste Referenz bezogenen Nachgiebigkeitsgänge

Mögliche Ursachen einer Fehlerentstehung sind:

- Vorhandenes nicht-lineares Verhalten
- Schwierige Kraftübertragung zwischen dem zweiten Referenzpunkt und den Punkten auf den Streben aufgrund sowohl einer größerer Steifigkeit des Punktes als auch der Strukturgestaltung (Gelenke usw.)
- Unmöglichkeit einer Validierung der Moden, die durch die zweite Referenz entdeckt wurden, da nur eine Auswertungsmethode funktionsfähig ist und keine andere MIMO-Dateien vorhanden sind

Eine Optimierungsaufgabe ist durchzuführen. Eine günstige Lage des zweiten Referenzpunktes muss entworfen werden, um eine gute Anregung sowie Kurvenanpassung zu sichern. Der Referenzpunkt muss gegebene Bedingungen befriedigen:

- Anregung in der anderen Richtung als die erste Referenz
- Niedrige Steifigkeit
- Kein Auftreten der lokalen Moden
- Befestigung des Shakers ist möglich

5.2 MIMO-Analyse mit der Referenz auf dem Tisch

Die zweite MIMO-Analyse wurde nach den Optimierungsvorschlägen im vorigen Kapitel durchgeführt. Der zweite Referenzpunkt wurde diesmal auf dem Tisch gewählt, um bessere Daten zu gewinnen. Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 5.9 dargestellt. Die Gründe der Tischauswahl sind im folgenden Kapitel erläutert. Der zweite Shaker wurde mit dem Fundament mittels des Ständers starr verbindet.

Die Messungen wurden unter gleichen Bedingungen und mit gleichen Parametern durchgeführt, die im Kapitel 5.1.1. angeführt sind. Die Kraftamplituden blieben trotz der möglichen Rückkopplung (hauptsächlich aufgrund der maximalen Kraftamplitude des zweiten Shakers) ebenso bewahrt, da somit eine günstigere Strukturanregung erreicht wurde. Sonst der zweite Shaker ist nicht in der Lage ein genügendes Signal auf die entfernten Punkte zu übertragen. Eine Möglichkeit zur Rückkopplungsreduzierung ist die Anwendung von Dämpfungselementen in Verbindung zwischen dem Shaker und Fundament. Die aufgrund des Dämpfungselementes dynamisch getrennte Masse des Schwingerregers beeinflusst allerdings die Struktur und somit werden die Modalparameter verzerrt. Deswegen wurde diese Maßnahme nicht angewendet.

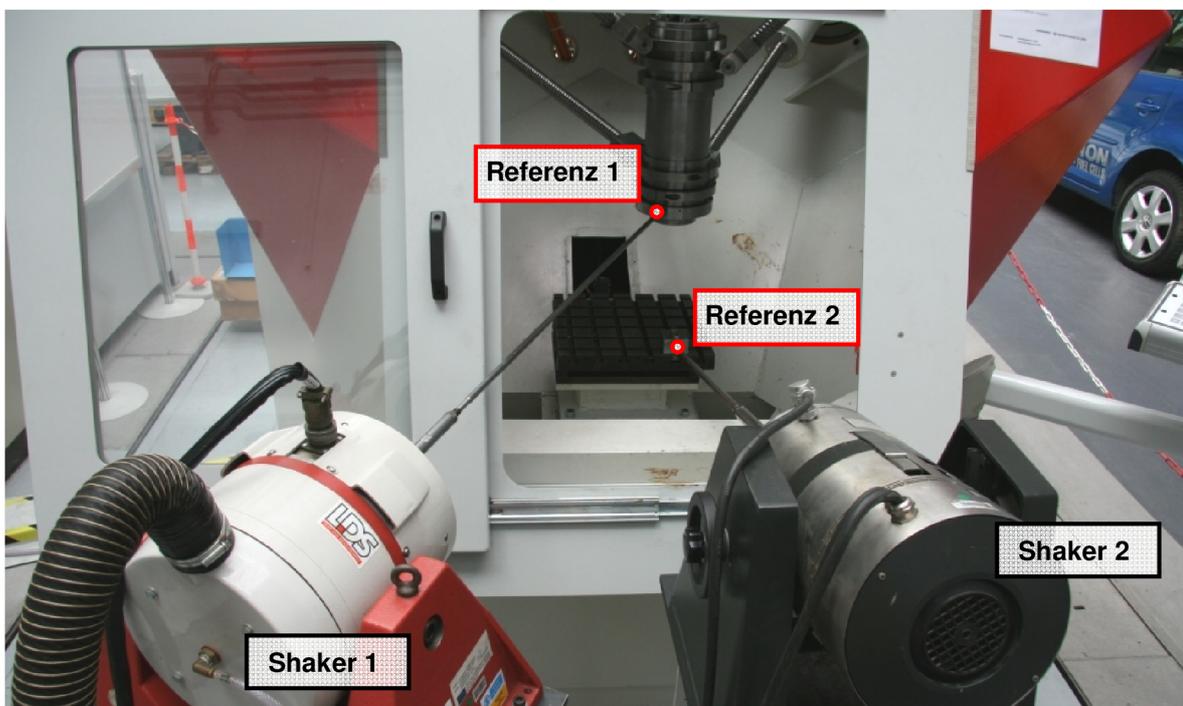
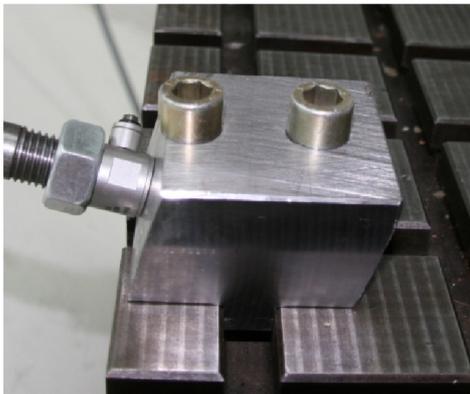


Abbildung 5.9: Anordnung der zweiten MIMO-Analyse

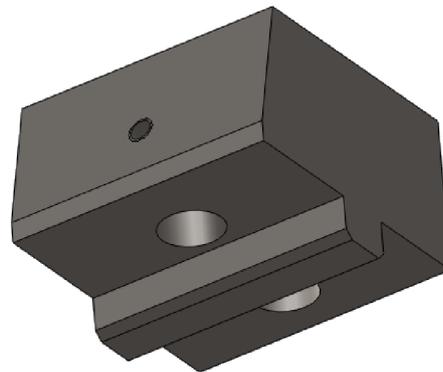
5.2.1 Wahl des zweiten Referenzpunktes

Nach einer Überlegung wurden zwei neue alternative Referenzpunkte gefunden. Die Auswahlkriterien waren vor allem eine niedrigere Steifigkeit als auf dem Gestell und die Verhinderung der Möglichkeit der Anregung von lokalen Moden. Aus diesen Gründen wurde das Maschinengestell nicht mehr betrachtet. Die Möglichkeiten sind:

- *Referenzpunkt auf der Spindel senkrecht zur ersten Referenz:*
Zu den Vorteilen dieses Punktes kann man zählen: Gute Anregung aller Koordinaten in Punkten von größten Bedeutung (auf den Streben) und eine genügende Nachgiebigkeit. Ein erheblicher Nachteil ist allerdings die schlechte Zugänglichkeit des Maschineninnenraumes und deswegen eine Unmöglichkeit der guten Sensorbefestigung. Weitere Komplikationen erscheinen in einer Einstellung des TCP. Diese neue TCP-Lage würde die Modalparameter beeinflussen, somit wäre ein transparenter Vergleich der Analysen schwierig.
- *Referenz auf dem Maschinentisch in der X-Richtung der Maschinenkoordinaten:*
Diese Lage ist zugänglich, damit die Sensoren im Innenraum bequem befestigt werden können. Die Anregung erfolgt leider in der X-Richtung der Maschinenkoordinaten. Diese Anordnung ermöglicht keine günstige Anregung der Y-Richtung.



a) Anordnung im Innenraum



b) 3D-Zeichnung

Abbildung 5.10: Verbindungsklotz

Als endgültige Variante wurde die Referenz auf dem Maschinentisch ausgewählt, wobei der Hauptgrund die Zugänglichkeit des Innenraumes war. Um eine möglichst lineare Kraftübertragung zwischen dem Shaker und Tisch zu sichern, wurde ein Klotz (Abb. 5.10) als ein Verbindungselement verwendet. Die Gestaltung des Klotzes ermöglicht eine genügende Form- sowie Kraftverbindung.

5.2.2 Gemessene Daten

Die Abbildung 5.11 zeigt die gemessenen Daten im ersten Referenzpunkt. Der Kohärenzverlauf erinnert an die Ergebnisse der SIMO-Analyse (wegen der Absenz der Y-Anregung). Die auf die zweite Referenz bezogenen Y- sowie Z-Nachgiebigkeitsgänge sind bis 160 Hz abwechselnd verzerrt. Von 160 Hz ist der Verlauf in allen Richtungen nicht beweiskräftig. In manchen Bereichen sind einige bisher unbekannte Moden bemerkbar.

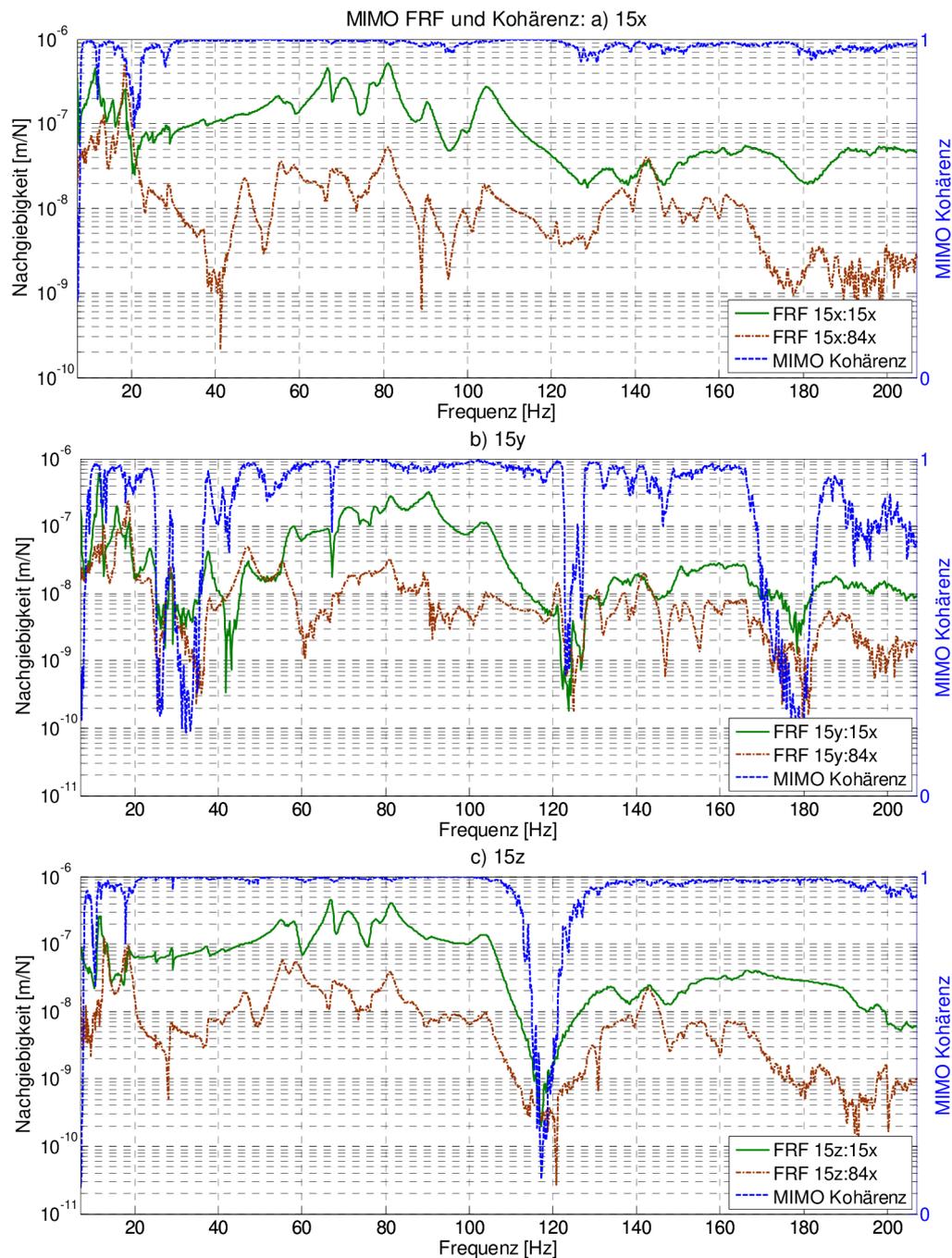


Abbildung 5.11: Nachgiebigkeit und Kohärenz im ersten Referenzpunkt (zweite MIMO)

Der Kohärenzverlauf ist im zweiten Referenzpunkt (Abb. 5.12) in allen Koordinaten befriedigend, obwohl es keine direkte Y-Anregung gibt. Aus den Nachgiebigkeitsgängen kann man eine höhere Nachgiebigkeit im Vergleich zur vorigen MIMO-Analyse ablesen. Dies ist ein erwünschtes Merkmal. Die auf die zweite Referenz bezogenen Nachgiebigkeitsgänge sind überwiegend glatt und ohne Rauschen, vor allem in der Referenzrichtung (84x:84x). Die anderen Nachgiebigkeitsgänge hinsichtlich der Referenz 1 sind verzerrt, dennoch wird solches Verhalten hinsichtlich der gegenseitigen Lage der gemessenen Punkte erwartet.

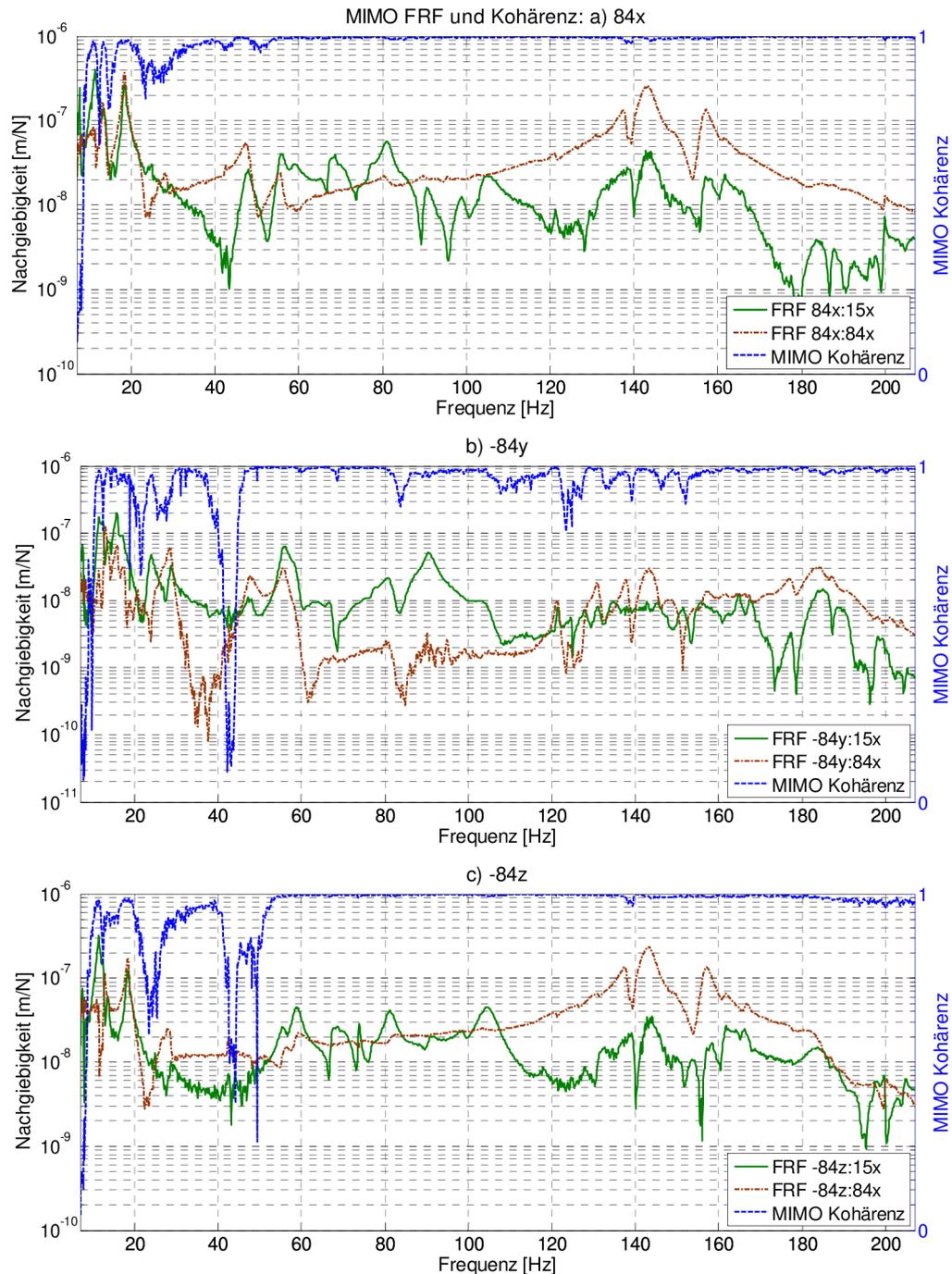


Abbildung 5.12: Nachgiebigkeit und Kohärenz im zweiten Referenzpunkt (zweite MIMO)

Die Erregungsenergie des ersten Shakers klingt nämlich allmählich auf dem Weg zum p84 Punkt ab. Weiterhin ist eine niedrigere Modenanzahl in den Frequenzen bis 30 Hz im Vergleich zur ersten MIMO-Analyse zu bemerken.

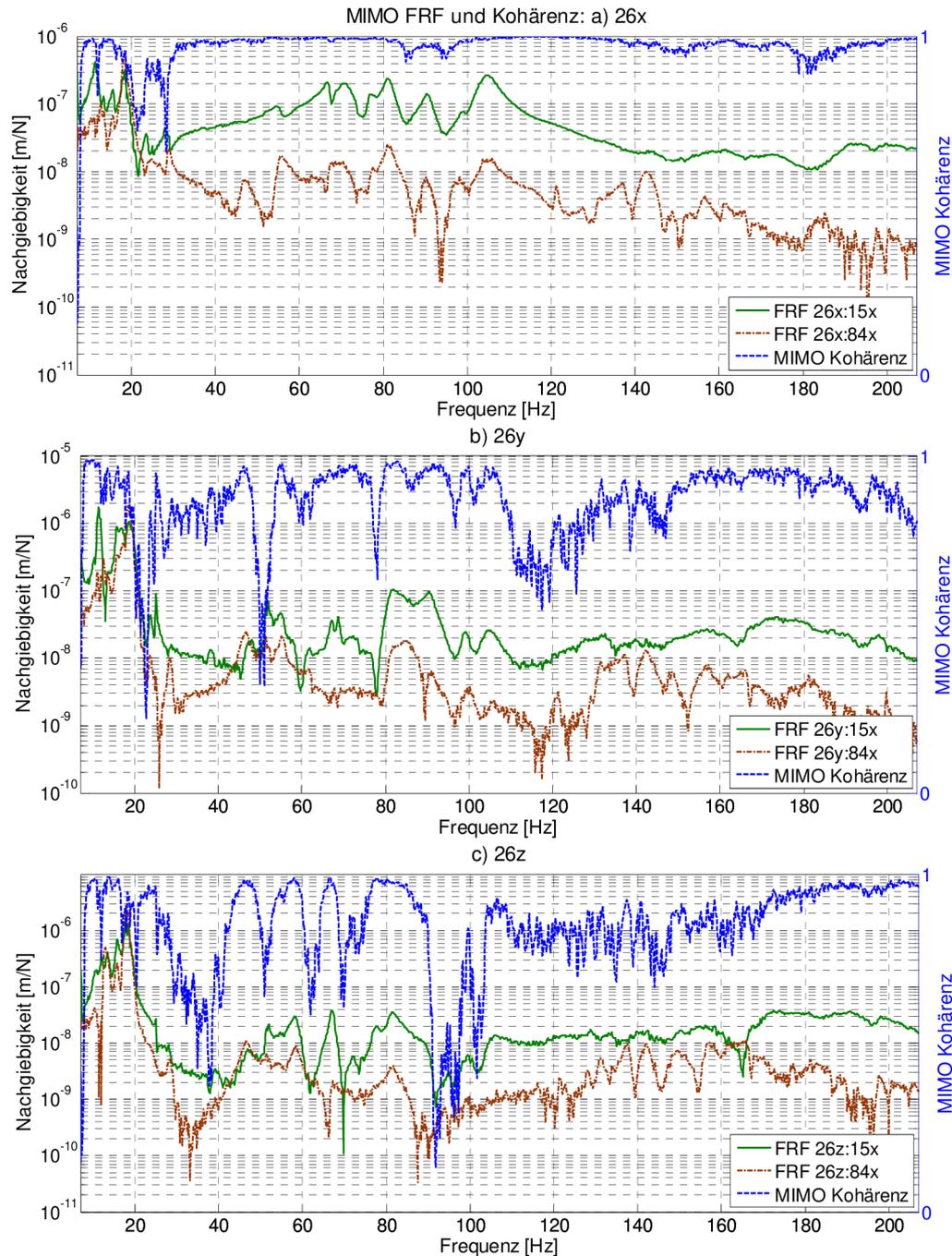


Abbildung 5.13: Nachgiebigkeit und Kohärenz im p26 auf der Strebe 1 (zweite MIMO)

Ein erheblicher Nachteil dieser Referenz ist die Absenz der deutlichen Moden im ganzen Frequenzbereich. Wie vorher sollten die Moden im Referenzpunkt deutlich sein. Diese Referenz besitzt jedoch solche Moden nur um 150 Hz, was eher einige lokale Moden andeutet, da diese Moden in solcher Maß vorher nicht bemerkt wurden.

Die Kohärenz im p26 Demonstrationspunkt (Abb. 5.13) zeigt eine Verschlechterung im Vergleich zur sowohl ersten MIMO- als auch SIMO-Analyse. Es handelt sich eindeutig um eine negative Beeinflussung des zweiten Shakers. Wahrscheinlich reicht die Erregerenergie nicht zur genügenden Anregung und das Kraftsignal verliert sich in der Struktur und wirkt schließlich mehr wie ein negatives Rauschen. Die möglichen Ursachen des Signalverlustes sind: Die Erregungsrichtung richtet in das Fundament, was die Erregerenergie schlucken kann. Die zweite Referenz ist von den Punkten auf dem Streben ziemlich entfernt, wobei die Kraft durch verschiedene Fügstellen bzw. Gelenke übertragen werden muss. Die schlechte Kohärenz spiegelt sich in den Nachgiebigkeitsgängen wider. Die auf die zweite Referenz bezogene Nachgiebigkeit ist stark verzerrt, somit vor allem in der Y- sowie Z-Richtung nicht beweiskräftig. Die unbekanntenen Moden aus der zweiten Referenz sind in dieser Richtung in den hohen Frequenzen ebenso bemerkbar.

5.2.3 Parameterermittlung

Die Datenauswertung erfolgte nach gleichem Vorgehen wie in der ersten MIMO-Analyse. Die CMIF-Kurven sind in der Abbildung 5.14 abgebildet.

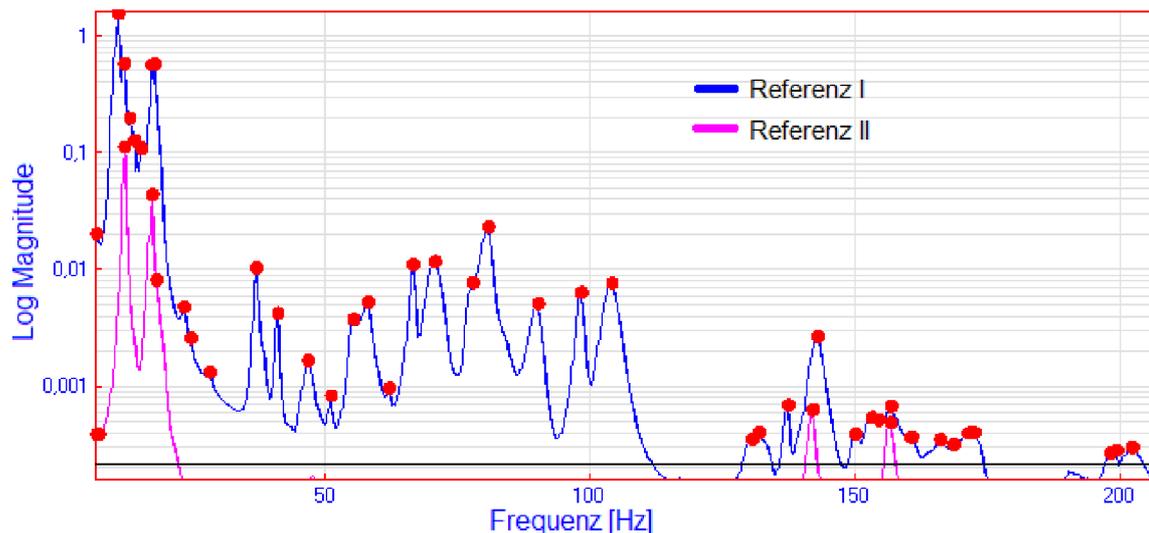


Abbildung 5.14: Complex Mode Indicator Function der zweiten MIMO-Analyse

Um ein Rauschen in einem gewissen Maße zu vermindern, wurde eine Glättungsfunktion angewendet. Die erheblichen Unterschiede in der zweiten Referenz sind zu bemerken. Während in der ersten MIMO-Analyse viele Moden in den niedrigen Frequenzen auftraten, gilt dieser Fakt in zweiter Analyse nicht. Doch werden einige neue Moden um 150 Hz entdeckt. Dies bestätigt die im vorigen Kapitel vorgestellten Schlussfolgerungen, die die

neuen Moden in der zweiten Referenz betreffen. Auch ihr singulärer Wert ist groß, deswegen kann es sich nicht um ein Rauschen handeln.

Tabelle 5.2: Auswahl der besten Moden in der zweiten MIMO-Analyse

Nr. (Ref.)	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]	Nr. (Ref.)	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]
15 (1)	50,7	1,56	21 (1)	77,6	0,422
16 (1)	55,6	1,44	22 (1)	81,3	1,95
17 (1)	58,1	1,78	23 (1)	90,5	1,46
18 (1)	62	0,934	24 (1)	98,6	1,02
19 (1)	67,1	0,712	25 (1)	104	2,2
20 (1)	71,3	3,24			

Im Anhang B4 steht das Modenverzeichnis zur Verfügung. In der Tabelle 5.4 ist wieder ein Bereich mit den besten Moden (50 - 110 Hz) angeführt. Die Ortho Polynomial Kurvenanpassungsmethode bestätigte die CMIF-Ergebnisse und fand nur drei Moden von der zweiten Referenz in den niedrigen Frequenzen. Demgegenüber wurden drei extra Moden in hohen Frequenzen gefunden, die in der ersten Analyse nicht aufgedeckt wurden.

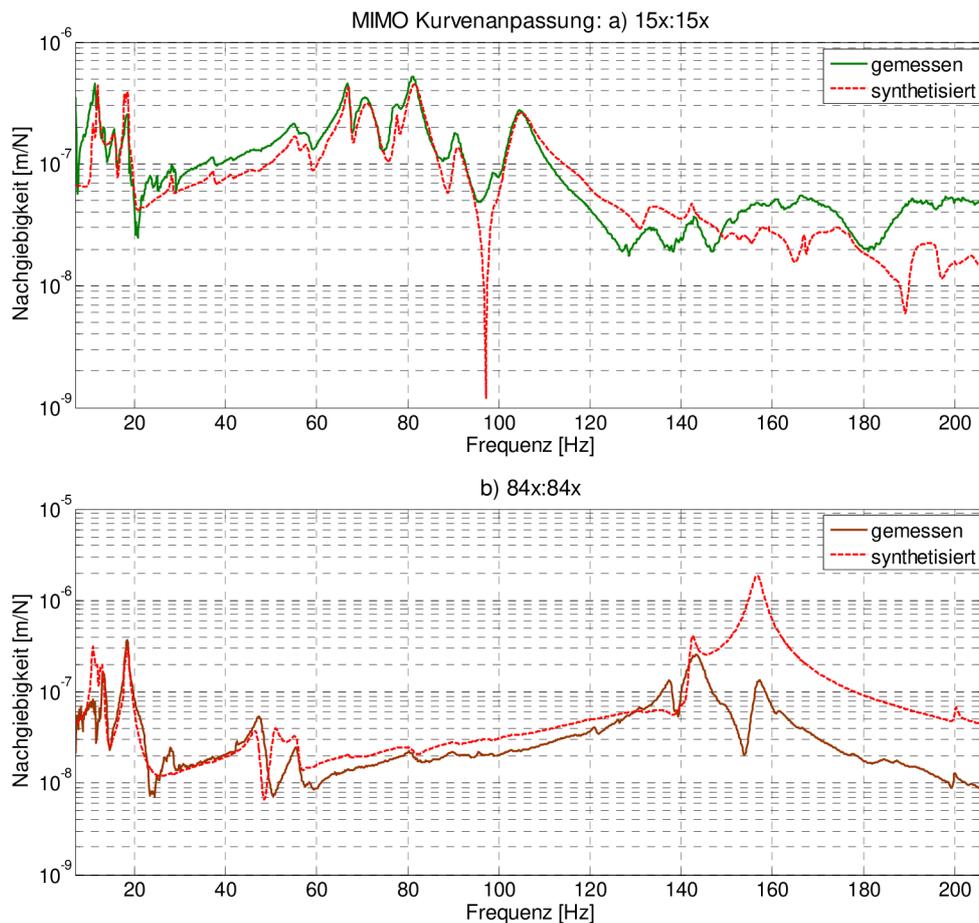


Abbildung 5.15: Kurvenanpassung beiden Referenzpunkten (zweite MIMO)

Insgesamt waren 47 Moden gefunden, um 4 mehr als in der SIMO- und um 7 weniger als in der ersten MIMO-Analyse. Keiner, der ersten MIMO-Analyse extra entdeckten Moden, wurde durch diese Analyse eindeutig bestätigt. Andererseits unterscheiden sich die besten Moden aller Analysen nicht erheblich.

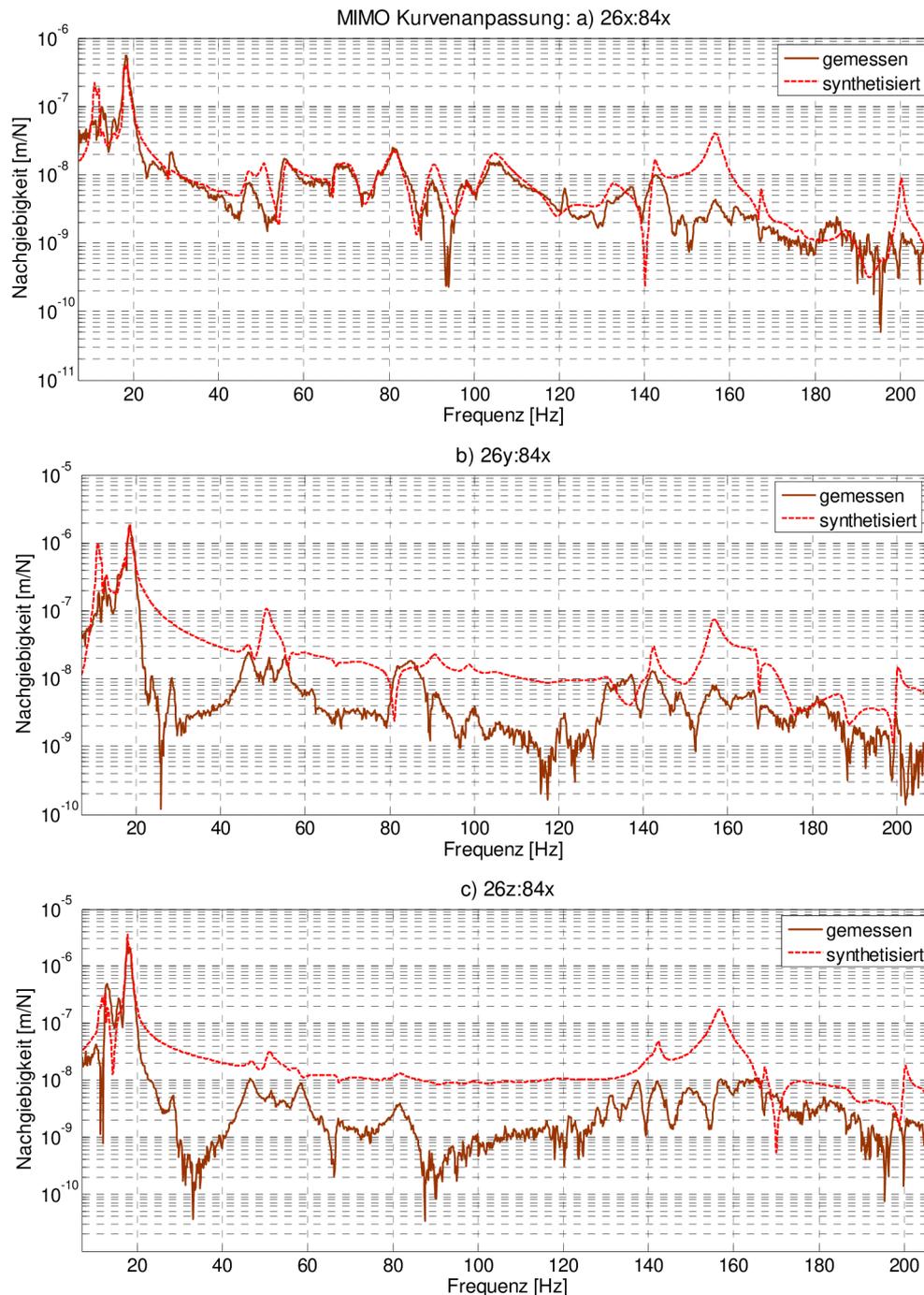


Abbildung 5.16: Kurvenanpassung im p26 auf der Strebe 1 (Referenz 2, zweite MIMO)

Die Kurvenanpassung der beiden Referenzen ist in der Abbildung 5.15 dargestellt. Das Synthetisieren im ersten Referenzpunkt entspricht den gemessenen Daten gut. Eine Ver-

besserung der Residuenabschätzung bis 110 Hz ist bemerkbar. Im Bereich der besten Moden ist das Synthetisieren sehr gut. In den Frequenzen von 110 Hz treten dennoch gleiche Abweichungen wie in der SIMO-Analyse auf. Der Grund dafür liegt sicher in der ungünstigen Anregung. Die Kurvenanpassung der auf die erste Referenz bezogenen Nachgiebigkeit weist in den sämtlichen Punkten einen ähnlichen Charakter auf. Die Kurvenanpassung der zweiten Referenz passt besser als im Falle der ersten Analyse. Keine deutlichen Moden, außer der um 140 Hz, kommen allerdings vor, wobei diese Moden eben schlecht abgeschätzt werden, und zwar vermutlich aufgrund ihres lokalen Charakters.

Die Abbildung 5.16 zeigt die Verläufe der Kurvenanpassung im p26 Punkt. Diese Verläufe beziehen sich auf die zweite Referenz. In der X-Richtung ist die Kurvenanpassung gut, da eine gute Anregung dieser Richtung erreicht wurde. Man kann im synthetisierten Verlauf die deutlichen Moden um 150 Hz sehen, die aus der zweiten Referenz kommen. Diese wurden allerdings nicht in den anderen Nachgiebigkeitsgängen aufgenommen. Das bestätigt wieder die Vermutung, dass es sich um die lokalen Moden handelt. In der Y- sowie Z-Koordinaten kam es zu keiner Anpassungsverbesserung im Vergleich zur ersten MIMO-Analyse.

5.2.4 Modenformen

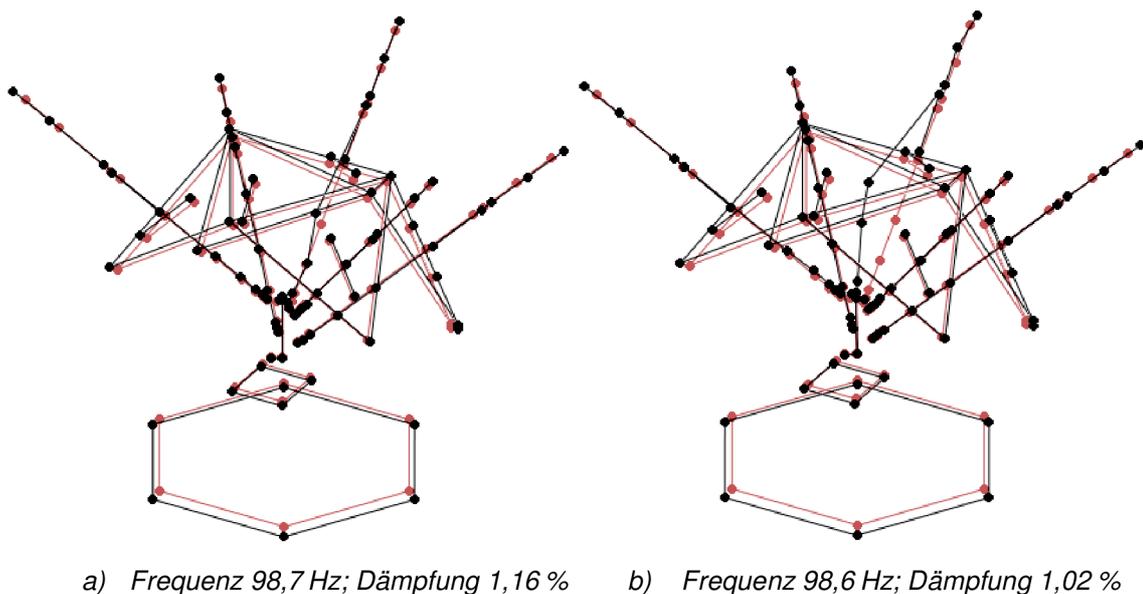


Abbildung 5.17: 98 Hz Modenformen der a) ersten MIMO b) zweiten MIMO

Kurz wird ein Vergleich der Modenformen zwischen beiden MIMO-Analysen vorgeführt. Folgende Beispiele bestätigen die in der SIMO-Analyse gezogenen Schlussfolgerungen hinsichtlich der Modenformen. Die ähnlichen Moden wie in der SIMO-Analyse sind vorgestellt. Aus dem Bereich der besten Moden ist der Mode bei der 98 Hz in der Abbildung 5.17 dargestellt. Die Modenformen sind fast identisch und stimmen auch mit der SIMO-Analyse überein. Vier unterschiedliche Analysen bestätigen dieses Verhalten, daher wirkt dieser Mode glaubwürdig. Weiter wird der 200 Hz Mode (Abb. 5.18) ausgewählt, der ungefähr gleiche Frequenz- und Dämpfungsabschätzung wie die SIMO-Analyse besitzt.

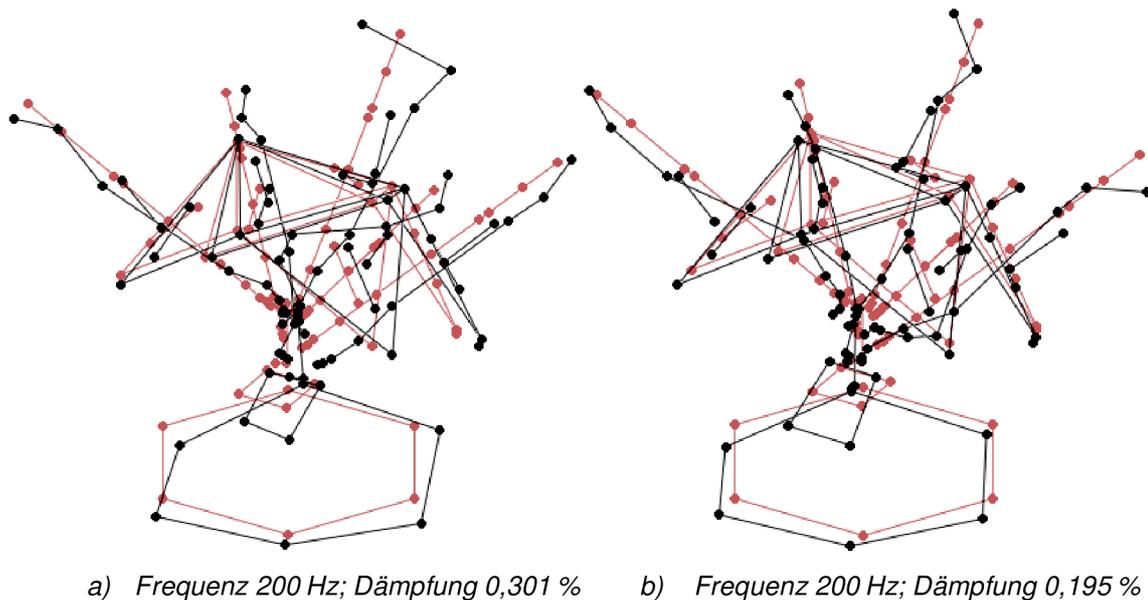


Abbildung 5.18: 200 Hz Modenformen der a) ersten MIMO b) zweiten MIMO

Die Residuenabschätzung war nie im Bereich von 190 Hz befriedigend, da sie nicht den gemessenen Daten entspricht. Ein Vergleich dieser Modenform in allen vier Analysen gibt keine beweiskräftigen Informationen. Die Modenformen sind stark unterschiedlich, da die Residuen aller FRF schlecht abgeschätzt wurden. Das reale Verhalten der Struktur bleibt deswegen unbekannt. Aus diesem Vergleich ergibt sich, dass eine hochwertige Kurvenanpassung für die Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse notwendig ist. Im DVD-Anhang gibt es die Animationen aller hier vorgestellten Modenformen.

5.2.5 Vergleich der MIMO-Analysen

Aus dem Vergleich der MIMO-Analysen kann man folgende Schlussfolgerungen ziehen: Die Kohärenz ist eindeutig besser in der ersten Analyse, die die zweite Referenz auf dem Gestell besitzt. Die Kurvenanpassung der ersten Referenz ist mindestens im Bereich bis 190 Hz besser. Die Kurvenanpassung der auf die zweite Referenz bezogenen FRF ist jedoch miserabel. In der zweiten Analyse kann man eine gute Kurvenanpassung nur im Bereich der stabilen Moden betrachten. In dieser Analyse sind also einige Kohärenzverläufe nicht beweiskräftig. Außerdem fallen die Verläufe noch schlechter als in der SIMO-Analyse aus. Der Grund dafür liegt in der Anregungsrichtung der zweiten Referenz, da es der einzige Unterschied der Analysen ist. Eine große Verzerrung der Datei, aufgrund der Erregerrückkoppelung, ist nicht möglich. Die mittels der zweiten Referenz entdeckten Moden bestätigen sich nachweislich nicht, was eine exakte Interpretierung der Daten verhindert. Der Optimierungsvorschlag hinsichtlich der Referenz auf dem Tisch war nicht erfolgreich. Die FRF- und Kohärenzverläufe der zwei zusätzlichen Punkte werden im DVD-Anhang zur Einsicht beigefügt.

5.3 Quantitativer Vergleich der Analysen

Aufgrund des Umfangs von vier gemessenen Dateien ist ihr objektiver und exakter Vergleich schwierig. Für eine gemeinsame Bewertung der Kurvenanpassungsqualität werden in diesem Kapitel Cross „Signature Correlation“ (CSC) Kriterien angewendet. Diese kann man in „Cross Signature Assurance Criterion“ (CSAC) und „Cross Signature Factor“ (CSF) Kriterium unterteilen. Die Formel des CSAC-Kriteriums ist [32]:

$$CSAC(w_k) = \frac{|\alpha_{X_i}^H(\omega_k)\alpha_{A_i}(\omega_k)|^2}{(\alpha_{X_i}^H(\omega_k)\alpha_{X_i}(\omega_k))(\alpha_{A_i}^H(\omega_k)\alpha_{A_i}(\omega_k))}, k = 1, 2, \dots, Nf \quad (5-1)$$

α_X und α_A sind die FRF-Verläufe, die man gegenseitig vergleicht. Jeder Frequenzpunkt ist mittels ω_k bezeichnet und Nf entspricht der Anzahl von gemessenen Spektrallinien. Dieses Kriterium stellt die Korrelation zwischen den FRF-Formen auf jeder Spektrallinie dar. Demgegenüber rechnet das CSF-Kriterium auch mit Diskrepanzen in Amplituden der FRF und nicht nur mit der FRF-Form wie CSAC. Diese Kriterien nehmen die Werte von 0 bis 1 bzw. von 0 bis 100% an. Je näher der Wert der Eins ist, desto besser ist die gegenseitige Korrelation. Die Formel des CSF-Kriteriums lautet [32]:

$$CSF(\omega_k) = \frac{2|\alpha_{X_i}^H(\omega_k)\alpha_{A_i}(\omega_k)|}{(\alpha_{X_i}^H(\omega_k)\alpha_{X_i}(\omega_k)) + (\alpha_{A_i}^H(\omega_k)\alpha_{A_i}(\omega_k))}, k = 1, 2, \dots, Nf \quad (5-2)$$

Die Abbildung 5.19 stellt die CSC-Kriterien der drei durchgeführten Analysen dar. Im Rahmen dieser Kriterien werden die 200 Hz SIMO-Analyse und beide MIMO-Analysen verglichen.

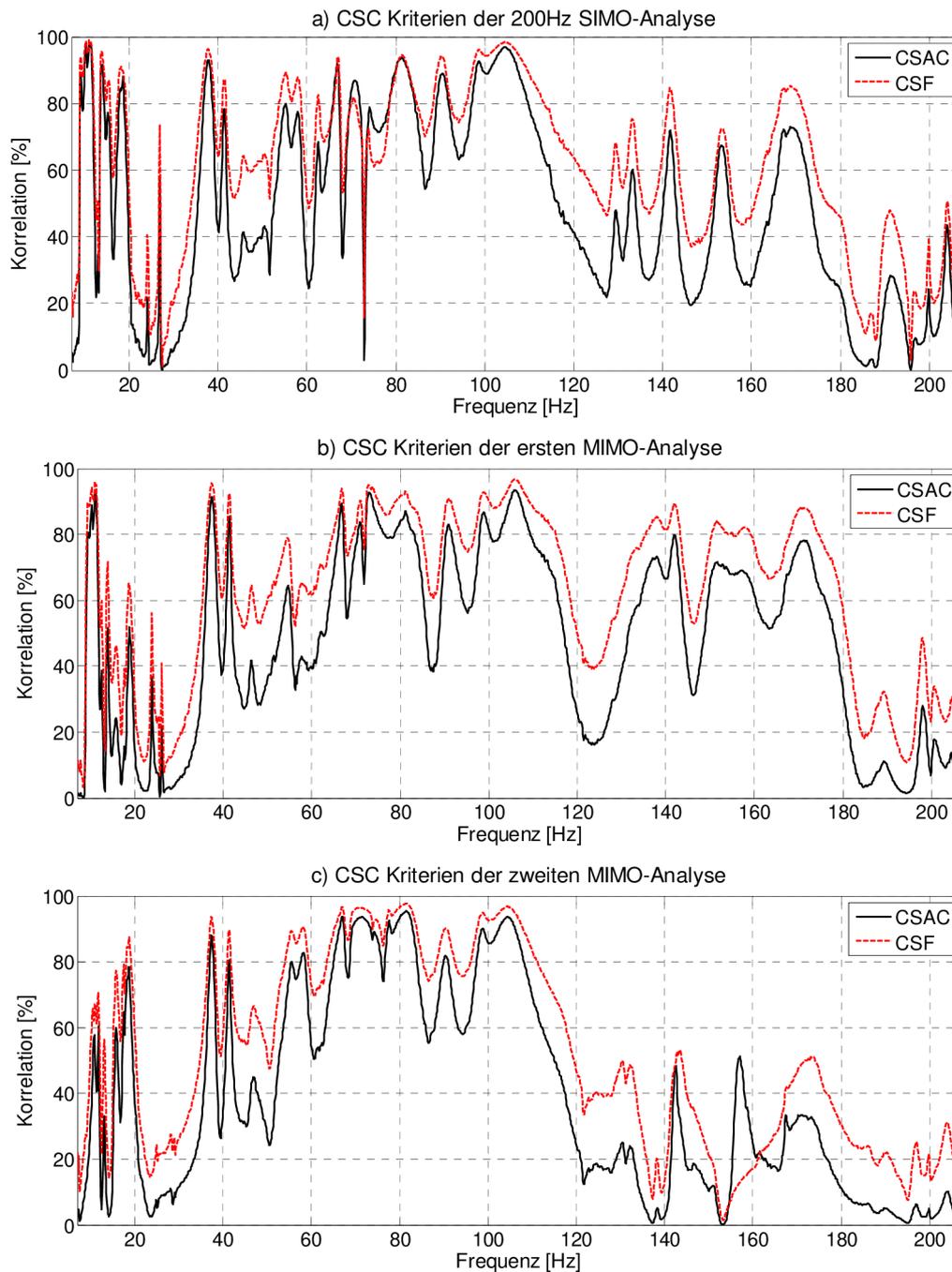


Abbildung 5.19: CSC-Kriterien der durchgeführten Analysen

Die SIMO-Analyse ist im Bereich bis 20 Hz sehr erfolgreich. Im Frequenzbereich zwischen 20 und 40 Hz bringt keines der Analysen befriedigende Ergebnisse. Im Bereich der besten Moden bis 110 Hz ist die Situation ausgeglichen. Dennoch sind die MIMO-Analysen vor allem die zweite exakter als die SIMO-Analyse. Im Bereich von 120 Hz bestätigen sich die Schlussfolgerungen, dass die erste MIMO-Analyse die besten Ergebnisse liefert, während die zweite MIMO-Analyse hingegen schlimmer ist als die SIMO-Analyse. Anlässlich zur Veranschaulichung und Vergleich sind die CSF-Kriterien der beiden Analysen in einem Diagramm in der Abbildung 5.20 dargestellt. Dieses Diagramm bestätigt, dass der beste Einklang zwischen den gemessenen und den berechneten Daten von 20 Hz in der ersten MIMO-Analyse liegt.

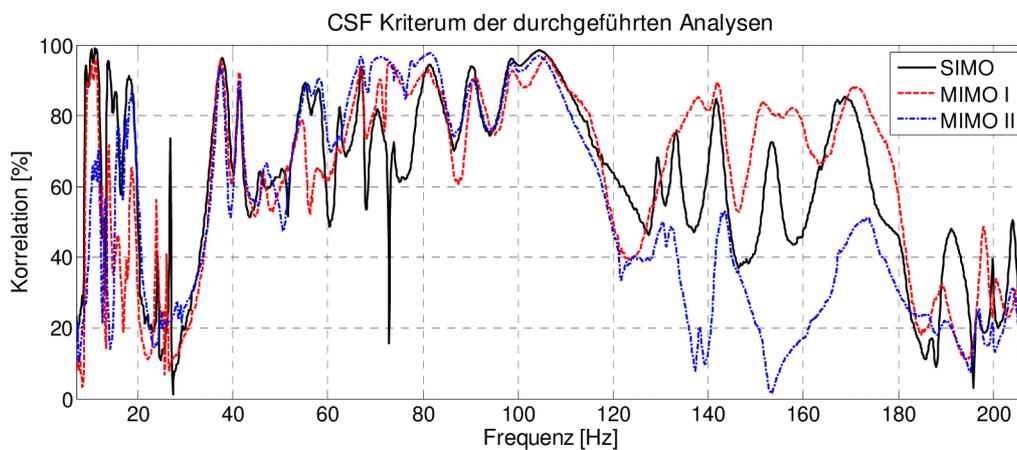


Abbildung 5.20: Vergleich der CSF-Kriterien

In der MIMO-Analyse handelt es sich um den Vergleich beider Referenzen. Es fällt auf, dass die zweite Referenz auffällig schlechter ist als die erste. Zur Illustration wird in der Abbildung 5.21 das CSF-Kriterium einzeln für beide Referenzen der ersten MIMO-Analyse angeführt.

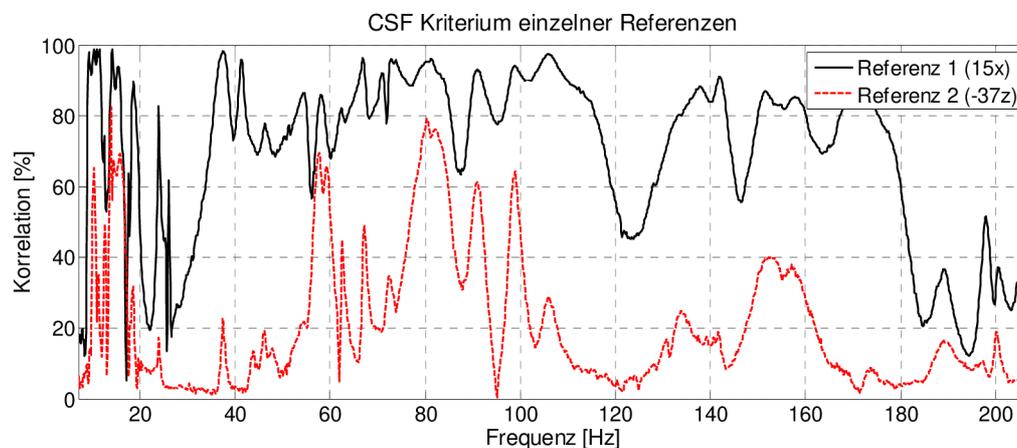


Abbildung 5.21: CSF-Kriterium einzelner Referenzen

Dies zeigt deutlich, dass die erste MIMO-Referenz im ganzen Bereich besser ist als in der SIMO-Analyse synthetisiert. Leider gibt die zweite Referenz selbständig keine relevanten Informationen. Sowohl die CSF-Kurven der zweiten MIMO-Analyse verlaufen analog. Der Zusammenhang besteht darin, dass die erste Referenz die 50 Punkte auf den Streben und 3 auf der Spindel eindeutig besser anregt als die zweite Referenz. Noch dazu unterstützt die globale Parameterabschätzung ebenfalls die erste Referenz.

5.4 Zusammenfassung der MIMO-Analyse

Im Rahmen der bestmöglichen Untersuchung der MIMO-Analyse wurden zwei verschiedene Einstellungen überprüft. In der ersten Einstellung wird die Struktur durch den Referenzpunkt auf dem Gestell erregt und zwar teilweise in der Y- sowie Z-Richtung der Maschinenkoordinaten. Die zweite MIMO-Analyse besitzt den zweiten Referenzpunkt auf dem Maschinentisch, wobei dieser Punkt vor der Referenz auf der Spindel bevorzugt wurde. Aus dem Vergleich beider Analysen ergibt sich, dass die erste Einstellung bessere Ergebnisse bringt, dennoch sind sie ziemlich kontrovers. Es scheint, dass die zweite Referenz nur als ein Unterstützungsmittel zu einer präziseren Kurvenanpassung der ersten Referenz dient. Eine Vertrauenswürdigkeit der mittels der zweiten Referenz aufgedeckten Moden kann man nicht einfach bestätigen, da beide Analysen in diesem Hinblick nicht übereinstimmen. Trotzdem kann man einige Vorteile betrachten, somit einige Schlüsse aus der Recherche bestätigen:

- Bessere Anregung der Struktur
- Konsistentere Daten und somit eine bemerkbare Verbesserung der Kohärenz- sowie der auf die erste Referenz bezogenen Nachgiebigkeitsverläufe
- Verbesserung der Kurvenanpassung der auf die erste Referenz bezogenen Nachgiebigkeitsgänge

Eine Entdeckung von „Coupled“ sowie „Repeated“ Moden kann man jedoch nicht eindeutig beweisen, auch wenn einige „Coupled“ Moden aufgedeckt wurden. Die Ergebnisse beider MIMO-Analysen gehen in der zweiten Referenz mehr oder minder auseinander, deswegen sind diese Moden nicht nachweisbar. Die im Kapitel 2 gezogenen Schlussfolgerungen hinsichtlich der Entdeckung der „Repeated“ und „Coupled“ kann man nicht im Rahmen dieser Arbeit bestätigen. Moden Eine Erhaltung von hochwertigen und beweis-

kräftigen FRF im zweiten Referenzpunkt wurde unter anderem durch folgende Fakten limitiert: nicht-lineare Struktureigenschaften und ungünstige Referenzpunktlage.

Für eine erfolgreiche MIMO-Messung muss man Überlegungen über folgende Aspekte anstellen:

- Eine günstige Auswahl der Referenzpunkte gehört zu einer Aufgabe von hoher Bedeutung. Die Erregungsrichtungen sollten unterschiedlich sein. Die in der Struktur auftretenden Moden sollten mindestens in einer Referenz bemerkbar sein. Keine lokalen Moden sind wünschenswert. Eine niedrigere Steifigkeit im Erregungspunkt gehört zu einem Vorteil, damit eine bessere Anregung von entfernten Punkten möglich wäre und es zu keinem Signalverlust in der Struktur gelangt (z. B. aufgrund des nicht-linearen Verhaltens)
- Unabhängigkeit beider Erregungssignale ist zu gewährleisten
- Man muss die günstige Einstellung des Kraftpegels beider Shaker berücksichtigen, um eine gegenseitige negative Beeinflussung der Signale soweit als möglich zu vermindern
- Äußere Störungsquellen bzw. Fehlerquellen sind zu beachten (z. B. Befestigung der Sensoren)

Mit der Auswahl von Referenzpunkten hängt auch ein Nachteil der MIMO-Analyse zusammen. Dies ist Fall der zweiten MIMO-Analyse. Bei der schlechten Auswahl des Referenzpunktes kann es zu einer Anregung der lokalen Moden und somit einer negativen Verzerrung der Daten gelangen. In manchen Strukturen ist es schwierig, zwei günstige Referenzpunkte zu finden und deswegen kann man nicht solches Verhalten vermeiden. Im Falle der zweiten MIMO-Analyse bringt die zweite Referenz vor allem in hohen Frequenzen mehr Schaden als Nutzen. Zu den weiteren Negativen gehört der Aufwand an Messtechnik und teilweise an Bedienung, da der FFT-Analysator an der TU-Chemnitz zur MIMO-Analyse nicht geeignet ist.

Die schlechte Kurvenanpassung der auf die zweite Referenz bezogenen Nachgiebigkeitsgänge ergibt sich vermutlich unter anderem aufgrund der globalen Parameterabschätzung. 53 von 82 Punkten liegen nämlich auf den Streben und der Spindel, wobei diese Punkte sicher besser durch den ersten Shaker angeregt werden. Der zweite Shaker ist de facto durch die Gelenke getrennt, deswegen drückt sich sein Signal auf den Streben nicht so deutlich aus.

Eine Beschränkung der MIMO-Analyse an der TU-Chemnitz liegt in der Datenauswertung. Nur eine Kombination von CMIF und Orthogonal Polynomial Methode in ME'scopeVES 4.0 ist in der Lage, vernünftige Ergebnisse zu geben.

Die Frage indessen ist, ob die MIMO-Analyse bessere Ergebnisse als zwei getrennte SIMO-Analysen mit gleichen Referenzpunkten gibt. Bei der untersuchten Struktur scheint nicht wahrscheinlich, dass zwei getrennte SIMO-Analysen besser sind. Die selbständige zweite Referenz kann nicht die Struktur befriedigend anregen, damit die FRF beweiskräftig werden (siehe Kapitel 3.3.4; Test der Linearität; FRF 15x:84x). Die Nachgiebigkeitsgänge sind immer sehr verzerrt. Demgegenüber sind die FRF-Verläufe bei der gleichzeitigen Anregung beider Referenzen und der Anwendung von H_T -Kalkulator für die MIMO-Analyse eindeutig besser, da H_T -Kalkulator die beiden Referenzen gleichzeitig und gegenseitig in einer Matrix berechnet.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der Recherche wird ein Vergleich der SIMO- und MIMO-Analyse präsentiert, wobei die Aufmerksamkeit auf den praktischen Unterschieden im Vorgehen (Diskretisierung, Signalbearbeitung, Modaldatenermittlung) gelegt wird. Die MIMO-Analyse verfügt über zusätzlichen Datenauswertungsmethoden: MMIF, CMIF und Stabilitätsdiagramm.

Nachfolgend wurden die Ergebnisse der zwei unterschiedlichen SIMO-Analysen vorgestellt. Diese Analysen sollten eine Aufklärung über das Strukturverhalten und die Fehlerentstehung sowie eine Grundlage für den Vergleich mit der MIMO-Analyse geben. SIMO-Analyse zeigt, dass eine günstige Einstellung des Kraftpegels von erheblicher Bedeutung ist. Die vorgelegte Struktur besitzt viele Verbindungselementen z. B. Spindelträger, Gelenke mit Kugelgewinden usw., wo es ein Spiel gibt oder eine Reibung auftritt, und somit weist die Struktur das stark nicht-lineare Verhalten auf. Aus diesem Grund ist notwendig, eine günstige Kraftamplitude hinsichtlich des möglichst linearen Strukturverhaltens zu finden. Die Umgebungsbedingungen kommen ebenfalls als ein erheblicher Entscheidungsfaktor für die Datenqualität vor.

Ein Vorgehen zur Durchführung einer MIMO-Analyse wurde erarbeitet und erfolgreich geprüft. Die bestehende Technik reicht zur MIMO-Messungen, dennoch sind noch einige Aspekte zu verbessern. Aufgrund des fehlenden zweiten Signalgenerators im FFT-Analysator wurde für den zweiten Shaker ein externer Generator entwickelt. Das zweite Signal wurde mittels des zweiten Rechners in LabVIEW generiert. Die Ermittlung der Modalparameter erfolgte in ME'scopeVES 4.0. Die CMIF im Zusammenwirken mit Ortho Polynomial Methode zeigten sich als die einzige Kombination, die die MIMO-Analyse auswerten kann. Die anderen Methoden brachten schlechte Parameterabschätzungen.

Zwei durchgeführten MIMO-Analysen mit verschiedenen Referenzen brachten gemischte Ergebnisse. Falls man die Kurvenanpassungsqualität als ein Maßstab für Analysenqualität auffasst, kann man die Analyse so bewerten: Während die erste MIMO-Analyse bessere Ergebnisse in der ersten Referenz im ganzen Frequenzbereich als die SIMO-Analyse gibt, sind die abgeschätzten Modalparameter der zweiten MIMO-Analyse für die erste Referenz nur im Bereich von 40 bis 110 Hz vertrauenswürdig. Die Moden in diesem Bereich wurden mittels alle durchgeführten EMA bestätigt. Die Moden außer diesem Bereich ändern sich hauptsächlich in der Residuenabschätzung. Die EMA bringt von 140 Hz keine zuverlässigen Daten. Die Kurvenanpassung in der zweiten Referenz wurde in keiner

MIMO-Analyse befriedigend. Die durch diese Referenz abgeschätzten Moden kann man nicht richtig finden.

Die Auswahl der Referenzpunkte sowie der Erregungsrichtung zeigte sich als der sehr wichtige Aspekt der MIMO-Analyse. Die Erregungsrichtung in der ersten MIMO-Analyse (teilweise Y- sowie Z-Richtung der Maschinenkoordinaten) ist zugunsten der Parameterabschätzung. Andererseits bringt die gleichzeitige Erregung in den beinahe übereinstimmenden Koordinaten eine Komplikationen aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der Erregungssignale. Die durch die zweite Referenz abgeschätzten Moden werden im Rahmen dieser Arbeit nicht nachweislich bestätigt, da die Kurvenanpassung der auf diese Referenz bezogenen FRF in beiden MIMO-Analysen nicht beweiskräftig wird. Die Lage der zweiten Referenz ist in beiden Analysen ungünstig, da die Kraftübertragung zwischen der Referenz und den Punkten auf den Streben durch die Struktureigenschaften (steifes Gestell, nicht-lineare Gelenke usw.) verletzt ist.

Auch wenn der Zweck dieser Arbeit in der Bewertung der untersuchten Struktur nicht liegt, muss man feststellen, dass die Messungen wurden durch das stark nicht-lineare Verhalten gezeichnet. Die erste MIMO-Analyse bringt zwar die Verbesserung der Strukturanregung in mehreren Koordinaten, aber die Nicht-Linearitäten machen eine Erhaltung von hochwertigen Daten in der zweiten Referenz unmöglich. Dazu ist noch eine äußere Störung und mögliche Erregerrückkoppelung dazurechnen.

Die Ergebnisse der ersten MIMO-Analyse sind trotzdem gut, da es gezeigt wurde, dass mit der bestehenden Messtechnik MIMO-Analyse durchführbar ist, wobei die Ergebnisse in der ersten Referenz bei einer günstigen Referenzauswahl besser werden können. Trotzdem gibt es noch einige Herausforderungen:

- Durchführung einer MIMO-Analyse mit der günstigeren Referenzlage auf der Spindel, auch wenn die Zugänglichkeit des Innenraumes beschränkt wird
- Durchführung einer MIMO-Analyse an einer anderen Maschine, die konventionelle Bauweise besitzt
- Vergleich der MIMO-Ergebnisse mit der FEM-Analyse, vor allem der durch die zweite Referenz erhaltenen Moden
- Technische Angelegenheiten als die Verbesserung der MIMO-Auslösung (Trigger) oder die Anwendung eines stärkeren Shakers

7 Literaturverzeichnis

- [1] Dossing, O. : Strukturen Prüfen - Teil 1: Mechanische Beweglichkeits-Messungen, Naerum: Brüel & Kjaer, 1989
- [2] Richardson, M. ; Schwarz B. : Experimental modal analysis, Orlando: CSI Reliability Week, 1999
- [3] Aitavable P. : MODAL SPACE: In Our Own Little World, SEM & Blackwell Publishing, 2007
- [4] Ewins, D. : Modal Testing: Theory, Practice and Application, Hertfordshire: Research Studies Press, 2000
- [5] N.N. , National Radio Astronomy Observatory: Fourier transforms. 27. 8. 2012, <http://www.cv.nrao.edu/course/ast534/FourierTransforms.html>
- [6] Maia, N. ; Silva J. et al. : Theoretical and Experimental Modal Analysis, Taunton: Research Studies Press, 1997
- [7] Richardson, M. : Fundamentals of the Discrete Fourier Transform, Sound & Vibration Magazine, 1978.
- [8] Richardson, M. ; Formenti, D. : Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials, Orlando: 1st IMAC Conference, 1982
- [9] Neugebauer, R. ; Kolouch, M. ; Richter, M. et al. : Fehlerquellen bei einer Modalanalyse, Werkstattstechnik online, 2009
- [10] Richardson, M. ; Formenti, D. : Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials (twenty years of progress), Los Angeles: 20th IMAC Conference, 2002
- [11] Dossing, O. : Strukturen Prüfen - Teil 2: Modalanalyse und Simulation, Naerum: Brüel & Kjaer, 1989

- [12] Herlufsen, H. : Modal Analysis using Multi-reference and Multiple-Input Multiple-Output Techniques (Application Note), Naerum: Brüel & Kjaer, 2002
- [13] N. N. : Schwingungsmessung, Bremen: Brüel & Kjaer, 1986
- [14] Füllekrug, U. : Survey of modal parameter estimation methods in experimental modal analysis, London: 5th IMAC Conference, 1987
- [15] Richardson, M. : Global frequency and damping estimates from frequency response measurements, Los Angeles: 4th IMAC Conference, 1986
- [16] Richardson, M. ; Formenti, D. : Global Curve Fitting of Frequency Response Measurements using the Rational Fraction Polynomial Method, Orlando: 3rd IMAC Conference, 1985
- [17] Richardson, M. : Modal Testing using Multiple References, London: 5th IMAC Conference, 1987
- [18] N. N. : Multiple Reference Curve Fitting To Find Repeated Roots, Scotts Valley: Vibrant Technology, Inc., 2000
- [19] N. N. : Multiple Reference Curve Fitting To Find Closely Coupled Modes, Scotts Valley: Vibrant Technology, Inc., 2001
- [20] He, J. ; Fu, Z. : Modal Analysis, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001
- [21] Weisstein, E. W. : Singular value decomposition. 27. 8. 2012,
<http://mathworld.wolfram.com/SingularValueDecomposition.html>
- [22] Rades, M. : A comparison of some mode indicator functions, Mechanical Systems and Signal Processing, 1994
- [23] N. N. : ME'scopeVES 5.0 Operating Manual, Volume I - Tutorial, 2007
- [24] Williams, R. ; Crowley, J. : The multivariate mode indicator function in modal analysis, Orlando: 3rd IMAC Conference, 1985
- [25] Shih, C. Y. : Complex Mode Indication Function and its Applications to Spatial Domain Parameter Estimation, Las Vegas: 7th IMAC Conference, 1989

- [26] Auweraer, H. ; Leuridan, J. : Multiple Input Orthogonal Polynomial Parameter Estimation, London: 5th IMAC Conference, 1987
- [27] N. N. : Using the Z-Polynomial Method with the Stability Diagram, Scotts Valley: Vibrant Technology, Inc., 2004
- [28] N. N. : Informationstafel METROM P800, Chemnitz: IWU TU-Chemnitz, 2011
- [29] Allemang, R. : An overview of MIMO-FRF excitation/averaging/processing techniques, Journal of Sound and Vibration, 2003
- [30] N. N. : Schwingprüfung, Bremen: Brüel & Kjaer, 1985
- [31] N. N. : Handbuch Leistungsverstärker Typ 2707, Naerum: Brüel & Kjaer, 1983
- [32] N. N. : FEMtools: Model Updating Theoretical Manual Version 3.2, Leuven: Dynamic Design Solutions, 2007

8 Anlagenverzeichnis

A – Anlage: Koordinaten aller Messpunkte (SDOF) inkl. TCP

B – Anlagen: Modenverzeichnisse

- B1: Modenverzeichnis der SIMO-Analyse; 400 Hz
- B2: Modenverzeichnis der SIMO-Analyse; 200 Hz
- B3: Modenverzeichnis der MIMO-Analyse mit der Referenz auf dem Gestell
- B4: Modenverzeichnis der MIMO-Analyse mit der Referenz auf dem Tisch

9 Anlagen

Anlage A: Koordinaten aller Messpunkte (SDOF) inkl. TCP

Strebe 1	Coordinate	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Eulerwinkel	
Global coordinate system	X	0,1698	0,1894	0,2187	0,3335	0,4924	0,7323	0,9389	0,982	1,1316	1,2812	Nutation	26,29
	Y	-0,0963	-0,0662	-0,0212	0,1549	0,3985	0,7666	1,0835	1,1496	1,3791	1,6086	Präzision	326,29
	Z	0,6828	0,7005	0,7271	0,8309	0,9746	1,1916	1,3785	1,4175	1,5529	1,6882	Eigenrotation	90
Local coordinate system		0	0,04	0,1	0,3344	0,6588	L+0,01	L+0,432	L+0,52	L+0,8256	L+2,27		
Strebe 2	Coordinate	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Eulerwinkel	
Global coordinate system	X	0,0228	-0,0017	-0,0384	-0,2108	-0,4383	-0,7384	-0,9969	-1,0508	-1,1802	-1,3674	Nutation	21,5
	Y	-0,1066	-0,0786	-0,0366	0,1606	0,4208	0,764	1,0596	1,1214	1,2693	1,4834	Präzision	41,16
	Z	0,7323	0,7469	0,7689	0,8721	1,0082	1,1878	1,3424	1,3747	1,4522	1,5642	Eigenrotation	90
Local coordinate system		0	0,04	0,1	0,3815	0,753	L+0,01	L+0,432	L+0,52	L+0,7314	L+2,27		
Strebe 3	Coordinate	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Eulerwinkel	
Global coordinate system	X	-0,015	-0,0455	-0,0913	-0,1972	-0,3718	-0,746	-1,0682	-1,1354	-1,5149	-1,7482	Nutation	37,93
	Y	-0,2291	-0,237	-0,2489	-0,2763	-0,3216	-0,4185	-0,5021	-0,5195	-0,6178	-0,6783	Präzision	104,53
	Z	1,0463	1,0709	1,1077	1,193	1,3335	1,6347	1,8941	1,9482	2,2537	2,4416	Eigenrotation	90
Local coordinate system		0	0,04	0,1	0,2387	0,4673	L+0,01	L+0,432	L+0,52	L+1,017	L+2,27		
Strebe 4	Coordinate	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Eulerwinkel	
Global coordinate system	X	0,2184	0,243	0,2798	0,3309	0,4374	0,7385	0,9979	1,052	1,4257	1,6135	Nutation	49,41
	Y	-0,2385	-0,2471	-0,2599	-0,2777	-0,3156	-0,4193	-0,5095	-0,5283	-0,6582	-0,7235	Präzision	250,83
	Z	0,9993	1,0296	1,0752	1,1384	1,2699	1,642	1,9624	2,0293	2,491	2,7231	Eigenrotation	90
Local coordinate system		0	0,04	0,1	0,1832	0,3564	L+0,01	L+0,432	L+0,52	L+1,1281	L+2,27		
Strebe 5	Coordinate	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Eulerwinkel	
Global coordinate system	X	0,0908	0,0875	0,0826	0,063	0,036	-0,0041	-0,0386	-0,0458	-0,0699	-0,0948	Nutation	35,94
	Y	-0,0771	-0,0449	0,0035	0,1969	0,4629	0,8576	1,1975	1,2684	1,5052	1,7513	Präzision	5,8
	Z	0,9523	0,9757	1,011	1,1519	1,3457	1,6333	1,881	1,9327	2,1053	2,2847	Eigenrotation	90
Local coordinate system		0	0,04	0,1	0,3402	0,6704	L+0,01	L+0,432	L+0,52	L+0,814	L+2,27		
* Local coordinate system bezeichnet der Abstand von Spindelgelenk bzw. Antriebsbasis													

Gelenk 1	Coordinate	oben	unten	Eulerwinkel	
Global coordinate system	X	0,6383	0,7773	Nutation	70,5287
	Y	0,6889	0,7692	Präzesion	142,2387
	Z	1,3797	0,9593	Eigenrotation	352,2389
Gelenk 2	Coordinate	oben	unten	Eulerwinkel	
Global coordinate system	X	-0,6383	-0,7773	Nutation	70,5287
	Y	0,6889	0,7692	Präzesion	217,7613
	Z	1,3797	0,9593	Eigenrotation	7,7611
Gelenk 3	Coordinate	oben	unten	Eulerwinkel	
Global coordinate system	X	-0,5626	-0,853	Nutation	41,8105
	Y	-0,3248	-0,4925	Präzesion	300,0001
	Z	1,754	1,454	Eigenrotation	0
Gelenk 4	Coordinate	oben	unten	Eulerwinkel	
Global coordinate system	X	0,5626	0,853	Nutation	41,8105
	Y	-0,3248	-0,4925	Präzesion	59,9999
	Z	1,754	1,454	Eigenrotation	0
Gelenk 5	Coordinate	oben	unten	Eulerwinkel	
Global coordinate system	X	0	0	Nutation	41,8103
	Y	0,6496	0,985	Präzesion	180
	Z	1,754	1,454	Eigenrotation	0

Spindel	Coordinate	Referenz	unten a.	oben	oben a.	TCP
Global coordinate system	X	0,0595	0,103	0,103	0,103	42
	Y	-0,288	-0,198	-0,278	-0,198	13
	Z	0,624	0,594	1,093	1,093	282,8/283

Tisch	Coordinate	1	2	3	4
Global coordinate system	X	-0,2	0,2	0,2	-0,2
	Y	-0,37	-0,37	0,03	0,03
	Z	0,33	0,33	0,33	0,33

Gestell	Coordinate	IKO1	IKO2	IKO3	IKO4	IKO5	IKO6	IKO7	IKO8
Global coordinate system	X	0	0,64	-0,64	1,0355	0	-1,0355	1,0355	-1,0355
	Y	-0,739	0,3695	0,3695	-0,5979	1,1957	-0,5979	0,5979	0,5979
	Z	1,9348	1,9348	1,9348	1,1957	1,1957	1,1957	0,739	0,739
Sechseck	Coordinate	1	2	3	4	5	6		
Global coordinate system	X	0,51777	1,03554	0,51777	-0,51777	-1,03554	-0,51777		
	Y	-0,89681	0	0,89681	0,89681	0	-0,89681		
	Z	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36		

Anlage B1: Modenverzeichnis der SIMO-Analyse; 400 Hz

Nummer	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]	Nummer	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]
1	9,07	2,16	28	141	0,81
2	10,4	2,11	29	142	1,11
3	12,1	3,12	30	151	1,3
4	12,4	3,61	31	157	0,65
5	13,8	1,12	32	161	0,411
6	15,6	3,08	33	165	0,867
7	16,5	2,04	34	167	0,101
8	21	0,871	35	171	0,966
9	25,8	1,69	36	180	1
10	30,4	0,294	37	184	0,244
11	36,9	1,47	38	186	0,22
12	41,1	0,993	39	192	0,923
13	45,1	1,06	40	197	0,616
14	53,5	1,21	41	200	0,131
15	56,2	1,25	42	212	0,5
16	60,7	1,25	43	219	0,628
17	61,9	0,858	44	223	0,619
18	67,1	0,753	45	226	0,582
19	71,3	0,738	46	231	0,457
20	78,9	0,841	47	235	0,572
21	83,5	2,13	48	242	0,529
22	89,9	1,46	49	245	0,259
23	98,4	1,21	50	256	0,71
24	105	2,34	51	259	0,0209
25	117	1,45	52	271	0,335
26	126	1,83	53	294	0,26
27	130	0,332	54	297	0,216

Anlage B2: Modenverzeichnis der SIMO-Analyse; 200 Hz

Nummer	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]	Nummer	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]
1	8,99	1,4	23	81,3	1,57
2	10,2	1,86	24	90,4	1,22
3	11,1	1,53	25	98,6	1,04
4	11,6	1,83	26	105,0	1,87
5	13,4	0,124	27	115,0	0,331
6	13,9	3,6	28	129,0	0,537
7	15,5	2,18	29	133,0	0,694
8	17,2	1,68	30	142,0	0,843
9	17,8	1,28	31	153,0	0,985
10	18,3	2,78	32	164,0	0,235
11	24,2	0,648	33	168,0	1,91
12	26,9	0,337	34	181,0	1,04
13	37,7	1,78	35	186,0	0,783
14	41,3	1,14	36	187,0	0,486
15	45,7	1,34	37	188,0	0,475
16	55,3	1,56	38	190,0	0,94
17	58,0	1,85	39	192,0	0,997
18	62,4	0,827	40	194,0	0,403
19	67,1	0,689	41	196,0	0,252
20	70,5	2,52	42	200,0	0,19
21	73,0	0,749	43	204,0	0,356
22	73,8	0,461			

Anlage B3: Modenverzeichnis der MIMO-Analyse mit der Referenz auf dem Gestell*

Nr. (Ref.)	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]	Nr. (Ref.)	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]
1 (2)	7,79	0,134	28 (1)	48,7	1,81
2 (1)	9,17	1,09	29 (1)	51,5	0,616
3 (2)	10,2	1,37	30 (1)	55,3	1,52
4 (1)	10,4	1,6	31 (2)	55,6	1,73
5 (2)	10,9	1,38	32 (1)	58	1,67
6 (1)	11,1	1,42	33 (2)	58,7	1,62
7 (2)	11,4	1,48	34 (1)	62,3	0,695
8 (1)	11,6	1,24	35 (1)	67	0,641
9 (1)	12,5	1,35	36 (1)	71,7	2,25
10 (2)	12,7	2,33	37 (1)	72,3	1,01
11 (2)	14,0	0,776	38 (1)	81,1	0,629
12 (1)	14,2	0,821	39 (1)	81,6	2,64
13 (1)	15,5	2,61	40 (1)	90,9	1,35
14 (2)	16,3	2,59	41 (1)	98,7	1,16
15 (1)	16,4	2,36	42 (1)	106,0	1,89
16 (2)	17,2	0,974	43 (1)	115,0	3,46
17 (1)	17,5	1,39	44 (2)	121,0	0,292
18 (2)	18,0	1,5	45 (1)	136,0	2,49
19 (1)	18,7	2,58	46 (1)	142,0	0,895
20 (2)	19,3	2,87	47 (1)	151,0	1,44
21 (1)	23,9	0,711	48 (1)	158,0	1,7
22 (1)	26,1	0,402	49 (1)	172,0	1,58
23 (1)	36,5	1,61	50 (1)	175,0	1,25
24 (1)	37,4	1,18	51 (1)	188,0	0,873
25 (1)	41,3	0,768	52 (1)	198,0	0,536
26 (1)	43,7	1,82	53 (1)	200,0	0,301
27 (1)	46,3	1,46	54 (1)	205,0	0,287

* markierte Moden sind mittels der zweiten Referenz ermittelt

Anlage B4: Modenverzeichnis der MIMO-Analyse mit der Referenz auf dem Tisch*

Nr. (Ref.)	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]	Nr. (Ref.)	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]
1 (1)	10,9	2,29	25 (1)	104	2,2
2 (1)	11,9	1,46	26 (1)	119	3,19
3 (2)	12,6	1,14	27 (1)	132	1,35
4 (1)	12,9	2,54	28 (1)	140	1,26
5 (1)	15,8	2,78	29 (2)	142	0,418
6 (1)	17,7	0,951	30 (1)	143	0,774
7 (2)	17,7	0,757	31 (1)	150	0,89
8 (1)	18,5	1,99	32 (1)	153	0,414
9 (2)	18,9	1,18	33 (1)	155	0,476
10 (1)	21,1	2,58	34 (1)	157	0,658
11 (1)	28,2	0,752	35 (2)	157	0,767
12 (1)	37,4	1,29	36 (1)	159	0,0778
13 (1)	41,4	0,92	37 (1)	165	1,36
14 (1)	46,8	1,97	38 (1)	167	0,113
15 (1)	50,7	1,56	39 (1)	167	0,203
16 (1)	55,6	1,44	40 (1)	171	2,18
17 (1)	58,1	1,78	41 (1)	174	1,12
18 (1)	62	0,934	42 (1)	177	0,393
19 (1)	67,1	0,712	43 (2)	187	0,697
20 (1)	71,3	3,24	44 (1)	190	1,01
21 (1)	77,6	0,422	45 (1)	196	0,53
22 (1)	81,3	1,95	46 (1)	200	0,195
23 (1)	90,5	1,46	47 (1)	204	0,592
24 (1)	98,6	1,02	48		

* markierte Moden sind mittels der zweiten Referenz ermittelt

10 Thesen

Bei der MIMO-Analyse ist die richtige Auswahl der Referenzpunkte sehr wichtig, andernfalls wird das Potenzial der Analyse nicht völlig ausgeschöpft. Die Erregungsrichtungen sollten unterschiedlich sein, um alle Koordinaten richtig anzuregen. Die Referenzlage muss gute Kraftübertragung auf alle Maschinenkomponenten ermöglichen.

Der Kraftpegel beider Schwingerreger muss günstig eingestellt werden, um die gegenseitige Beeinflussung der Signale zu vermeiden.

Die MIMO-Analyse ist bei der Einhaltung der Anforderungen in der Lage, bessere Modalparameterabschätzungen zu bringen.

11 Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.



Chemnitz den 28.08.2012

DVD-Anhang - Inhaltverzeichnis

Ordner	Beschreibung
• Ausarbeitung	Arbeit in Textform
• Aushang	Aushang im Schaukasten
• Multimedia	
○ Bilder/Tabellen	Abbildungen/Tabellen der Masterarbeit
○ Videos	Videos der Modenformen
• Messung PULSE	Gemessene Daten aller Analysen im PULSE und .uff Format
• Auswertung ME'scopeVES	Ausgewertete Daten aller Analysen und Diagramme der p01 und p72 Punkte
• Sonstige	
○ Koordinaten	Verzeichnis der Messkoordinaten
○ LabVIEW	Programm des Signalgenerators
○ Corel Draw	Abbildungen der Struktur und der Moden
○ Matlab	Programme zur Umsetzung der .uff Datei