

# Entwicklung einer Referenzstruktur für Ringversuche auf Vibrationstestständen

T. Sprowitz, A. Bäger, R. Jahnke  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Raumfahrtsysteme, 28359 Bremen  
Email: [tom.sproewitz@dlr.de](mailto:tom.sproewitz@dlr.de)

Es wurde eine Referenzstruktur zur Durchführung von Vergleichstests auf Vibrationstestständen entwickelt, um die Funktionsweise der im DLR verfügbaren Anlage in regelmäßigen Abständen zu testen und um Ringversuche initiieren zu können. Die bisher durchgeführten Tests wurden zur iterativen Verbesserung der Testdurchführung genutzt, da insbesondere im Bereich der Güte noch verhältnismäßig große Abweichungen zu verzeichnen sind.

## **Einführung**

Im Rahmen der Entwicklung und Qualifikation von Raumfahrtstrukturen und -komponenten sowie zur Validierung numerischer Strukturberechnungsmodelle sind mechanische Strukturtests durchzuführen. In der Raumfahrt stehen hierbei insbesondere dynamische Lasten im Fokus, da während des Starts, verursacht durch die Antriebe und die Eigendynamik der Raketen, Nutzlasten wie Satelliten diesen mechanischen Lasten ausgesetzt sind. In Bezug auf die hohen Entwicklungs- und Startkosten sowie die langen Realisierungszeiten von Raumfahrtmissionen muss durch Berechnung und Test sichergestellt werden, dass kein strukturelles Versagen während der Mission auftritt. Hierzu werden Raumfahrtstrukturen auf Vibrationstestanlagen bezüglich ihres Eigenschwingverhaltens sowie hinsichtlich ihrer Reaktion auf Sinus- bzw. Rauschlasten untersucht. Die Anforderungen bzgl. eines sicheren Betriebs der Anlage, um Schäden durch fehlerhafte Tests zu vermeiden und die Korrektheit der Testergebnisse sicherzustellen sind hierbei sehr hoch. Daher fordern Kunden zunehmend den Nachweis einer Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025.

Die Zertifizierung nach DIN EN ISO/IEC 17025 durch die Deutsche Akkreditierungsstelle fordert Ringversuche oder als Alternative Eignungs- bzw. Referenztests in regelmäßigen Abständen, um eine gleichbleibende Qualität von Testergebnissen sicherzustellen. Zu diesem Zweck wurden im mechanisch-dynamischen Testlabor der Abteilung Systemkonditionierung des DLR Instituts für Raumfahrtsysteme in Bremen, in dem ein elektrodynamischer

Schwingprüfstand betrieben wird, ein Referenztest mit zugehöriger Referenzstruktur entworfen und erste Referenztests durchgeführt.

Das Laboratoria De Nayer präsentierte 2012 auf dem von der Confederation of European Environmental Engineering Societies (CEEES) durchgeführten European Reliability and Environmental Testing Connected Seminar Resultate eines Ringversuchs, an dem sich insgesamt drei Testeinrichtungen beteiligten [1].

Zur Durchführung wurde eine Teststruktur mit einem beidseitig fest eingespannten Balken entworfen, wie in Abb. 1 dargestellt. Platten verschiedener Dicke und unterschiedlichen Materials können auf dieser Struktur appliziert werden. Testvorhersagen wurden mittels analytischer Formeln und der Finiten Elemente Methode (FEM) durchgeführt.

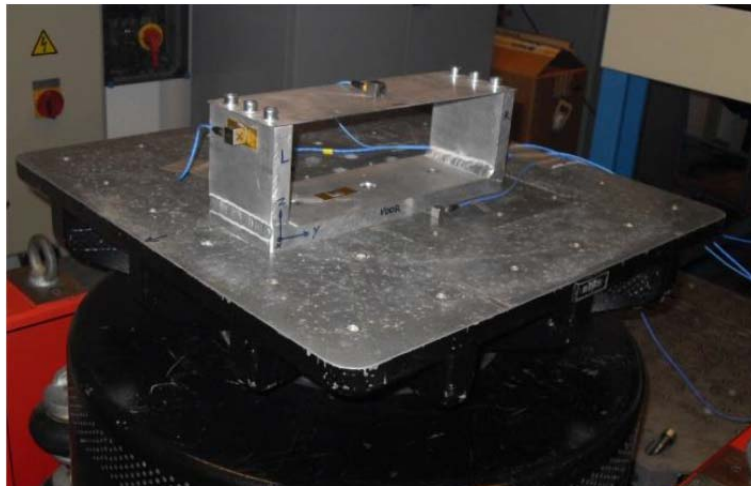


Abb. 1 Teststruktur des Laboratoria De Nayer für Ringversuche [1]

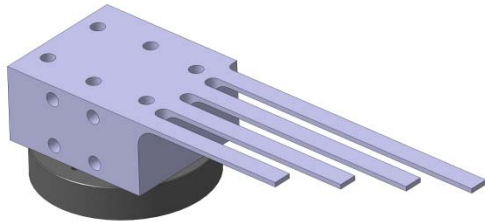
Der Vergleich der experimentell ermittelten Ergebnisse zeigte für eine 3 mm dicke Kupferplatte und eine 5 mm dicke Aluminiumplatte sehr gute Übereinstimmungen. Hierbei befanden sich die Resultate innerhalb eines mit Unsicherheiten versehenen Bandes um einen Frequenzmittelwert. Für eine getestete 1.5 mm dicke Aluminiumplatte lagen die Ergebnisse außerhalb. Hierbei konnte keine zufriedenstellende Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen den Laboren erzielt werden.

### **Entwurf der Referenzstruktur und Testvorhersage**

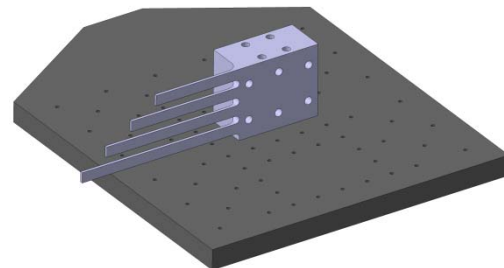
Der Entwurf der Referenzstruktur für die Vergleichstests im Rahmen der Akkreditierung ist angelehnt an die Arbeiten des Laboratoria De Nayer in Belgien.

Der am DLR verfolgte Ansatz ist eine Teststruktur mit vier einseitig fest eingespannten Balken unterschiedlicher Länge, um eine bestimmte Anzahl von Eigenfrequenzen im typischerweise von der Raumfahrt untersuchten Frequenzbereich zwischen 5 Hz und 2000 Hz abzubilden. Weiterhin werden in der Raumfahrt im Test ermittelte strukturelle Überhöhungen zur Lastableitung für Subkomponenten genutzt, so dass neben dem Vergleich der Eigenfrequenzen auch die Güte von Interesse ist.

Die Teststruktur ist eine durch Fräsbearbeitung hergestellte, monolithische Struktur aus einer hochfesten Aluminiumlegierung Al-7075-T6. Der monolithische Ansatz wurde gewählt, um Unsicherheiten einer Einspannung durch Setzungen oder bei Umbauten komplett auszuschließen. Hierbei ist die Aufnahme auf dem Shaker-Adapter ein massiver Aluminiumklotz an dem sich die vier Biegebalken anschließen. Um Spannungsüberhöhungen in der Wurzel der Biegebalken zu vermeiden, wurden diese im Übergangsbereich mit einem ausreichend großen Radius versehen. Die Teststruktur kann in zwei verschiedenen Ebenen montiert werden, um Tests mit aufrechtstehendem Shaker und mit dem horizontal gelagerten Gleittisch durchführen zu können, wie in Abb. 2 zu sehen ist.



Struktur mit aufrechtstehendem Shaker



Struktur auf Gleittisch

Abb. 2 Entwurf der Teststruktur mit vier einseitig fest eingespannten Biegebalken in zwei Montagemoöglichkeiten

Unter der Annahme, dass das Teststrukturmaterial Aluminium ist und der Frequenzbereich bis 2000 Hz relativ homogen mit Eigenfrequenzen der Balken durchsetzt sein soll, wurden die geometrischen Abmessungen der Balken bestimmt. Mit Gleichung (1) zur Bestimmung der Biegeeigenfrequenzen eines einseitig fest eingespannten Balkens mit kontinuierlicher Massebelegung (siehe [2]) ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgelisteten Größen und Frequenzen.

$$f_n = A \sqrt{\frac{EI}{\mu l^4}} \quad (1)$$

- Hierbei ist:
- $f_n$  die zu ermittelnde Eigenfrequenz [Hz]
  - $A$  einheitenloser Frequenzkoeffizient (3.52, 22.0, 61.7, 121.0)
  - $E$  E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]
  - $I$  Flächenträgheitsmoment [m<sup>4</sup>]
  - $l$  Länge des Balkens [m]
  - $\mu$  spezifisches Balkengewicht [kg/m]

Weiterhin sind in der Tab. 1 numerisch mittels der FEM ermittelte Werte aufgelistet, die quantitativ mit maximal 10% Abweichung gut korrelieren. Berechnungsergebnisse aus der FEM sind in Abb. 3 für den längsten Balken bildlich dargestellt.

Länge	Höhe	Frequenzkoeffizient	Eigenfrequenz analytisch	Eigenfrequenz FEM
[m]	[m]	[-]	[Hz]	[Hz]
0.15	0.005	3.52	180	163
		22.0	1123	1009
		61.7	3150	-
		121.0	6177	-
0.20	0.005	3.52	101	95
		22.0	632	588
		61.7	1772	1633
		121.0	3475	-
0.25	0.005	3.52	65	62
		22.0	404	383
		61.7	1134	1069
		121.0	2224	-
0.30	0.005	3.52	45	43
		22.0	281	270
		61.7	787	753
		121.0	1544	1469

Tab. 1 Eigenfrequenzen bis 2000Der Entwurf zeigt eine ausreichend gleichmäßige Verteilung der Eigenfrequenzen über den geforderten Frequenzbereich. Durch die monolithische Bauweise können Einspannungen vermieden werden, die in differentieller Bauweise, wie in [1] angewendet, zu Setzungserscheinungen führen könnten.

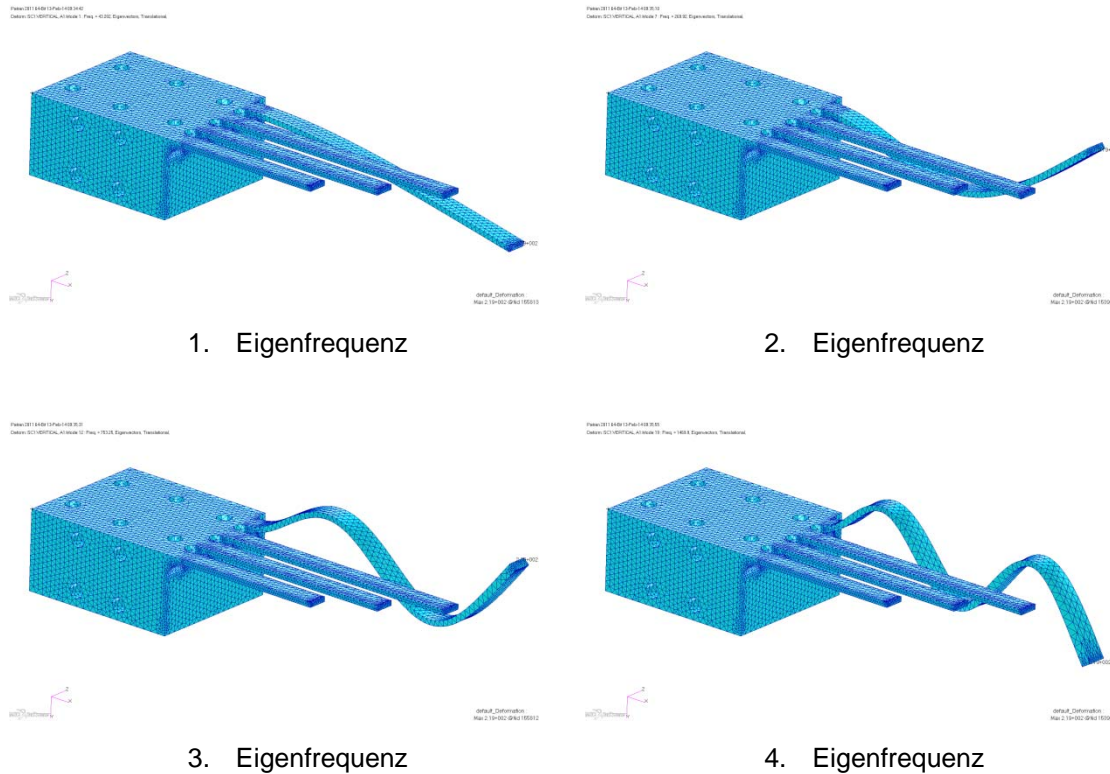
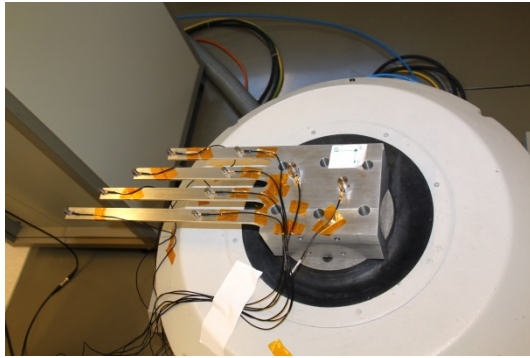


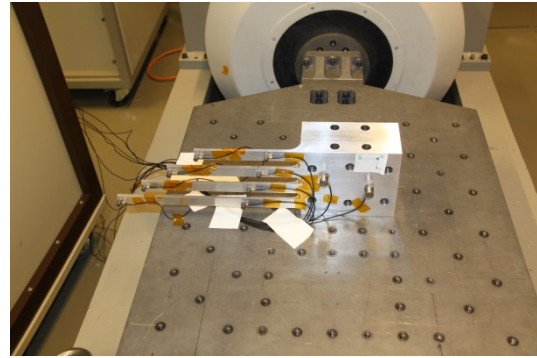
Abb. 3 Darstellung der ersten vier Eigenfrequenzen des längsten Balkens aus der FEM

### Testaufbau

Für die Durchführung der Tests wurde die Teststruktur mit 10 Beschleunigungsaufnehmern bestückt: 2 pro Balken und 2 Pilot-Aufnehmer als Input für die Regelung. Die Platzierung auf den Biegebalken wurde derart gewählt, dass die Beschleunigungsaufnehmer bei den ersten vier Biegeeigenschwingformen nicht in einem Schwingungsknoten liegen. Daher liegen die Messpunkte MP1-MP4 an den Balkenenden beginnend beim längsten Balken und die Messpunkte MP5-MP8 bei ca. 0.32 der Balkenlänge beginnend an der Wurzel. Weiterhin sind die Aufnehmer in der Mittelachse bezüglich der Balkenbreite angebracht, um Torsionsmomente durch eine außermittige Lagerung zu vermeiden. Der Testaufbau für die Tests in beiden Richtungen ist in Abb. 4 dargestellt.



Instrumentierung ohne Gleittisch



Instrumentierung mit Gleittisch

Abb. 4 Teststruktur, Testaufbau und Instrumentierung für Tests mit und ohne Gleittisch

Die Tests wurden auf einem elektrodynamischen Vibrationsteststand von TIRAvib und einer Agilent VXI Steuerung durchgeführt, wie in Abb. 5 dargestellt.

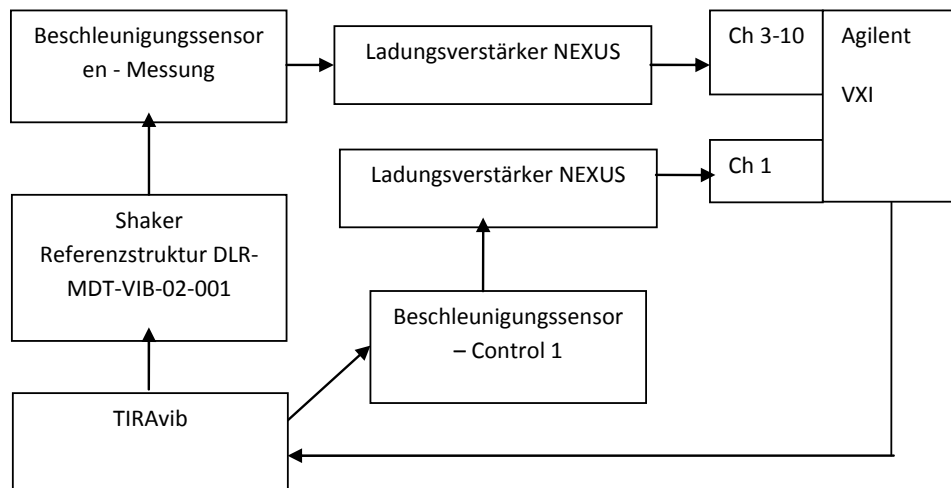


Abb. 5 Aufbau des Tests und der Messkette

## Testergebnisse

Die Grundlage für die Bewertung der Testergebnisse sind die durch die Akkreditierung festgelegten Toleranzen der Eigenfrequenzen und Güten, welche wie folgt definiert sind:

Toleranz der Resonanzfrequenz:	$\pm 1\%$
Toleranz der Güte:	$\pm 5\%$

## 1. Erster Referenztest

Im Rahmen des ersten Referenztests wurde die Struktur in einem Sinus-Sweep von 5 - 2000 Hz mit einer Amplitude von 0.7 g und einer Sweep-Rate von 0.3 oct/min angeregt. Bereits hierbei zeigte sich, dass die Eigenfrequenzen quantitativ hervorragend reproduzierbar sind (siehe Tab. 2). Allerdings weisen die Güten für einzelne Messaufnehmer zwischen den einzelnen Tests, auch ohne Umspannen der Struktur, große Streuungen bis 20% auf. Exemplarisch sind in Abb. 6 die Antwortfunktionen der Messpunkte 1-4 für Anregung in vertikaler Richtung dargestellt.

MP	Güte									Frequenz			
	Run 1	Run 2	Run 3	Mittelwert	Abweichung vom Mittelwert			Abweichung vom Mittelwert in %			Run 1	Run 2	Run 3
1	197,60	199,30	199,60	<b>198,83</b>	1,23	0,47	0,77	0,62	0,23	0,39	39,8	39,8	39,8
2	85,14	80,68	78,00	<b>81,27</b>	3,87	0,59	3,27	4,76	0,73	4,03	55,5	55,5	55,5
3	118,90	164,90	174,30	<b>152,70</b>	33,80	12,20	21,60	22,13	7,99	14,15	87,1	87,1	87,1
4	225,70	225,30	221,10	<b>224,03</b>	1,67	1,27	2,93	0,74	0,57	1,31	145,9	145,9	145,9
5	26,56	26,78	26,79	<b>26,71</b>	0,15	0,07	0,08	0,56	0,26	0,30	39,8	39,8	39,8
6	10,87	10,86	10,35	<b>10,69</b>	0,18	0,17	0,34	1,65	1,56	3,21	55,5	55,5	55,5
7	12,14	16,57	17,51	<b>15,41</b>	3,27	1,16	2,10	21,20	7,55	13,65	87,1	87,1	87,1
8	22,03	21,95	21,54	<b>21,84</b>	0,19	0,11	0,30	0,87	0,50	1,37	145,9	145,9	145,9

Tab. 2 Vergleich der ersten Eigenfrequenzen der Balken von 3 Testläufen in vertikaler Richtung

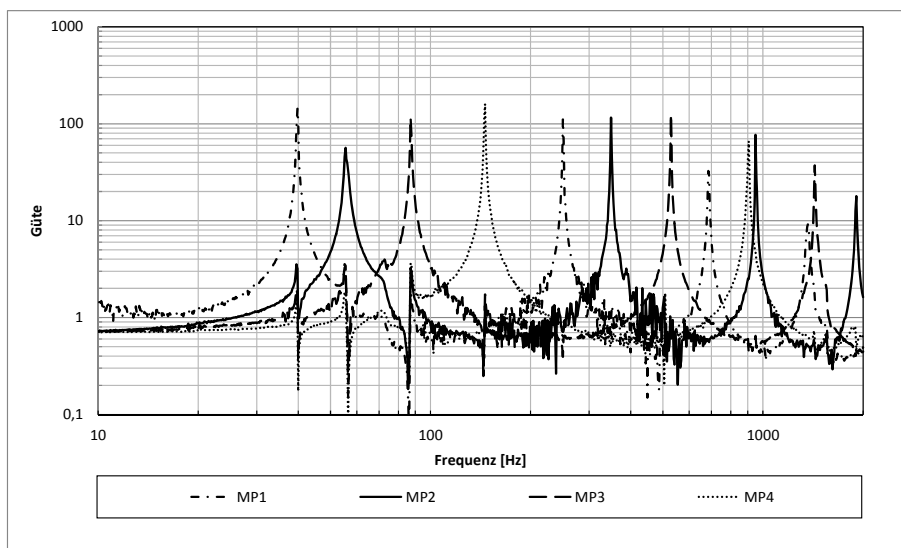


Abb. 6 Antwortfunktionen Referenztest 1 (vertikal) der Messpunkte MP1 - MP4

## 2. Zweiter Referenztest

Im Rahmen des zweiten Referenztests wurde die Struktur wiederum in einem Sinus-Sweep von 5 - 2000 Hz mit einer Amplitude von 0.7 g und einer Sweep-Rate von 0.3 oct/min angeregt.

Es wurden exakt die gleichen Eigenfrequenzen ermittelt wie im Referenztest 1. Allerdings gab es auch hier zwischen den einzelnen Versuchen Abweichungen

bei der Güte von bis zu 20%. Weiterhin war der Mittelwert der Güten im Vergleich zum Referenztest 1 sowohl höher als auch niedriger ohne eine Regelmäßigkeit erkennen zu können. Als Beispiel ist MP4 dargestellt, an dem in Referenzmessung 1 eine Güte im Mittel von 224 ermittelt wurde und in Referenztest 2 eine Güte im Mittel von 334.

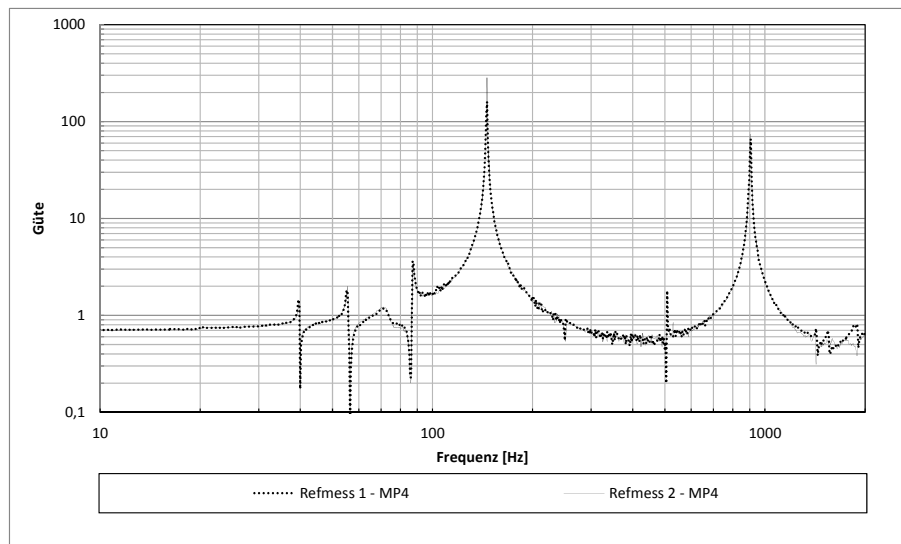


Abb. 7 Vergleich der Antwort MP4 aus Referenztest 1 und 2 (vertikal)

Beim Vergleich der Referenzmessungen 1 und 2 im Bereich einer Eigenfrequenz wurde festgestellt, dass die Auflösung des Antwortspektrums aufgrund des weit gewählten Frequenzbandes 5 Hz – 2000 Hz sehr grob war und somit Fehler in der Darstellung der Güte auftreten. Dies wird in nachfolgender Abbildung durch die Graphen *Refmess 1* und *Refmess 2* deutlich.

Zur Erhöhung der Anzahl der Stützstellen wurden die zu testenden Intervalle stark auf den Bereich einer Eigenfrequenz eingegrenzt. Somit konnte eine erheblich bessere Auflösung realisiert werden. Durch diese Veränderung wurde aber eine Verzerrung der Antwortfunktionen deutlich, die sich im Up-sweep und Down-sweep spiegelsymmetrisch darstellt und ein bekanntes Phänomen ist [3][4]. Siehe hierzu die Graphen *Refmess 3 – Upsweep* und *Refmess 3 – Downsweep*.

Als Resultat wurde die Sweep-Rate von 0.3 oct/min auf 2 Hz/min verringert. Mit diesem Ansatz werden nun die Eigenfrequenz und deren Überhöhung deutlich abgebildet und es treten keine Verzerrungen der Antwortfunktion mehr auf. Siehe hierzu Graph *Refmess 2 – fein*.



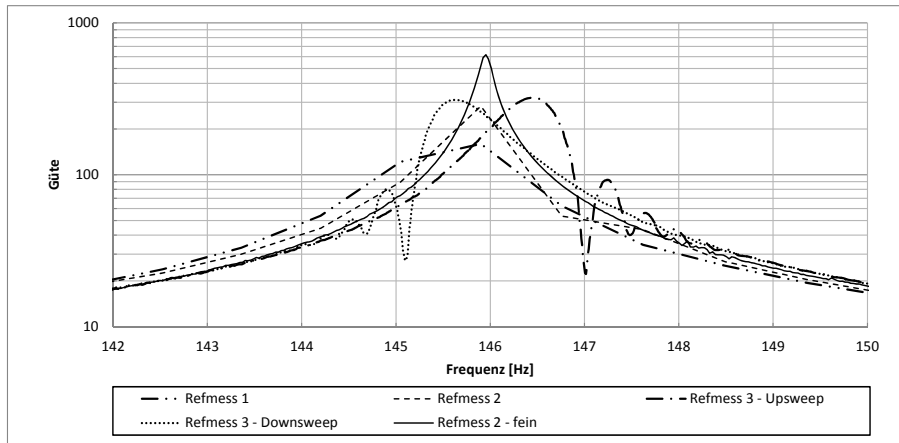


Abb. 8 Antwortfunktionen von Messpunkt MP4 mit verkleinertem Intervall um die erste Eigenfrequenz und variierender Sweep-Rate (vertikal)

Trotz der Veränderungen im Testablauf und der Anpassung der Testparameter kann die geforderte Toleranz der Abweichung der Güte noch nicht erreicht werden. Als weitere mögliche Einflussfaktoren wird die Führung und Befestigung der Kabel, die Höhe der Güte der gewählten Struktur, sowie die verhältnismäßig niedrige Amplitude der Anregung gesehen. Dies soll im Weiteren noch näher untersucht werden.

### Zusammenfassung und Lessons Learned

Es wurde eine Struktur für Referenzmessungen auf einem elektrodynamischen Schwingprüfstand entwickelt und Referenzmessungen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die Eigenfrequenzen im betreffenden Frequenzbereich bis 2000 Hz mit sehr hoher Genauigkeit reproduzierbar sind und den Vorgaben entsprechen.

Probleme ergaben sich allerdings bei der Reproduzierbarkeit der Güte. Hier zeigten sich in ersten Vergleichen Abweichungen von bis zu 20%. Im Weiteren wurden Quellen identifiziert, die sich negativ auf den Betrag der Abweichungen auswirken können:

1. Anzahl und Abstand der Stützstellen in der Auswertung  
 Die Auswerte-Software stellt nur eine bestimmte Anzahl von Stützstellen im untersuchten Frequenzband zur Verfügung. Dies führt dazu, dass die Auflösung der Güte in Abhängigkeit der Frequenz mit höheren Frequenzen abnimmt und somit Antworten abgeschnitten werden. Gelöst wurde dieses Problem, indem später für die Untersuchungen

interessante Resonanzfrequenzen in einem engeren Frequenzband untersucht wurden.

2. Wahl der Sweep-Rate, um eingeschwungenen Zustand zu erreichen  
Mit verbesserter Auflösung der Antwortfunktion wurde durch die Verformung der Antwortfunktion deutlich, dass die Sweep-Rate keinen eingeschwungenen Zustand der Struktur gewährleistet. Somit können sich Überhöhungen nicht komplett ausbilden und die Ergebnisse werden verfälscht.
3. Führung der Kabel für Beschleunigungsaufnehmer  
Die Führung der Kabel sorgt dafür, dass es zu Interaktionen zwischen den schwingenden Balken und den Kabeln kommt, was sich auf die Reproduzierbarkeit der Güten auswirken kann.
4. Höhe der Anregung der Struktur im Vergleich zu Störeffekten  
Eine geeignete Wahl der Höhe der Anregung kann kleine Störeffekte, wie z.B. die Interaktion mit Kabeln relativ verkleinern.
5. Auswahl einer Struktur mit geringerer Güte  
In Eigenfrequenzen der Biegebalken treten stets Güten im Bereich 100 und höher auf. Bei Wahl einer steiferen oder gedämpften Struktur können die Güten reduziert und Relativabweichungen verkleinert werden.

## Literatur

- [1] Ir. Filip Nauwelaerts: Interlaboratory comparison for mechanical vibration testing; European CEEES Seminar; October 18<sup>th</sup> 2012, Rotterdam (NL)
- [2] Cyril M. Harris: Shock and Vibration Handbook; McGRAW-HILL New York; Fourth Edition; 1995
- [3] D.J. Ewins: Modal Testing: Theory and Practice; Research Studies Press Ltd.; John Wiley & Sons Inc.; New York 1995
- [4] N. Roy, A. Girard: Revisiting the Effect of Sine Sweep Rate on Modal Identification; Proceedings of the 12<sup>th</sup> European Conference on Space Structures, Materials & Environmental Testing; Noordwijk (NL); 20-23 March 2013