

# Betriebsschwingformanalyse - Mehr Informationen gewinnen aus einem Vibrationstest

m+p international Mess- und Rechnertechnik GmbH, 30519 Hannover  
Emanuel Malek, [emanuel.malek@mpihome.com](mailto:emanuel.malek@mpihome.com)  
Christian Bohne, [christian.bohne@mpihome.com](mailto:christian.bohne@mpihome.com)

Die Betriebsschwingformanalyse (ODS Operating Deflection Shape) gewährt einen Einblick in die räumliche Bewegung von Strukturen unter Betriebsbedingungen. Daher eignet sie sich, um ein tieferes Verständnis für das dynamische Verhalten von Testaufbauten während Vibrationsprüfungen zu erlangen und daraus Maßnahmen für einen effektiveren Betrieb abzuleiten. Um den Mehrwert einer Betriebsschwingformanalyse deutlich zu machen, wurden in dieser Arbeit Vibrationstests mit verschiedenen Testaufbauten und unterschiedlichen Regelmethoden durchgeführt. Dadurch ist es möglich, den Einfluss der Schwingform auf die Regelung des Vibrationstests kenntlich zu machen und das dynamische Verhalten des Prüflings zu visualisieren und zu interpretieren.

## Einführung

Um die Aufspannfläche für die Befestigung der Prüflinge auf Shaker zu vergrößern, kommen Aufspanntische, sogenannte Head Expander (HE), zum Einsatz. Diese gibt es in unterschiedlichsten Ausführungen. Sie können verschiedene Formen haben, aus verschiedenen Materialien bestehen (meistens jedoch aus einer Magnesiumlegierung), geführt oder ungeführt sein, selbstentwickelt und hergestellt oder vom Shakerhersteller bezogen. Ein idealer HE hätte keine Masse und eine unendlich hohe Steifigkeit, dies ist jedoch nur die

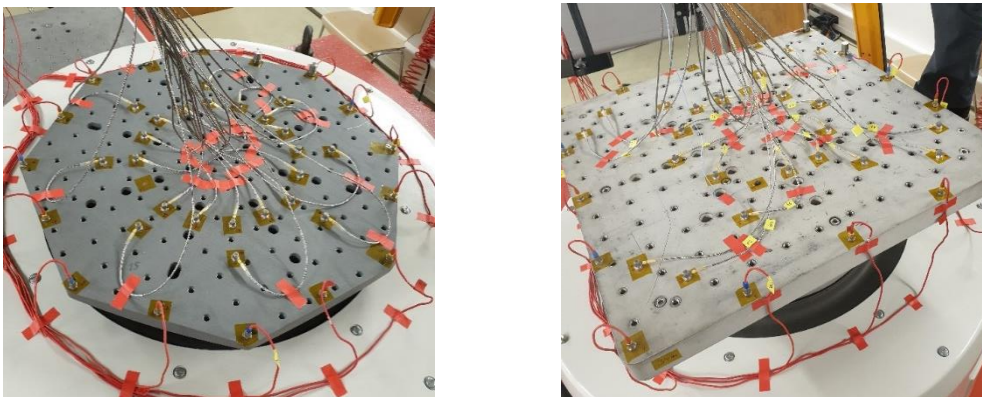


Abb. 1 Links: Oktogonaler Head Expander (HEO), B x L: 544 mm x 544 mm, Gewicht ca. 25 kg  
Rechts: Viereckiger Head Expander (HES), B x L: 600 mm x 600 mm, Gewicht ca. 56 kg

Idealvorstellung. Durch ihr dynamisches Verhalten macht die Verwendung von Head Expandern die Durchführung von Vibrationstest komplexer. Zum besseren Verständnis sind die für diese Tests genutzten Head Expander inklusive Abmaße und Gewicht in Abb. 1 dargestellt. Um bei anspruchsvollen Tests eine hohe Regelgüte zu erzielen, ist eine Regelung auf mindestens zwei Regelsignale zu empfehlen. Dabei sollte man sich der Anzahl der Regelkanäle, der Positionen der Regelsensoren und der Regelstrategie bewusst sein, um den einwandfreien Testbetrieb zu gewährleisten. Genau diese Fragestellungen können mit einer ODS-Analyse angegangen werden. Die Grundvoraussetzung für die ODS ist ein komplexes Spektrum und ein geometrisches Modell. Dabei sollten die Knotenpunkte der Geometrie die Positionen der Sensoren widerspiegeln und

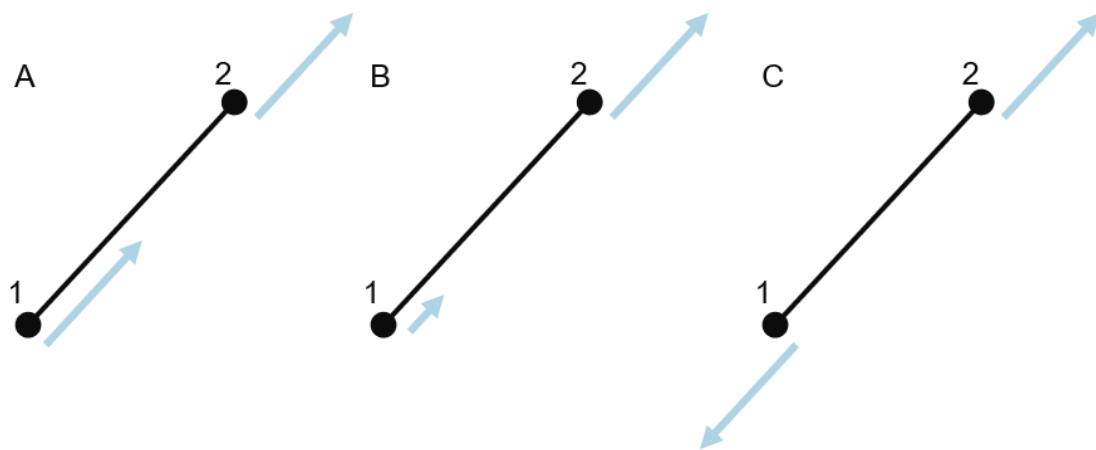


Abb. 2 ODS Beispiel an einer Geometrie mit 2 Punkten. A & B in Phase. C gegenphasig.

dementsprechend die Koordinaten der Punkte gewählt werden. Im Prinzip werden dann die Amplituden- und Phasenbeziehungen auf das geometrische Modell appliziert, woraus sich eine Visualisierung der Schwingform ergibt. In Abb. 2 ist anhand einer einfachen Geometrie mit 2 Punkten, wie bspw. einer Stange, die Bedeutung der Phase und Amplitude auf die Schwingform dargestellt. Im Zustand A besitzen beide Punkte die gleiche Amplitude und Phase, daher schwingen beide Punkte zu jedem Zeitpunkt gleich stark in dieselbe Richtung. Im Zustand B besitzen beide Punkte die gleiche Phase, jedoch nicht die gleiche Amplitude. Somit schwingen beide Punkte zu jedem Zeitpunkt zwar in dieselbe Richtung, tun dies aber unterschiedlich stark. Im Zustand C besitzen beide Punkte die gleiche Amplitude, jedoch eine Phasendifferenz von  $180^\circ$ . Das bedeutet, dass sich Punkt 1 zu jedem Zeitpunkt genau entgegen der Bewegungsrichtung von Punkt 2 bewegt. Während bei keinem Phasenunterschied, also  $0^\circ$  Phasendifferenz, von „in Phase“ gesprochen wird, wird bei einer Phasendifferenz von  $180^\circ$  von „gegenphasig“ gesprochen.

Nicht selten brechen Vibrationstests ab, weil die Kenntnis über das dynamische Verhalten der Struktur beim Test unzureichend ist. Hier schafft die ODS-Analyse Abhilfe. Konkret bietet die Analyse folgenden Mehrwert für Vibrationstests:

- Lokalisierung von geeigneten Sensorpositionen für Regel- und Notchkanäle.
- Ermittlung der Anzahl von Regelsensoren, der Regelstrategie und der Gewichtungsfaktoren für die Berechnung des gemittelten Regelsignals.
- Informationen für die Konstruktion von Prüflingsaufnahmen und Adaptern.
- Visualisierung der Bewegungsform des Prüflings beim Test als Mehrwert für den Hersteller.

Zum einen lassen sich qualitativ hochwertige ODS Ergebnisse am besten durch einen Sinus-Sweep erreichen, zum anderen ist ein Sinus-Sweep relativ zeitintensiv. Außerdem erfährt bei einem Sweep der Prüfling eine nicht unwesentliche Belastung, weshalb empfohlen wird, eine ODS-Analyse vor dem eigentlichen Vibrationstests ohne Prüfling durchzuführen. Auch die Tatsache, dass ein Sweep eine geregelte Anregung darstellt, könnte zu Schwierigkeiten bei der ODS-Analyse führen. Eine Alternative dazu bieten die Selbsttestergebnisse. Dabei handelt es sich um Spektren, die automatisch vor jeden Vibrationstest durch die Anregung mittels kurzem, relativ schwachen Pseudoräuschen gemessen werden. Um einen Vergleich zu schaffen, während die Entwicklung der Spektren durch einen Sinus-Sweep (5 – 3000 Hz, 1,5 Okt./ min. Sweepgeschwindigkeit) ca. 6 Minuten benötigte, standen die Selbsttestergebnisse nach etwa 13 Sekunden zur Verfügung, mit vergleichbaren Ergebnissen.

### Testdurchführung

Für die zugrunde liegenden ODS-Analysen wurden Tests im Schwingprüfungslabor der ZARM Fallturm-Betriebsgesellschaft mbH in Bremen durchgeführt. Die Tests wurden unter der Verwendung von 40 uniaxialen Beschleunigungsaufnehmern auf einem elektrodynamischen Shaker (35 kN Sinuskraft) im Vertikalbetrieb durchgeführt. Bei den Tests handelte es sich um

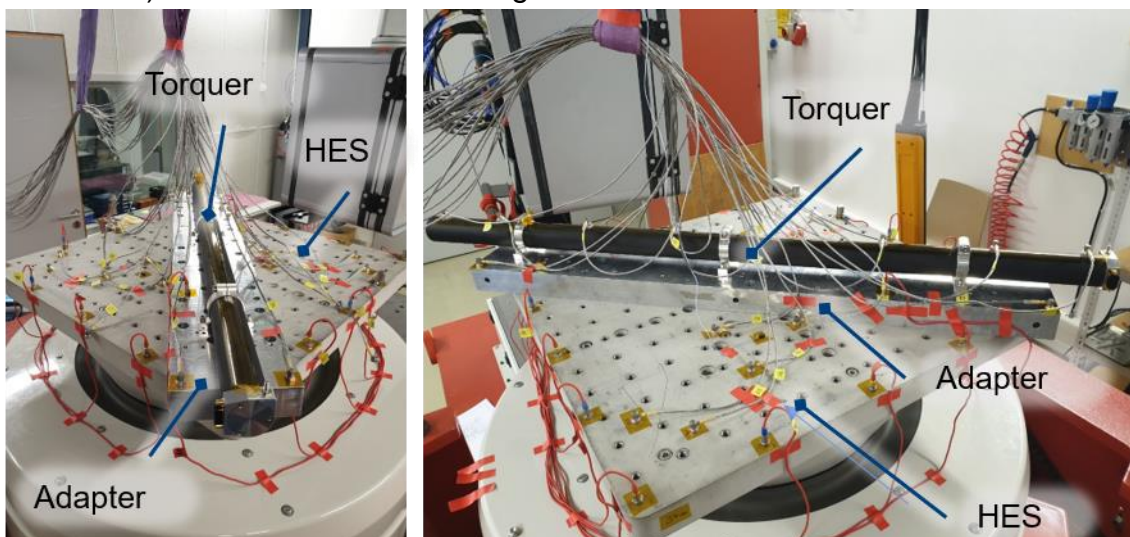


Abb. 3 Finaler Testaufbau: Viereckiger Head Expander (HES) + Prüflingsadapter + Magnetic Torquer

Sinus-Sweeps von 5 - 3000 Hz mit einer konstanten Beschleunigungsamplitude von 1 g und einer Sweepgeschwindigkeit von 1,5 Okt./min. Der Sinus-Sweep wurde mit verschiedenen Testaufbauten und unterschiedlichen Regelmethode n getestet. Für die unterschiedlichen Regelmethode n wurde die Anzahl der Regelsensoren, die Positionen der Regelsensoren und die Regelstrategie variiert. Für die Schwingregelung wurde m+p VibControl Rev. 2.15 und für die Analyse der Betriebsschwingform der m+p Analyzer Rev. 5.2 verwendet.

In den ersten Tests wurden die in Abb. 1 dargestellten Head Expander (HEO und HES) ohne zusätzlichen Aufbau untersucht. Dabei ist zu sagen, dass die beiden Head Expander eine kundeneigene Lösung darstellen und für einen Testbetrieb bis 2000 Hz ausgelegt wurden. Anschließend wurden Testaufbauten HES + Prüflingsadapter und HES + Prüflingsadapter + Magnetic Torquer untersucht. Bei dem Prüfling, dem Torquer, handelt es sich um ein raumfahrtspezifisches Bauteil, das eine Komponente der Lageregelung von Satelliten darstellt. In Abb. 3 ist der finale Testaufbau dargestellt. Der Prüflingsadapter hatte eine Länge von 850 mm und Höhe von 40 mm, daher wurde er diagonal auf den HES aufgespannt und die Enden ragten über. Mit einer Gesamtlänge von ca. 1030 mm ragten auch die Enden des Torquer über die des Adapters.

### Testergebnisse

Der HEO zeigt auf dem Shaker bis zu einer Frequenz von ca. 2400 Hz ein starke Strukturschwingung am Umfang der Geometrie, was mit der Verbindung der Mitte des HE mit der Shakerarmatur begründet werden kann und zu dieser Zwangsbedingung führt. Über 2400 Hz führt der Umfang immer schwächere Bewegungen durch und der Umsatz der kinetischen Energie verlagert sich verstärkt zur Mitte der Geometrie. Es tritt eine Schwingform in Erscheinung, die sehr stark der ersten Eigenform einer Membranschwingung ähnelt. Aus diesem Grund stellen insbesondere zwei Paarungen von Regelpositionen interessante Beispiele für die Wahl von geeigneten und ungeeigneten Regelpositionen dar. Für Tests im oberen Frequenzbereich (über 2400 Hz) ist die Paarung der

a) ODS bei 2300 Hz

b) ODS bei 2600 Hz

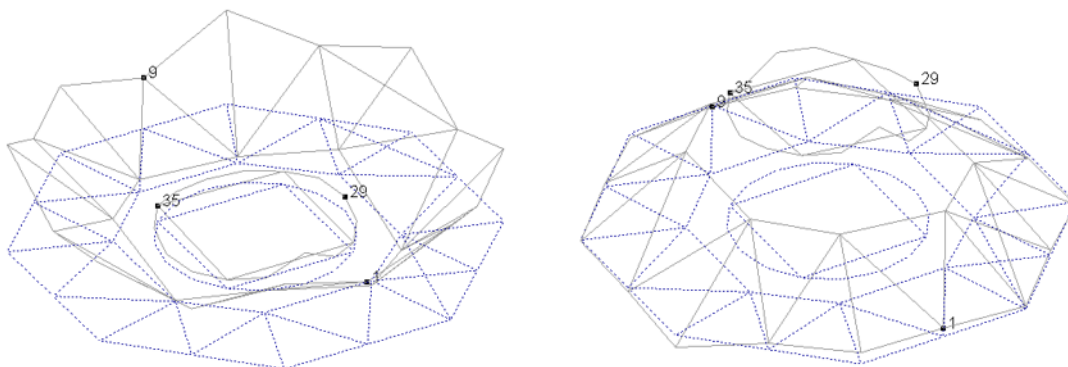


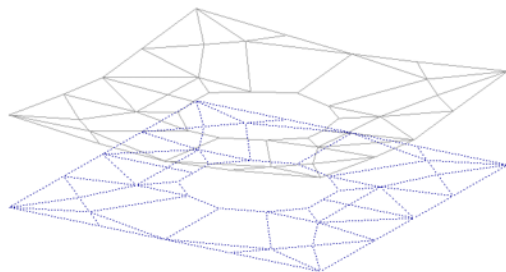
Abb. 4 ODS des HEO bei a) 2300 Hz und b) 2600 Hz



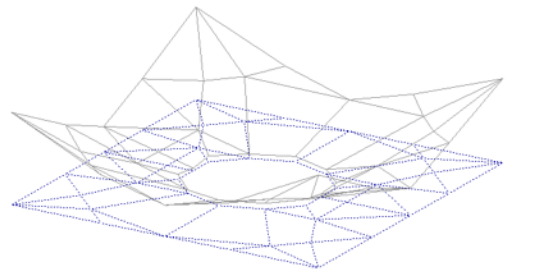
Regelpositionen 9 + 1 eher ungeeignet, während die Regelung auf die Positionen 29 + 35 geeigneter ist. Die beiden beschriebenen Schwingformen und der unverformte Zustand der Geometrie (gestrichelte Linie) sind in Abb. 4 dargestellt. Wie zu sehen ist, liegen Position 9 + 1 auf dem Umfang und Position 29 + 35 in der Mitte des Head Expanders. Bei einem Sinus-Sweep mit Regelung auf Position 9 + 1 ist der Test bei 2600 Hz abgebrochen, da das Regelsignal die untere Abbruchgrenze von -6 dB unterschritten hat. Ursache dafür ist, dass auch bei Erhöhung der Drivespannung die Referenzbeschleunigung nicht ausreichend entwickelt werden konnte. Dabei stellt die Veränderung der Frequenz über der Zeit noch eine weitere Herausforderung für die Regelung dar. Dahingehend läuft der Sinus-Sweep bei einer Regelung auf 29 + 35 komplett durch. Natürlich ist es möglich, die Regelgüte durch geeignete Parameter zu optimieren, jedoch ist die Schwingform und dementsprechend das Regelsignal die ausschlaggebende Größe für die Regelung. Grundsätzlich ist für eine optimale Prüfung zu sagen, dass es ungeeignet ist, die Regelsensoren auf Schwingungsknoten sowohl als auch auf Schwingungsbäuchen zu positionieren. Zu berücksichtigen ist hierbei die Tatsache, dass sich die Knotenlinien bei Frequenzänderung verschieben. Die Wahl der Regelsensornzahl und der Regelpositionen sollte folglich in Abhängigkeit vom interessierenden Frequenzbereich getroffen werden. Empfehlenswert ist jedoch, auf mindestens 2 Kanäle zu regeln.

Die Schwingform des viereckigen Head Expanders (HES) lässt sich bis 3000 Hz grob in 3 Bereiche unterteilen, bis 1200 Hz, zwischen 1200 Hz und 2300 Hz und

ODS bei 1000 Hz



ODS bei 2100 Hz



ODS bei 2900 Hz

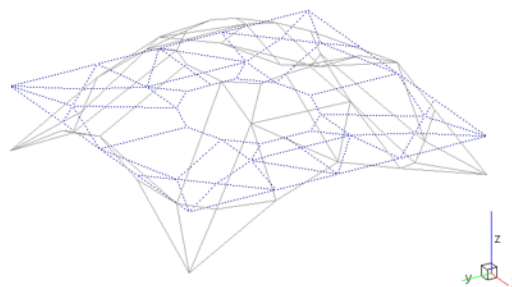


Abb. 5 ODS des HES unterteilt in 3 Bereiche

oberhalb 2300 Hz bis 3000 Hz. Bis 1200 Hz verhält sich der HES relativ steif und starr. Die Amplitude und Phase der Messpunkte auf der Oberfläche sind in diesem Frequenzbereich annähernd gleich. Zwischen 1200 Hz und 2300 Hz schwingen die Ecken des HES gleichphasig in Resonanz. Über 2300 Hz bildet sich in der Mitte der Aufspannfläche ebenfalls eine Resonanz aus. Die Mitte schwingt gegenphasig zu den Ecken ebenfalls in Resonanz. In dem oberen Frequenzbereich liegt also ein hochdynamisches Verhalten vor, was die Schwierigkeit der Regelung bereits erahnen lässt. Zur Verdeutlichung sind die Betriebsschwingformen des HES für 1000 Hz, 2100 Hz und 2900 Hz in Abb. 5. gegeben.

Im Anschluss an die Untersuchung des HES ohne Prüflingsadapter wurden die Tests auch nochmal mit Prüflingsadapter durchgeführt. Die Form der Bewegung des HES überträgt sich weitestgehend auf den Adapter. Somit bewirkt das

ODS bei 2292 Hz

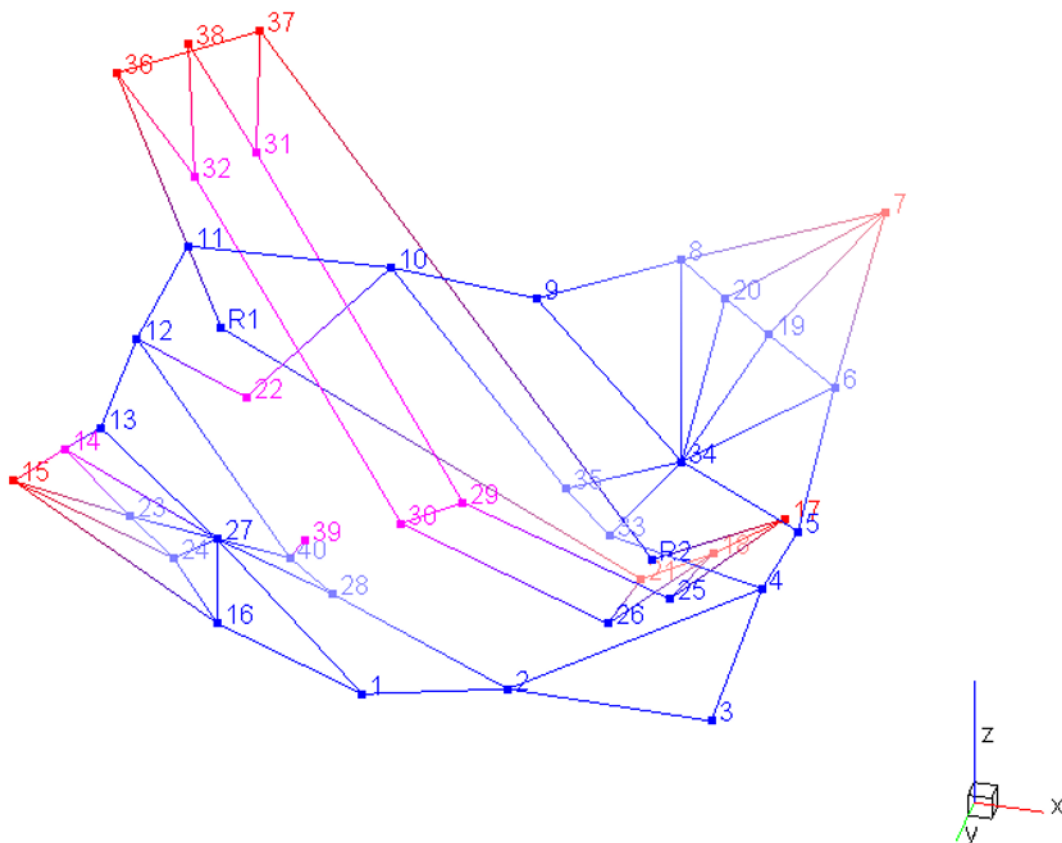


Abb. 6 ODS des HES + Adapter bei 2292 Hz mit Intensitätsanzeige

Schwingen der Ecken ein Schwingen der Vorder- und Hinterkante der Adapterplatte, welche sich zu den nicht verdeckten Ecken des HES in Phase bewegen. Zum besseren Verständnis ist eine Schwingform des Aufbaus in der Abb. 6 dargestellt. Auf dem Adapter sind insgesamt 14 Messstellen angebracht. Trotz der Übertragung des Schwingverhaltens besitzt die Platte auch ihre eigene

Dynamik und es herrscht eine Wechselwirkung zwischen Adapterplatte und Head Expander. Dies äußert sich bei Frequenz 1730 Hz, die mitten im Betriebsbereich liegt. In einem schmalen Band um diese Frequenz herum wirkt die Bewegung des Adapters sehr steif und ein Überschwingen der Kanten ist nicht mehr zu erkennen. Es wäre möglich, dass in diesem Frequenzband eine Resonanzstelle des Püflingsadapters liegt und sich durch die Verbindung an den Head Expander ein Tilgungsverhalten ergibt. Auch der Frequenzbereich zwischen 2000 Hz –

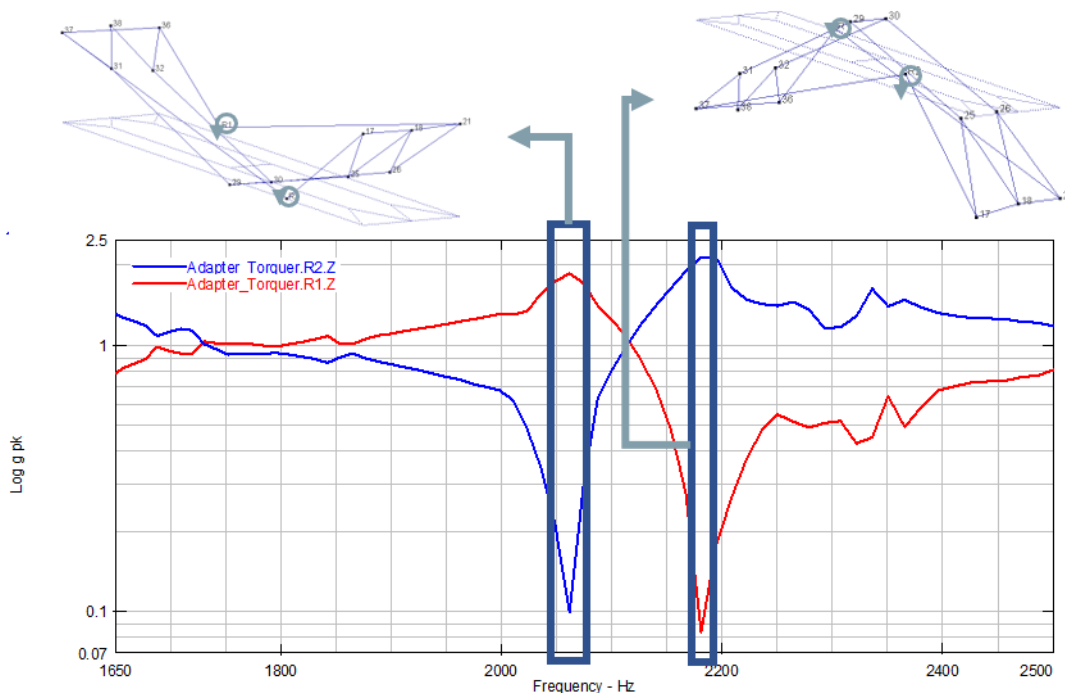


Abb. 7 Beschleunigungssignale der Punkte R1 und R2 im kritischen Frequenzbereich und die daraus resultierenden Schwingformen

2300 Hz ist interessant. Hier lässt sich beobachten, dass im ersten Frequenzband die Bewegungsintensität des Punktes R2 auf der Struktur sehr gering ist und im nachfolgenden Frequenzband auch die des Punktes R1 sehr stark abnimmt. Das Verhalten wird bei Betrachtung der Beschleunigungssignale in Abb. 7 verdeutlicht. Somit erfährt im Sinus-Sweep der Punkt R2 und kurz darauf Punkt R1 eine sehr schwache Beschleunigung, was aus regeltechnischer Sicht sehr anspruchsvoll ist. Es gilt anzumerken, dass bei 1,5 Oktaven/Minute Sweepgeschwindigkeit zwischen 2100 Hz und 2200 Hz nur ein zeitlicher Abstand von etwa 2 Sekunden liegt.

Beide Punkte liegen annähernd in der Mitte des Adapters, jedoch nicht genau gegenüber. Für Tests bis zu 2000 Hz werden die beiden Punkte von den Anwendern typischerweise für eine 2-Punkt-Mittelwert-Regelung gewählt. Für Tests über 2 kHz bedeutet dieses, dass der sehr steile Abfall und Anstieg der Übertragung zu den Punkten durch äußert schnelle Anpassung der Drivespannung ausgeglichen werden muss. Der Regelung muss also sehr schnell auf diese Veränderung des Systemverhaltens reagieren. In diesem Frequenzbereich wäre eine Maximum-Regelstrategie die bessere Wahl.

Für die Untersuchung des finalen Testaufbaus mit angebrachten Torquer wurden folgende 3 Regelmethode durchgeführt:

- a) 2-Punkt-Mittelwert-Regelung auf Punkte 17 + 21
- b) 2-Punkt-Mittelwert-Regelung auf Punkte R1 + R2
- c) 4-Punkt-Mittelwert-Regelung auf Punkte R1, R2, 21 + 37

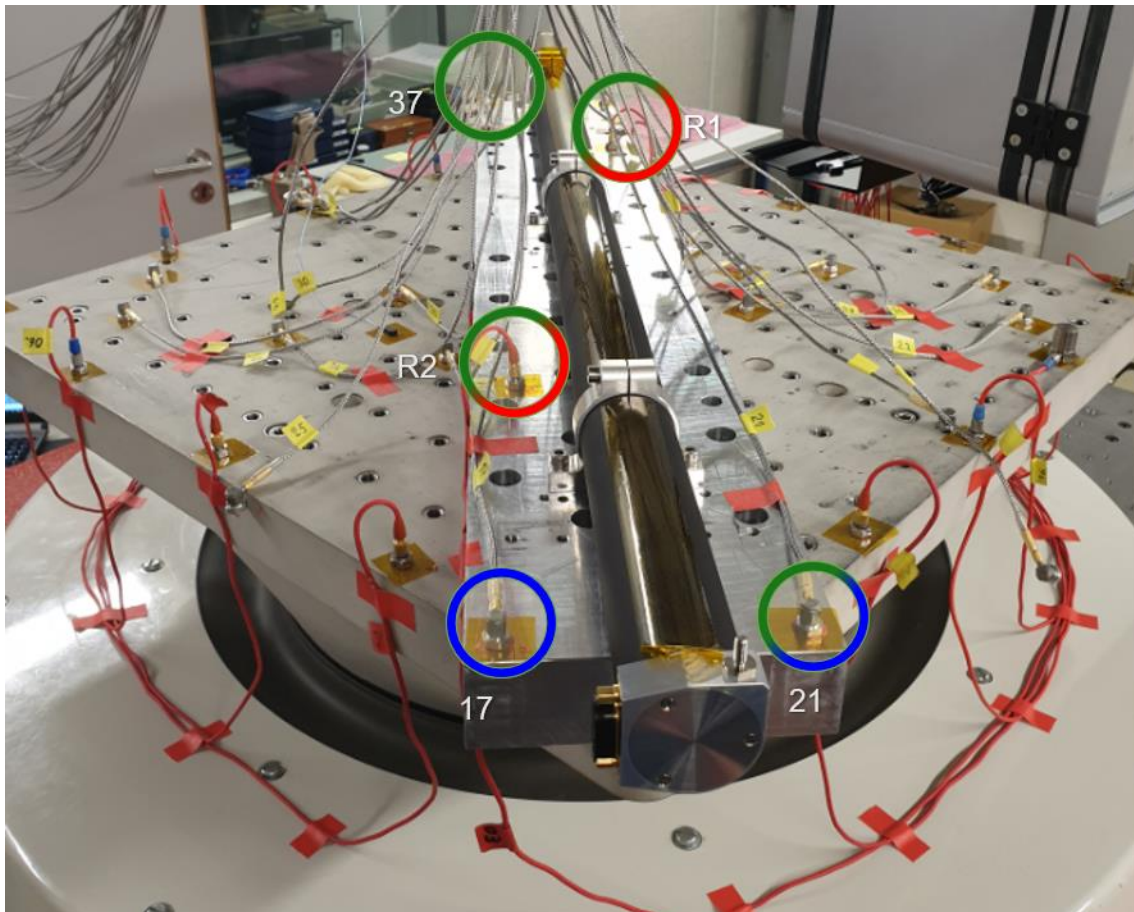


Abb. 8 Regelunkte auf der Adapterplatte des finalen Testaufbaus a) in Blau, b) in Rot und c) in Grün

In der Abb. 8 sind die Punkte auf der Oberfläche des Adapters den 3 Regelmethode zugeordnet dargestellt. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Tests ergeben sich für die Methode folgende Vorüberlegungen und Erwartungen. Für die Regelmethode a) wird ein gutes Regelsignal erwartet, da ohne Prüfling an beiden Enden der Adapterplatte eine ausreichend starke Bewegung stattfindet. Trotzdem wird die Wahl der Punkte 17 + 21 als Regelkanäle als ungeeignet betrachtet, da diese sich am Ort der maximalen Auslenkung befinden, was zum Untertesten in weiten Bereichen der Prüflingsmitte führen kann. Die Wahl der Punkte R1 + R2 in Methode b) ist aus dieser Hinsicht besser geeignet. Aufgrund der im Vorfeld beschriebenen Problematik der Bewegungsintensität zwischen 2100 Hz – 2300 Hz kann es oberhalb 2100 Hz zu Komplikationen kommen. Für die Methode c), welche dem Untertesten entgegenwirken soll, wird erwartet, dass der gesamte



Frequenzbereich im Test durchgefahren werden kann. Um die Ergebnisse zu vergleichen, wird die Funktion des Drivesignals sowie die des Regelfehlers betrachtet. Der Regelfehler ist grundsätzlich die Abweichung des Regelsignals zum Referenzsignal, welches in unserem Fall eine über der Frequenz konstanten Beschleunigungsamplitude von 1 g entspricht.

Bei Betrachtung der Drivesignale ist zu erkennen, dass diese sich stark ähneln, jedoch das Signal der Methode b) bei 2307 Hz abgebrochen ist. Grund dafür ist, dass die Regelabweichung so stark war, dass die gesetzte untere Abbruchgrenze von -6 dB unterschritten wurde. Mit einer derartigen Komplikation in dem Bereich war jedoch zu rechnen. Wie erwartet liefen die Tests nach Regelmethode a) und c) komplett durch. Bei der kritischen Frequenz von 2307 Hz besitzt die Regelmethode a) die geringste Regelabweichung von -2 dB, wohingegen die Abweichung der Methode c) bei -3 dB liegt. Die beiden Funktionen sind in der Abb. 9 dargestellt.

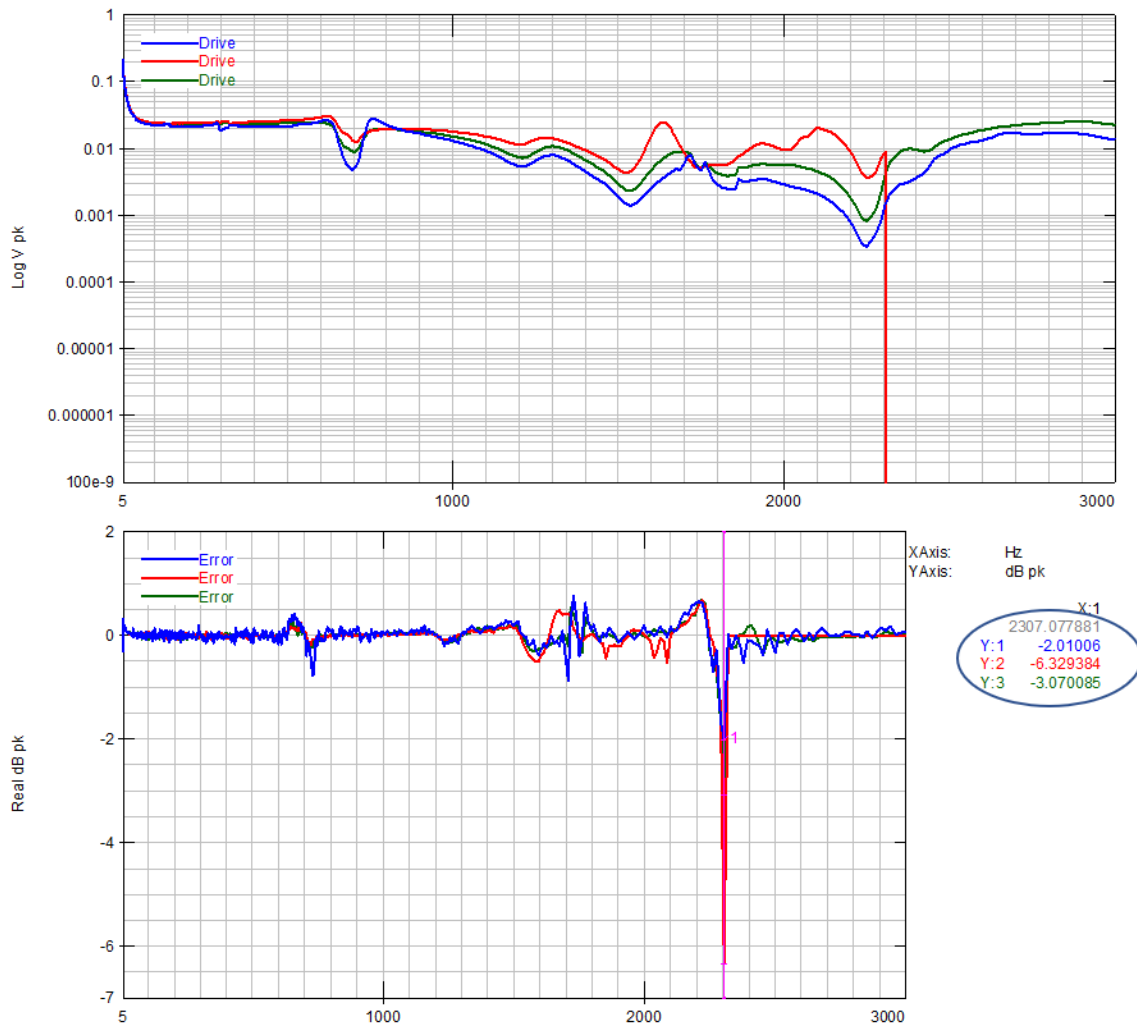


Abb. 9 Drive und Regelfehler der 3 Regelmethode. a) in Blau, b) in Rot und c) in Grün

Abgesehen von den Erkenntnissen, die die ODS-Analyse der Aufspannvorrichtungen für die Regelung bietet, bringt die Betrachtung der Betriebsschwingformen des Prüflings ebenfalls wertvolle Informationen hervor. Es ist zu erkennen, dass sich der Torquer bis zu einer Frequenz von etwa 122 Hz sehr steif und starr verhält. Die Messpunkte auf dem Torquer bewegen sich gleichphasig und mit gleicher Amplitude zu den Punkten auf dem Adapter. Eine deutliche Resonanzerscheinung ist bei 305 Hz zu erkennen. Durch das resonante gleichphasige Schwingen der beiden Enden des Torquers ähnelt diese Bewegung stark der ersten Biegemode eines Balkens (siehe Abb. 10). Auch der Frequenzbereich um 1042 Hz ist interessant, da in diesem Bereich die Torquerstruktur gegenphasig zu dem Adapter schwingt. Von besonderem Interesse ist jedoch der Frequenzbereich um 1763 Hz. In diesem Bereich bewegen sich beide Enden des Torquers in Resonanz, wobei jedoch ein Ende eine sehr viel stärkere Beschleunigung erfährt als das andere Ende (siehe Abb. 10). Obwohl die Prüflingsgeometrie symmetrisch ist und auch sehr homogen wirkt, gibt es doch einen eindeutigen Unterschied. An dem besagten Ende ist zusätzlich ein elektronischer Steckverbinder angebracht, der an dem Punkt eine zusätzliche Masse impliziert. Der Einfluss der zusätzlichen Masse könnte dieses Phänomen erklären. Ein Bild des elektronischen Steckverbinders ist ebenfalls in Abb. 10 zu sehen.

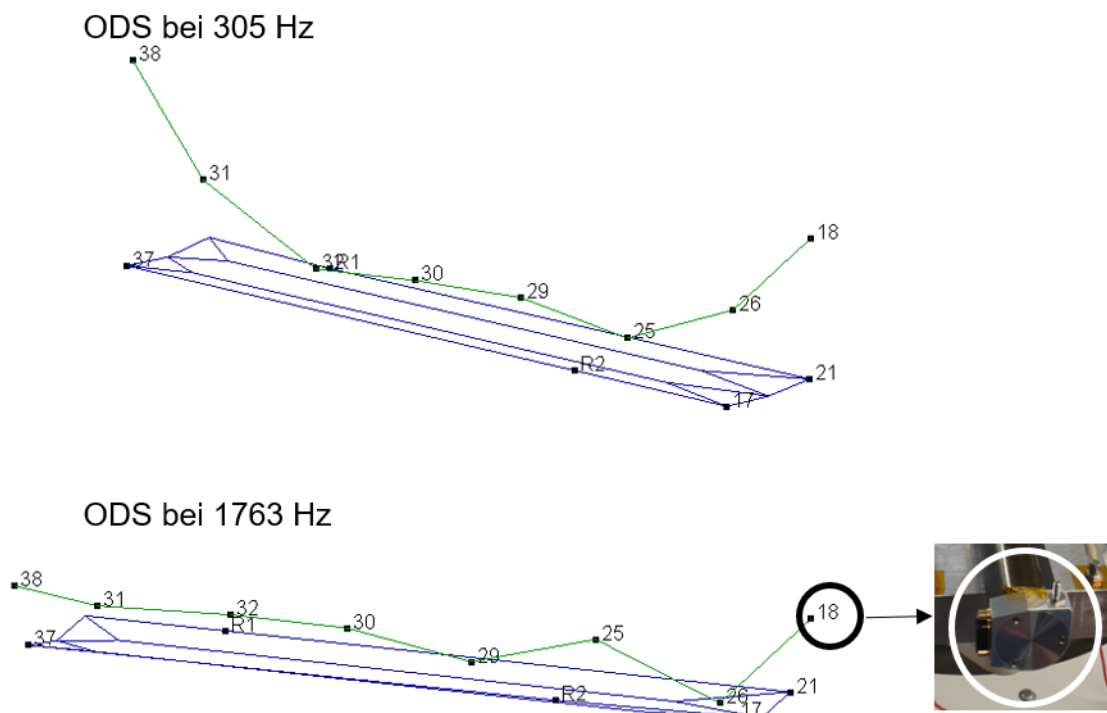


Abb. 10 ODS-Darstellung des Torquer (grün) und Adapter (blau). Die Form bei 305 Hz ähnelt stark der 1. Biegemode eines Balkens, während bei der Schwingform bei 1763 Hz der Einfluss der zusätzlichen Masse erkennbar ist.

## **Schlussbetrachtung**

Die Analyse der Betriebsschwingform von Aufspannvorrichtungen, Prüflingsaufnahmen oder dem Prüfling selbst bringt tiefgehende Informationen über die Strukturodynamik hervor. Diese Informationen können aus verschiedenster Hinsicht wertvoll sein. Für eine schnelle Analyse und eine erste Bewertung der ODS bieten sich die Selbsttestergebnisse an, die nach kurzer Testzeit und in jeder Anregungsart mit VibControl zur Verfügung stehen. Durch die Bewertung der ODS konnte der Unterschied von geeignet und ungeeignet gewählten Regelpositionen aufgezeigt werden. Regelpositionen in Schwingungsknoten sowie in Schwingungsbäuchen sollten vermieden werden. Die Betriebsschwingform und somit die Knotenlinien verändern sich jedoch frequenzabhängig in einem Sinus-Sweep, dementsprechend ist der Frequenzbereich des Tests ausschlaggebend für die geeignete Wahl der Regelpositionen.

Aufgrund der Untersuchung der beiden Head Expander lässt sich sagen, dass diese für den Betriebsbereich bis 2000 Hz sehr gut konzipiert sind. Oberhalb 2000 Hz wird das Verhalten bei beiden Head Expandern dynamischer und somit schwieriger zu regeln. Die ODS-Analyse kann herangezogen werden, um die Eignung der Aufspannvorrichtungen im Betriebsbereich zu validieren.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Tests und Ergebnisse sollen als Fallbeispiel für verschiedene Head Expander und Aufspannvorrichtungen dienen. Bei größeren und schwereren Head Expandern können kritische Betriebsschwingformen bei deutlich tieferen Frequenzen vorkommen und somit mitten im Betriebsbereich liegen. Die Art der Schwingformen könnte dabei den in dieser Arbeit beschriebenen Betriebsschwingformen ähneln. Untersucht wurden zwei Head Expander: Oktogonal mit Aufspannfläche 544 mm x 544 mm und viereckig mit Aufspannfläche 600 mm x 600 mm. Bei größeren und schwereren Head Expandern sowie Prüflingen liegen kritische Betriebsschwingformen bei deutlich tieferen Frequenzen und somit unterhalb des gängigen Betriebsbereichs bis 2000 Hz. Die Art der Schwingformen könnte dabei den in diesem Vortrag beschriebenen Betriebsschwingformen ähneln, was in zukünftigen Vibrationstests näher untersucht werden soll. Ebenso das Verhalten von Headexpandern mit kreisförmiger Aufspannfläche. ODS-Analysen sind zu empfehlen, wenn es um komplexe und große Geometrien und „hohe“ Frequenzbereiche geht. Oder zur Wiederholung und Analyse von Tests, die in der Vergangenheit nicht erfolgreich durchgeführt werden konnten. Für anspruchsvolle Vibrationstests kann die ODS-Analyse im Vorfeld ein hilfreiches Werkzeug darstellen, um die Tests professionell und erfolgreich durchzuführen.

Auf der anderen Seite bietet die Betriebsschwingformanalyse der Prüflinge selbst auch einen wirklichen Mehrwert, insbesondere für Testlabore, die aussagekräftige Prüfergebnisse an Kunden geben müssen. Die Dokumentation durch Visualisierung und die Interpretation des Schwingverhaltens des Prüflings kann aufschlussreich für den Hersteller des Prüflings sein. Derartige

Informationen helfen Herstellern dabei, das dynamische Verhalten der Bauteile besser zu verstehen und diese gegebenenfalls konstruktive Maßnahmen zu ergreifen und weiter zu entwickeln. Somit ist die ODS-Analyse des Prüflings sinnvoll, wenn es um entwicklungsbegleitende Schwingprüfungen oder Tests an Prototypen geht. Wie an unserem Beispiel zu sehen war, besitzt die zusätzliche Masse an einem Ende des Prüflings einen erheblichen Einfluss auf das Schwingverhalten bei 1763 Hz. Solche Analysen stellen eine wertvolle Ergänzung im Bericht zur Schwingprüfung dar.

Schlussendlich lässt sich sagen, dass die ODS-Analyse bereits mit geringem Aufwand durchgeführt werden kann und wertvolle Informationen für die Vorbereitung sowie die Nachbereitung von Vibrationstests liefert.