

Über dieses Dokument

Inhalt

Das vorliegende Dokument ist der erste Teil einer Reihe von vier Application Notes über Strukturdynamik. Das Dokument beinhaltet einige Hinweise auf den Nutzen von strukturdynamischen Untersuchungen sowie ein Glossar mit Begriffen, deren Verständnis die Grundlage für die weiteren Teile dieser Reihe bilden.

1. Nutzen von strukturdynamischen Untersuchungen _____ 1
2. Glossar _____ 2

Zielgruppe

Dieses Dokument dient als Einstieg in die Strukturdynamik und wendet sich an Akustiker¹, die einen Einblick in dieses Thema erhalten und sich mit den Grundbegriffen vertraut machen möchten.

Fragen?

Sie haben Fragen? Wir freuen uns über Ihre Rückmeldungen!

Fragen zum Inhalt dieses Dokuments: Imke.Hauswirth@head-acoustics.com

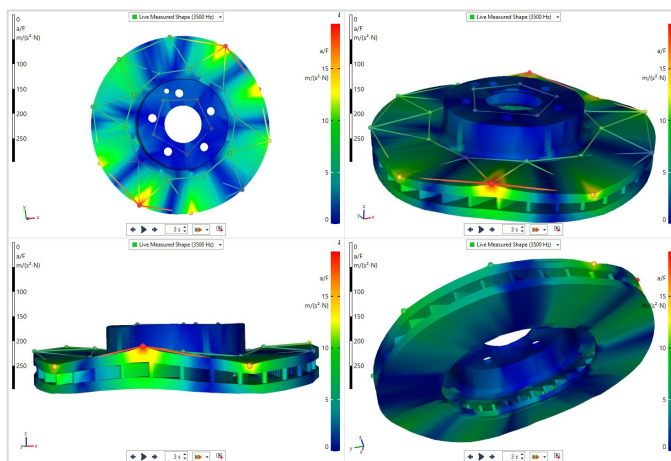
Technische Fragen zu unseren Produkten: SVP-Support@head-acoustics.com

Strukturdynamik – Teil 1 (Glossar)

1. Nutzen von strukturdynamischen Untersuchungen

Motivation

Durch die Kenntnis des dynamischen Verhaltens von Strukturen können diese durch konstruktive Maßnahmen hinsichtlich ihrer mechanischen Schwingungen optimiert werden. Auf diese Weise können z. B. das Körperschallübertragungs- sowie das Abstrahlungsverhalten einer Struktur optimiert werden. Weiterhin lässt sich durch eine Reduktion der Schwingungen die Belastung der Struktur vermindern, was die Lebensdauer eines Bauteils bzw. einer Maschine erhöhen kann.



¹ Im nachfolgenden Text wird verallgemeinernd das generische Maskulinum verwendet. Dies soll ausschließlich der besseren Lesbarkeit dienen. Selbstverständlich möchten wir gleichermaßen alle Geschlechter ansprechen bzw. einbeziehen.

Erkenntnisse aus der
Strukturanalyse

Durch die Analyse der Strukturdynamik können wichtige Erkenntnisse gewonnen werden:

- wie eine Struktur bei der Anregung unter realen Bedingungen schwingt
- über die zu erwartende Schallabstrahlung von den Oberflächen einer Struktur (z. B. einer Maschine) und Möglichkeiten zu ihrer Vermeidung
- um die Ursache von Schall- und Schwingungsproblemen zu finden und die Übertragungswege zu optimieren
- wie das strukturelle System für Schall- und Schwingungsanwendungen zu optimieren ist
- über die voraussichtliche dynamische Beanspruchung und die damit in Verbindung stehende Materialermüdung
- um Schwachpunkte der Struktur bezüglich dynamischer Belastungen zu lokalisieren und Lösungen zu bewerten
(Ziel ist es, eine Struktur so abzustimmen, dass ihre Eigenfrequenzen nicht mit den Anregungsfrequenzen zusammenfallen und so dynamische Einflüsse reduziert oder gar ausgeschaltet werden.)
- um die Effekte von Modifikationen vorherzusagen und den Trial-and-Error-Ansatz zum Lösen bestehender Schwingungsprobleme zu umgehen, damit so Zeit und Kosten für die Implementierung von Designänderungen reduziert werden können
- um die mathematischen Modelle der Struktur zu verifizieren und anzupassen

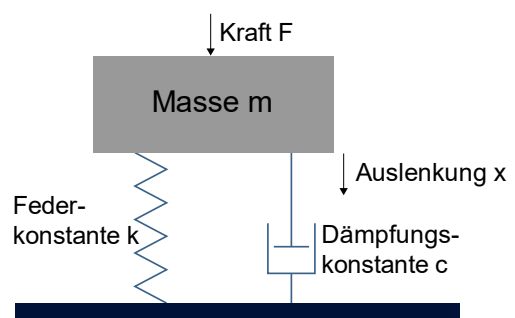
2. Glossar

Freiheitsgrade DOF

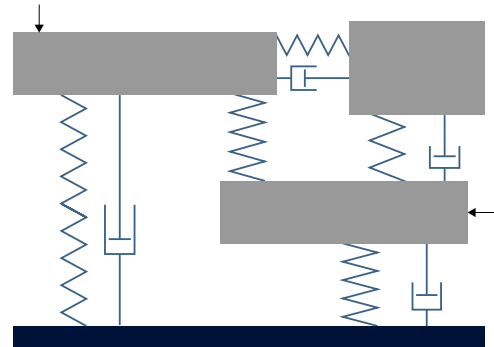
- **DOF** (degree of freedom, Freiheitsgrad): Allgemein wird als DOF die unabhängige Bewegungsmöglichkeit eines Strukturpunktes bezeichnet. In der Strukturdynamik definiert ein DOF einen Messpunkt auf einer Struktur inklusive seiner Messrichtung (z. B. X-, Y-, oder Z-Richtung).

- **SDOF** (single degree of freedom, Einmassenschwinger): Der Einmassenschwinger wird gebildet aus einer Masse m , einer Feder mit der Federsteifigkeit k und einem Dämpfer mit der Dämpfungskonstante c . Wird die Masse durch eine Kraft F um eine Auslenkung x aus ihrer Ruhelage bewegt, kann sich die Masse nur in einem Freiheitsgrad bewegen. Die erzwungene, gedämpfte Schwingung eines Einmassenschwingers wird durch die folgenden Bewegungsgleichung beschrieben: $F(t) = m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t)$

Der Einmassenschwinger besitzt einen Freiheitsgrad und wird daher auch Einfreiheitsgrad-System genannt. Ein solches System besitzt eine Eigenfrequenz und eine dazugehörige Eigenmode. Der Einmassenschwinger bildet die Grundlage für Systeme, mit mehr als einem Freiheitsgrad. Der Begriff SDOF bezeichnet auch eine Gruppe von Curve-Fitting-Verfahren.



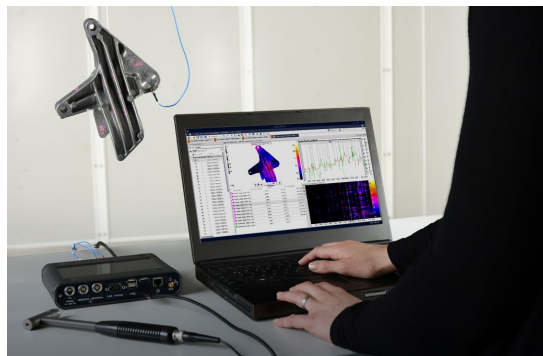
- **MDOF** (multiple degree of freedom, Mehrmassenschwinger oder Mehrfreiheitsgrad): Lineare Mehrfreiheitsgrad-Systeme können als Summe mehrerer SDOF-Systeme beschrieben werden. Dabei besteht in der Regel eine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen SDOF-Systeme. Die Zahl der Eigenfrequenzen bzw. Eigenmoden eines Mehrfreiheitsgrad-Systems kann die Anzahl der Freiheitsgrade nicht überschreiten.



Die Begriffe MDOF bezeichnet auch eine Gruppe von Curve-Fitting-Verfahren.

Vorgehensweise bei der Strukturanalyse

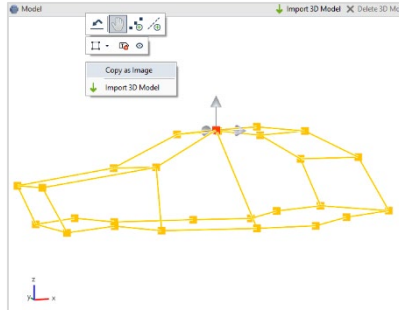
- **EMA** (experimental modal analysis, experimentelle Modalanalyse, auch modale Tests): Die EMA ist eine Methode zur Analyse der dynamischen Eigenschaften von linearen, zeitinvarianten Strukturen. Bei der EMA wird die Struktur mit einem



Impulshammer oder Shaker(n) angeregt und die Strukturantwort mit Sensoren (meist Beschleunigungsaufnehmern) gemessen. Die erfassten Daten und weiterführende Analysen erlauben die Ermittlung der modalen Größen (Eigenfrequenzen, Dämpfung, Eigenformen).

- **Curve Fitting**: Das Curve Fitting ist ein mathematischer Prozess zur Generierung einer Kurve, die möglichst gut einer Zielkurve entspricht. In der Strukturanalyse bezeichnet das Curve Fitting das Nachbilden einer Übertragungsfunktion. Dabei werden Eigenfrequenzen und Dämpfungen der Struktur extrahiert. Für das Curve Fitting wurden verschiedene Methoden entwickelt. Wird das Curve Fitting zeitgleich für mehrere Übertragungsfunktionen angewendet, können zu den Eigenfrequenzen auch die dazugehörigen Eigenmoden bestimmt werden.
- **OMA** (operational modal analysis oder output-only modal analysis, Betriebsmodalanalyse): Die OMA ist eine Methode zur Ermittlung der modalen Parameter, bei der die im Betrieb vorhandenen Strukturanregungen zur Modalanalyse ausgenutzt werden. Sie wird z. B. eingesetzt, wenn mit Hammer oder Shaker keine ausreichende Anregungsenergie in die Struktur eingeleitet werden kann. Weiterhin kann die OMA angewendet werden, wenn die zu untersuchende Struktur im eingebauten Zustand analysiert werden soll (z. B. ein verspannter Antriebsstrang). Auch bei der OMA wird eine spezielle Software benutzt, um die modalen Größen zu extrahieren. Problematisch bei der OMA ist es, durch die Betriebskräfte eine breitbandig gleichmäßige Anregung der Struktur ohne tonale Anteile zu erreichen. Die breitbandige Form der Anregung ist die mathematische Voraussetzung zur Berechnung der modalen Parameter bei unbekannter Anregung.

- ODS analysis** (operational deflection shape analysis, Betriebsschwingformanalyse): Bei der Betriebsschwingformanalyse wird das Schwingverhalten einer Struktur im Betriebszustand untersucht. Dazu wird die Schwingung der Struktur während des Betriebs an zahlreichen Punkten aufgezeichnet (die anregenden Kräfte werden nicht explizit gemessen). Modale Parameter wie Eigenfrequenzen und modale Dämpfung können mit der Betriebsschwingformanalyse nicht bestimmt werden. Die durch die ODS ermittelten Schwingungsformen entsprechen in der Regel nicht den Eigenmoden, sondern spiegeln das Antwortverhalten der Struktur bei einer durch den Betrieb hervorgerufenen



(unbekannten) Anregung wider. Die Schwingungsformen setzen sich meist aus mehreren Eigenmoden zusammen.

Anhand eines Visualisierungsmodells können die Betriebsschwingformen in Abhängigkeit von Zeit oder Frequenz animiert dargestellt werden.

- FEM** (finite element method, Finite-Elemente-Methode): Die Finite-Elemente-Methode ist ein weit verbreitetes numerisches Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen. Bei dieser Methode wird die Struktur in finite Elemente - also kleine endliche Bereiche - unterteilt und so ein Modell der Struktur am Computer erstellt. Mithilfe der FEM können z. B. numerische Modalanalysen durchgeführt und Übertragungsfunktionen berechnet werden.

Messmethoden

- SISO** (single input - single output): Zu den SISO-Messungen gehört die Modalanalyse mit einem Hammer oder Shaker (single input) und einem Beschleunigungsaufnehmer (single output). Diese Art der Messung bietet sich für kleinere Strukturen an, es ist eine sehr kostengünstige Messung, da nur wenig Mess-equipment benötigt wird.
- SIMO** (single input - multiple outputs): Zu den SIMO-Messungen gehört die Modalanalyse mit einem Hammer oder Shaker (single input) und mehreren Beschleunigungsaufnehmern (multiple outputs). Durch die Verwendung mehrerer Beschleunigungsaufnehmer kann die Messzeit deutlich verkürzt werden.
- MIMO** (multiple inputs - multiple outputs): Zu den MIMO-Messungen gehört z. B. die Modalanalyse mit mehreren Shakern (multiple inputs) und mehreren Beschleunigungsaufnehmern (multiple outputs). Ein Vorteil von MIMO-Messungen besteht darin, dass die eingeleitete Energie auf mehrere Orte der Struktur verteilt ist. Dies sorgt für ein gleichmäßigeres Schwingungsverhalten der Struktur, insbesondere bei großen und komplexen Strukturen und Strukturen mit starker Dämpfung. MIMO-Messungen können z. B. eingesetzt werden, wenn die Teststruktur dicht benachbarte bzw. gekoppelte Moden aufweist.



- Roving Hammer:** Bei der Methode Roving Hammer wird die Struktur mit einem Hammer an verschiedenen Positionen angeregt. Die Strukturantwort wird mit einem oder mehreren Beschleunigungsaufnehmern an jeweils einer festen Position gemessen. Dies hat den Vorteil, dass sich der Masseinfluss der Sensoren zwischen den einzelnen Messungen nicht ändert. Die Messmethode Roving Hammer ist besonders für kleinere Strukturen geeignet und kann mit relativ wenig Messequipment durchgeführt werden. Die Methode Roving Hammer kann nur dann verwendet werden, wenn alle erforderlichen Punkte mit dem Impulshammer angeschlagen werden können.



- Roving Accelerometer:** Bei der Methode Roving Accelerometer wird die Struktur mit einem Hammer oder Shaker an einer festen Position angeregt. Die Strukturantwort wird mit einem oder mehreren Beschleunigungsaufnehmern gemessen, deren Position nach jeder Messung verändert wird. Wird mit mehreren Beschleunigungsaufnehmern gearbeitet, kann die Datenerfassung deutlich beschleunigt werden, da mit einer Messung gleichzeitig die Übertragungsfunktion für mehrere



Messpunkte ermittelt werden kann. Die Messmethode Roving Accelerometer sollte verwendet werden, wenn nicht alle Punkte für die Anregung mit dem Impulshammer gut erreicht werden können. Andererseits muss bei der Auswertung berücksichtigt werden, dass das Umsetzen des Sensors / der Sensoren den Masseinfluss auf die Struktur verändert, was zu Unterschieden zwischen den Messungen führen kann.

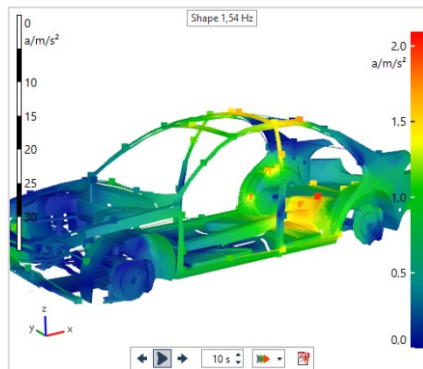
- Roving Hammer/Roving Accelerometer Kombination:** Die beiden Methoden Roving Hammer und Roving Accelerometer können kombiniert werden, um die Struktur an verschiedenen Punkten anzuregen. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn nicht alle Moden der Struktur durch die Krafteinleitung an einem Punkt angeregt werden können. Mit dieser Methode lassen sich auch stark gekoppelte Moden trennen.
- Multi Reference:** Bei einigen Anwendungen ist mehr als ein Referenzpunkt erforderlich. In einem solchen Fall spricht man von einer Multi-Referenz-Messung. Eine solche Messung ist z. B. nötig, wenn nicht alle Moden der Struktur durch die Krafteinleitung an einem Punkt angeregt werden können und mehrere Einleitungspunkte für die Anregung benötigt werden. Ein weiterer Anwendungsfall für eine Multi-Reference-Messung besteht, wenn eine Struktur mehrere Moden mit nah beieinanderliegenden Eigenfrequenzen besitzt. Dies kann z. B. bei einigen symmetrischen Strukturen auftreten. Die Kombination Roving Hammer/Roving Accelerometer gehört zu den Multi-Reference-Messungen ebenso wie die MIMO-Messung.

Weitere häufig verwendete Begriffe

- **Eigenfrequenz (engl. natural frequency):** Die Eigenfrequenz f_0 ist die Frequenz mit der ein schwingfähiges Einfreiheitsgrad-System nach einer einmaligen, breitbandigen Anregung schwingt (freie Schwingung).
Bei einer periodischen Anregung mit der Frequenz f_a schwingt das System mit der Frequenz f_a (erzwungene Schwingung). Stimmt die Frequenz f_a der Anregung mit der Eigenfrequenz f_0 des Systems überein, reagiert das System mit hohen Amplituden (Resonanzfall).
Die Eigenfrequenz einer Struktur ist eine inhärente Eigenschaft und hängt von der Geometrie, dem Aufbau und den Materialeigenschaften ab.

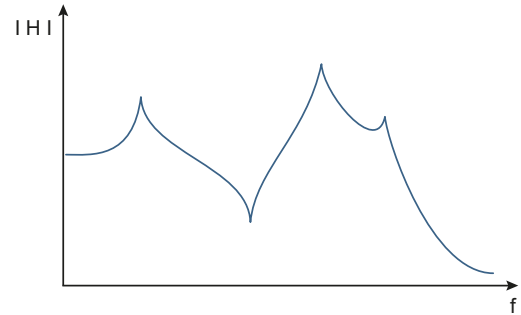
- **Eigenmode (auch Eigenform oder Mode, engl. eigenmode oder mode shape):** Die Eigenmode ist die theoretische Schwingungsform, die ein System bei einer Anregung mit der Eigenfrequenz f_0 zeigt. Eine Eigenmode ist eine inhärente Eigenschaft des Systems. Zu jeder Eigenfrequenz gehört eine spezifische Schwingungsform. Besitzt ein System mehrere Eigenfrequenzen, besitzt es auch mehrere Eigenmoden. Eine der wichtigsten Eigenschaften der Eigenmoden ist die Orthogonalität, d. h. die Moden sind voneinander linear unabhängig.

- **Schwingungsform (engl. deflection shape):** Eine dynamische, sich zeitlich verändernde Anregung regt eine schwingfähige Struktur zu einer Schwingung mit einer bestimmten Schwingungsform an. Die Schwingungsform wird durch die Bewegung der Strukturpunkte zueinander beschrieben. Sie ist abhängig von den dynamischen Eigenschaften der Struktur und von der Anregung. Jede Schwingungsform setzt sich als Linearkombination aus den einzelnen Eigenmoden zusammen. Der relative Anteil der einzelnen Eigenformen an der Gesamtschwingung ist abhängig von der Frequenzverteilung und vom Ort der Anregung. Auch eine Anregung mit nur einer Frequenz resultiert in einer Schwingung, die sich aus einer Kombination unterschiedlicher Eigenformen zusammensetzt.

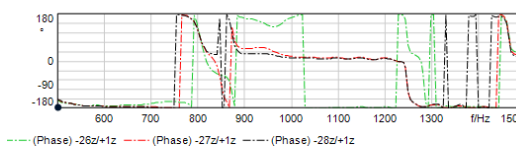
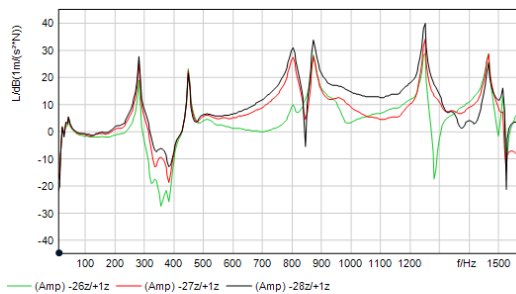


- **Starrkörpermode (engl. rigid body mode):** Bei einer Starrkörper-Mode bleibt die Struktur starr und verschiebt sich stattdessen als Ganzes. Die Bewegung erfolgt also ohne Verformungen, Dehnungen oder Spannungen. Eine freie Struktur im Raum verfügt über 6 Starrkörpermoden: Translationsbewegungen in x-, y-, z-Richtung und Rotationsbewegung um x-, y-, z-Achse. Die Eigenfrequenz der Starrkörpermoden ist 0 Hz. Bei einer realen Messung kann die tatsächliche Frequenz der Starrkörpermoden, z. B. aufgrund der elastischen Lagerung/Aufhängung, größer als 0 Hz sein.
- **Elastische Moden (engl. flexible mode):** Bei einer elastischen Mode wird eine Struktur verformt und oszilliert um einen Ruhezustand. Die Eigenfrequenzen elastischer Moden sind größer als 0 Hz.

- Übertragungsfunktion (engl. frequency response function, FRF oder transfer function):** Die Übertragungsfunktion beschreibt das frequenzabhängige Verhältnis von Schwingungsantwort einer Struktur zur Anregung. Bei Strukturen, die sich linear verhalten, kann die Systemantwort direkt aus dem Anregungssignal und der Übertragungsfunktion berechnet werden.



Eine Übertragungsfunktion enthält Informationen über die Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen und ein Set von Übertragungsfunktionen enthält darüber

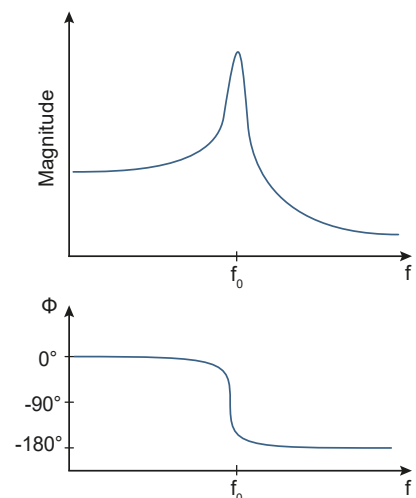


hinaus Informationen zu den dazugehörigen Eigenmoden des Systems. Die Übertragungsfunktionen enthalten Informationen über die Dynamik des Systems: Masse, Steifigkeit und Dämpfung bzw. Eigenfrequenzen, Eigenformen und modale Dämpfung.

Die Übertragungsfunktion ist eine komplexwertige Funktion, die durch Real- und Imaginärteil bzw. Magnitude und Phase dargestellt werden kann. Im sogenannten Bodediagramm wird die Magnitude und

Phase der Übertragungsfunktion in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt.

- Phase (engl. phase):** Die zeitliche Verschiebung zwischen dem Eingangssignal (Belastungskraft) und der Systemantwort ändert sich in Abhängigkeit von der Frequenz. Diese Verschiebung lässt sich in Form des Phasenganges (Phase über Frequenz) darstellen. Der Phasengang gibt Informationen zur relativen Schwingrichtung, die Modenform und über vorhandene Eigenfrequenzen. Die Systemantwort unterhalb der Eigenfrequenz ist mit der Anregung in Phase. Bei Erreichen der Eigenfrequenz f_0 kommt es schließlich zu einem Kippen der Phasenkurve. Oberhalb der Eigenfrequenz sind Eingangs- und Ausgangssignal um 180° verschoben.



- Kohärenz (engl. coherence):** Die Kohärenz beschreibt die lineare Abhängigkeit zwischen zwei Signalen im Frequenzbereich (z. B. zwischen Anregungssignal und Systemantwort). Mithilfe der Kohärenz zwischen Eingangs- und Ausgangssignal können Antwortanteile identifiziert werden, die nicht kausal auf dem Eingangssignal beruhen, sondern durch zusätzliche äußere Anregungen hervorgerufen

wurden. Weiterhin können Nichtlinearitäten eines Systems erkannt werden. Die Kohärenz kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und wird über der Frequenz aufgetragen. Die tatsächlichen Kohärenzwerte hängen sehr stark von der praktischen Anwendung ab. Im Bereich der Eigenfrequenzen sollte die Kohärenz sehr nahe bei 1 sein. Bei Antiresonanzen ist das Ton-Rausch-Verhältnis schlecht, an diesen Punkten bricht auch die Kohärenz ein. Dies lässt keine Rückschlüsse auf die Qualität der Messung zu.

Bei der Berechnung der Kohärenz muss berücksichtigt werden, dass erst durch die Mittelung mehrerer Messungen aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Ohne eine Mittelung nimmt die Kohärenz über dem gesamten Frequenzbereich den Wert 1 an.

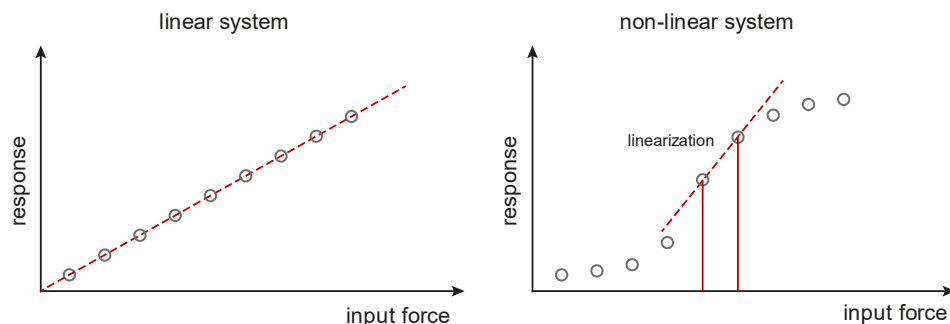
Wurde das System mit mehreren Eingangsquellen angeregt (z. B. mit mehreren Shakern) muss die partielle bzw. multiple Kohärenz bestimmt werden, um die Qualität der Messung zu bestimmen.

- Die partielle Kohärenz beschreibt die Linearität zwischen einem einzelnen Eingangs- und dem Ausgangssignal. Der lineare Einfluss anderer Eingangskanäle wird bei der Berechnung entfernt. Dies setzt voraus, dass die Eingangskanäle möglichst unkorreliert sind.
 - Die multiple Kohärenz liefert eine Aussage über die gemeinsame lineare Abhängigkeit zwischen mehreren Eingangs- und dem Ausgangssignal.
- **Linearität (engl. linearity):** Bei linearen Systemen ändert sich das Ausgangssignal proportional zum Anregungssignal. Für lineare Systeme gilt also das Superpositionsprinzip.

Kommt es zu einer Veränderung der Eigenschaften des Systems, z. B. durch Verformung oder durch Temperatureinflüsse, handelt es sich um ein nichtlineares System. Nichtlineare Eigenschaften erlangen besonders bei hohen Schwingungsamplituden stärkere Bedeutung.

Die Linearität eines Systems lässt sich durch die Berechnung der Kohärenz bei unterschiedlich starken Anregungen durch den Impulshammer überprüfen. Die Kohärenz bricht bei nichtlinearen Strukturen breitbandig ein.

Zur Untersuchung nichtlinearer Systeme können Messungen für eine bestimmte Kraftamplitude durchgeführt werden, für die das System dann als linear angenommen werden kann (abschnittsweise Linearisierung).

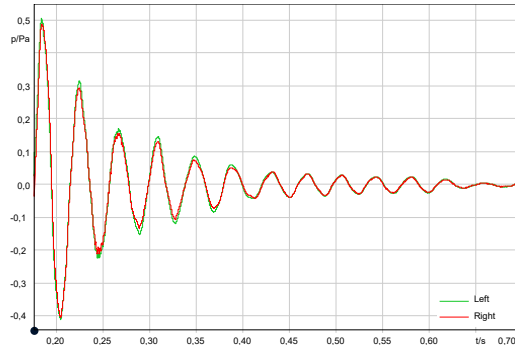


- **Reziprozität (engl. reciprocity):** Bei einem reziproken System ist die Übertragungsfunktion zwischen zwei Punkten unabhängig davon, an welchem Punkt angeregt bzw. die Systemantwort gemessen wird. D. h. Anregung an Punkt A und Messung der Antwort an Punkt B ergibt bei einem reziproken System dieselbe

Übertragungsfunktion wie Anregung an Punkt B und Messung der Antwort an Punkt A.

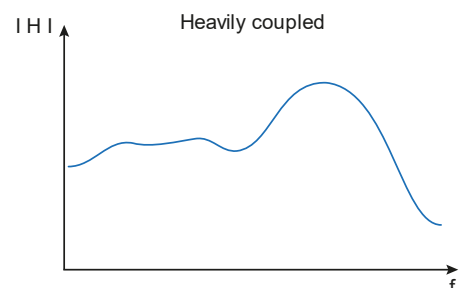
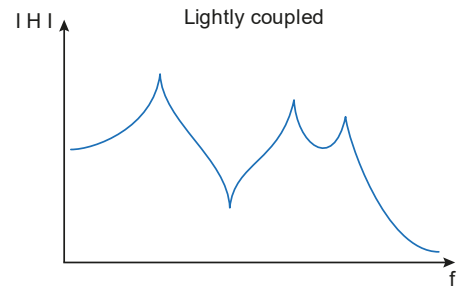
- **Zeitinvarianz (engl. time invariance):** Zeitinvariante Systeme verhalten sich unabhängig von der Zeit immer gleich. D. h. die zeitliche Verzögerung eines Eingangssignals führt zu einer entsprechend verzögerten Systemantwort, die Form des Ausgangssignals wird aber nicht beeinflusst.

- **Dämpfung (engl. damping):** Bei gedämpften, schwingfähigen Systemen nimmt die Amplitude der Schwingung mit der Zeit ab, sofern dem System keine weitere Energie zugeführt wird. Die Dämpfung bestimmt neben der Masse und der Steifigkeit sowie deren Verteilung das dynamische Verhalten einer schwingfähigen Struktur.



- **Modale Kopplung (engl. modal coupling):** Komplexe Systeme mit mehreren Freiheitsgraden (MDOF-Systeme) lassen sich als Summe mehrerer Einfreiheitsgrad-Systeme (SDOF-Systeme) beschreiben. Im Allgemeinen beeinflussen sich die einzelnen SDOF-Systeme gegenseitig. Diesen Effekt nennt man modale Kopplung. Der Grad der modalen Kopplung gibt an, wie stark die Systemantwort bei einer Eigenfrequenz durch den Beitrag anderer Moden beeinflusst wird. Grundsätzlich werden zwei Arten der modalen Kopplung unterschieden:

- Schwach gekoppelte Moden: Der Einfluss benachbarter Moden aufeinander ist klein und die einzelnen Moden sind in der Übertragungsfunktion leicht zu identifizieren. Strukturen mit einer solchen Eigenschaft verhalten sich im Bereich der Eigenfrequenzen ähnlich wie ein SDOF-System.
- Stark gekoppelte Moden: Die Moden beeinflussen sich gegenseitig und sind in der Übertragungsfunktion schwer oder gar nicht voneinander abzugrenzen. Die Struktur ist stark gedämpft und/oder weist eine hohe Modendichte auf. Die Ermittlung der modalen Parameter ist möglich, erweist sich aber als relativ schwierig.



➔ Weiter zur [zweiten Application Note über Strukturanalyse](#) mit einer Einführung in die experimentelle Modalanalyse