

Über dieses Dokument

Inhalt

Das vorliegende Dokument ist der zweite Teil einer Reihe von vier Application Notes über Strukturodynamik. Das Dokument beinhaltet eine Einführung in die experimentelle Modalanalyse mit Informationen über das benötigte Equipment und den generellen Ablauf.

1. Einleitung _____ 1
2. Erzeugung der Anregungssignale _____ 3
3. Erfassung der Beschleunigungen _____ 5
4. Ablauf einer Modalanalyse _____ 6

Zielgruppe

Dieses Dokument dient als Einstieg in die Strukturodynamik und wendet sich an Akustiker¹, die sich über die Grundlagen der experimentellen Modalanalyse informieren 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

Strukturodynamik – Teil 2 (EMA)

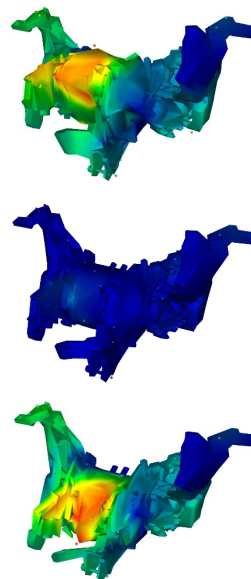
1. Einleitung

Was ist eine Modalanalyse?

Die experimentelle Modalanalyse (EMA) ist eine Methode zur Analyse der dynamischen Eigenschaften von linearen, zeitinvarianten Strukturen. Die dynamischen Eigenschaften werden durch die Masseverteilung, die Steifigkeit und die Dämpfung der Struktur bestimmt und beeinflussen deren Schwingungsverhalten. Die Modalanalyse gehört zu den Systemanalysen. Bei dieser Art der Analysen werden die Messungen mit einem Modell verknüpft (hier das modale Modell), um inhärente Eigenschaften der Struktur zu bestimmen.

Modale Parameter

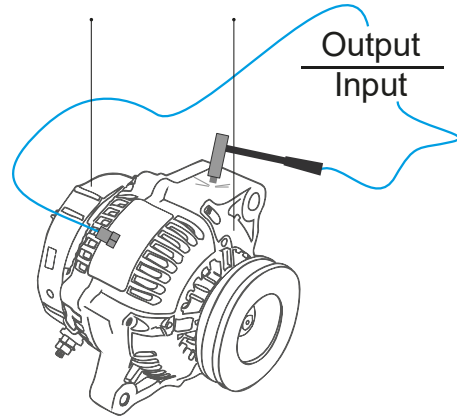
Ausgehend von Messungen an der realen Struktur werden die modalen Größen mittels entsprechender Software bestimmt und visualisiert. Die modalen Größen sind die Eigenfrequenzen, die Eigenformen und die modale Dämpfung.



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.

Grundprinzip der EMA

Ziel der experimentellen Modalanalyse ist es, das Schwingungsverhalten einer realen Struktur basierend auf gemessenen Übertragungsfunktionen zu bestimmen. Die Übertragungsfunktionen beschreiben die Zusammenhänge zwischen einer in die Struktur eingebrachten Anregungskraft und den dadurch an verschiedenen Punkten der Struktur angeregten Schwingungen im Frequenzbereich. Um diese Übertragungsfunktionen zu bestimmen, werden die Zeitsignale der anregenden Kraft und die Reaktion des Systems auf die eingebrachte Kraft gleichzeitig gemessen. Dabei darf es zu keiner nennenswerten sekundären Anregung des Systems kommen. Das System ist also nicht im Betrieb und wird von seiner Umgebung entkoppelt, um ungewollten Körperschalleintrag zu verhindern. Die einzige Anregung erfolgt durch den Impulshammer bzw. Shaker. Die Erregerkraft ist in diesem Zusammenhang nicht statisch. Vielmehr hat die Erregerkraft einen oszillierenden Verlauf, deren Frequenz und Amplitude mithilfe eines Kraftnehmers gemessen wird. Die Systemantwort kann mithilfe von Weg-, Geschwindigkeits- oder Beschleunigungssensoren gemessen werden. In der Praxis werden für diese Messungen am häufigsten Beschleunigungssensoren verwendet. Bei der Auswahl und Anzahl der Messpunkte muss berücksichtigt werden, dass nur mit einer hinreichenden Anzahl an Messpunkten und deren geeigneten Platzierung sowie einer geeigneten Anregung alle Eigenfrequenzen erfasst und die entsprechende Eigenform geometrisch aufgelöst werden können.



Die Modalanalyse ist eine lineare Analyse. Jegliche Nichtlinearitäten, z. B. die Plastizität eines Bauteils, würden die gemessenen Übertragungsfunktionen und die aus ihnen gezogenen Schlüsse verfälschen. Die Linearität eines Systems kann teilweise durch die Beobachtung der Kohärenz bei unterschiedlich starken Anregungen, z. B. durch einen Impulshammer, untersucht werden. Bei unterschiedlich starken Anregungen bricht die Kohärenz bei nichtlinearen Strukturen breitbandig ein. Andere Einflüsse, z. B. durch Temperatur, Luftfeuchte, Sensormasseneinfluss, müssen durch andere Methoden geprüft werden.

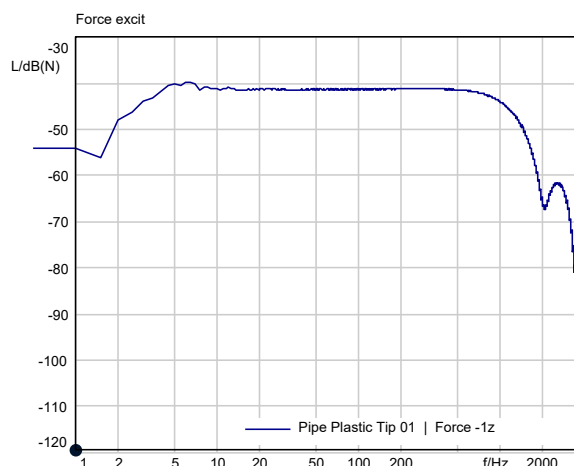


2. Erzeugung der Anregungssignale

Für die Anregung der Struktur haben sich zwei Vorgehensweisen etabliert:

Anregung durch
Impulshammer

Anregung mit einem Impulshammer: Bei der Anregung mit einem Impulshammer werden Kraftimpulse über Hammerschläge in die Struktur eingeleitet, um diese breitbandig anzuregen. Ein Impulshammer besitzt einen Kraftsensor, der die beim Anschlagen eingebrachte Kraft misst. Die Masse und die Steifigkeit des Impulshammers sowie der Struktur beeinflussen die Form des Anregungsspektrums. Die Flankensteilheit des Impulses ist entscheidend für den angeregten Frequenzbereich. Der ideale Hammerschlag wäre ein Dirac-Stoß, also eine konstante Anregung über alle Frequenzen. Bei einem realen Hammerschlag fällt das Anregungsspektrum jedoch zu hohen Frequenzen hin ab. Ziel ist eine über den relevanten Frequenzbereich möglichst konstante spektrale Leistungsdichte. Wird eine harte Struktur mit einem relativ leichten Hammer angeregt, hängt das Anregungsspektrum vorwiegend von der Steifigkeit der Hammerspitze ab. Zum Standardzubehör eines Impulshammers gehören meist eine Zusatzmasse und verschiedene Anschlagspitzen (Stahl, Aluminium, Kunststoff, Gummi). Durch die geeignete Auswahl der Hammerspitze kann das Erregerspektrum auf den relevanten Frequenzbereich abgestimmt werden. Unter Umständen ist es empfehlenswert Hammerspitzen aus unterschiedlichem Material zu verwenden und die resultierenden Übertragungsfunktionen zu kombinieren. Es werden Impulshämmer mit sehr unterschiedlichen Massen angeboten (von einem Gramm bis zu mehreren Kilogramm). Kombiniert man eine kleine Masse und eine steife Hammerspitze, lässt sich ein breites Spektrum anregen, während durch die Kombination einer hohen Masse und einer weichen Hammerspitze nur ein schmales Spektrum angeregt wird. Der nutzbare Frequenzbereich, der sich mit



einem sehr schweren Impulshammer anregen lässt, reicht bis ca. 10 Hz. Mit kleinen Impulshämmern können Frequenzen bis über 5000 Hz angeregt werden. Der Kurvenverlauf der anregenden Kraft sollte im relevanten Frequenzbereich relativ flach sein (siehe links). Als Daumenregel gilt: Ein ausreichender Energieeintrag ist erfolgt, wenn die Amplitude der Kraftanregung max. um 10 bis 20 dB abfällt. Im Falle von nichtlinearen Strukturen

mit ausgeprägter Abhängigkeit zur Kraftamplitude werden automatische Hammer eingesetzt, die reproduzierbar einen sehr ähnlichen Impuls in die Struktur einbringen.

Anregung durch Shaker

Anregung mit einem Shakersystem: Die Shaker bestehen in der Regel aus einer Schwingquelle sowie einem Kraftsensor, um die eingeleitete Kraft aufzuzeichnen.



Es werden Shaker unterschiedlicher Bauart angeboten (z. B. elektrohydraulisch, elektromagnetisch oder piezoelektrisch). Die Auswahl sollte unter Berücksichtigung der Anforderungen, wie gewünschter Frequenzbereich und statische Vorlast, erfolgen. Für die Anregung wird das Shakersystem mit einem Anregungssignal gespeist. Bei der Verwendung mehrerer Shaker (MIMO-Messung) müssen unkorrelierte Anregungssignale verwendet werden. Die Auswahl des Anregungssignals (z. B. sweep, random noise, burst) muss der Anwender entsprechend seines Anwendungsfalls treffen.

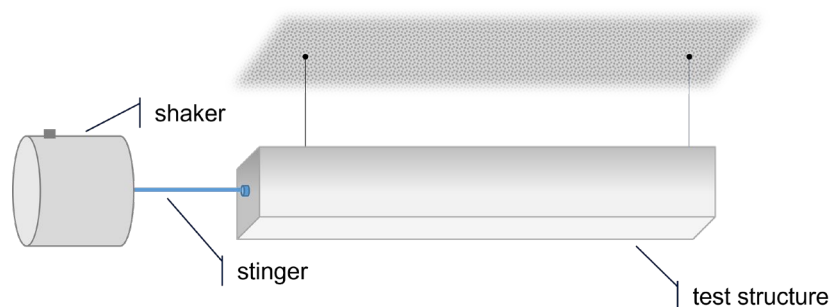
Weiterhin muss bei der Konzeption des Messaufbaus berücksichtigt werden, dass die Ankopplung des Shakers an die Struktur deren dynamisches Verhalten beeinflussen kann.

Im Folgenden einige Beispiele, was bei dem Messaufbau beachtet werden sollte:

- Die Kräfteinleitung durch den Shaker erfolgt nur in der gewünschten Richtung (keine Querkräfte).
- Die Teststruktur kann sich trotz Shaker frei bewegen.
- Der Shaker beeinflusst die Masseverteilung der Teststruktur nicht oder nur sehr gering.
- Der Shaker regt die Struktur an einer geeigneten Stelle an (also z.B. nicht in einem Schwingungsknotenpunkt).

Verwendung eines Stingers

Zur Vermeidung von Querkräften wird z. B. ein Stinger für die Kraftübertragung vom Shaker zur Struktur verwendet.



Vor- und Nachteile

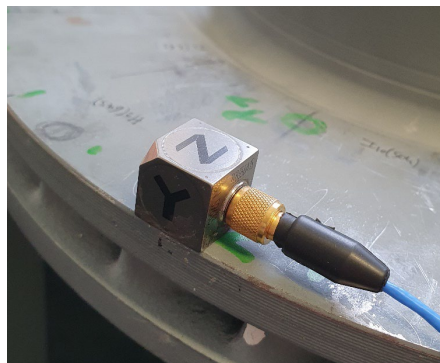
Theoretisch sollten sich die Ergebnisse aus Messungen mit Shakeranregung und Messungen mit Impulshammeranregung nicht unterscheiden. Da aber in der Praxis an realen Strukturen gemessen wird, kommt es zu Unterschieden: Bei der Anregung mit einem Shaker kann die Ankopplung an die Struktur Veränderungen bei den Eigenmoden verursachen. Bei der Messung mit Shakeranregung und der Methode Roving Accelerometer wird typischerweise mit vielen Beschleunigungsaufnehmern gearbeitet. Durch das Anbringen dieser Sensoren wird allerdings die Massenverteilung der Struktur für jede Messung verändert. Diese Änderung kann wiederum Auswirkungen auf das Schwingverhalten der Struktur haben.

Anregung mit Shaker	Anregung mit Impulshammer
<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> definiertes Anregungssignal, somit wählbarer Frequenzbereich Langzeitmessung Messung von sehr stark gedämpften Strukturen möglich 	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> Günstig und mobil einsetzbar Schnell einsatzbereit Geringer zeitlicher Aufwand für eine Messung
<p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> für den mobilen Einsatz eher ungeeignet aufwendiger und teurer zu realisieren 	<p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> Reproduzierbarkeit bei manueller Anregung problematisch nicht geeignet für sehr stark gedämpfte Strukturen beschränkter Frequenzbereich

3. Erfassung der Beschleunigungen

Hinweise zu Beschleunigungssensoren

Mithilfe von Beschleunigungssensoren lassen sich die Beschleunigungen der Struktur messen. Meist werden piezoelektrische Beschleunigungssensoren eingesetzt. Beim Anbringen der Beschleunigungsaufnehmer muss berücksichtigt werden, dass das Auf-



bringen von zusätzlichen Massen auf eine Struktur die Eigenfrequenzen in niedrigere Frequenzbereiche verschiebt. Der Gewichtseinfluss der Beschleunigungsaufnehmer darf nicht unterschätzt werden. Um diesen Effekt zu reduzieren, sollte die Sensormasse im Vergleich zur Masse der Struktur sehr klein sein. Weiterhin muss das Kabel des Sensors so verlegt werden, dass Störeinflüsse minimiert werden.

Abgesehen von den Sensoreigenschaften entscheidet auch die Befestigung des Sensors auf der Struktur über den erfassbaren Frequenzbereich. Neben der permanenten Befestigung, durch Schrauben oder Steckverbindungen, können die Sensoren magnetisch oder mit Wachs oder Klebstoff (z. B. Sekundenkleber oder X60) an der Struktur angebracht werden. Je höher der gewünschte Frequenzbereich, desto steifer muss die Verbindungen zwischen Sensor und Struktur sein.

Beschleunigungsaufnehmer haben üblicherweise einen Messbereich zwischen 1 und 10.000 Hz. Es muss darauf geachtet werden, dass die Eigenfrequenz des Sensors nicht im angestrebten Messbereich liegt.

Wahl des Koordinatensystems

Die Ausrichtung der Beschleunigungsaufnehmer muss auf das lokale Koordinatensystem des zugehörigen Messpunkts abgestimmt werden (siehe auch 1. Schritt im folgenden Kapitel), ansonsten kommt es zu Fehlern bei der Modalanalyse. Die lokalen Koordinaten werden durch ArtemiS SUITE automatisch im Hintergrund in ein globales

Koordinatensystem transformiert. Durch die Auswahl eines geeigneten lokalen Koordinatensystems kann in vielen Fällen auf das Applizieren der Beschleunigungsaufnehmer mit Montageplättchen² verzichtet werden.

Der ideale Beschleunigungssensor

Ein idealer Beschleunigungsaufnehmer sollte eine hohe Empfindlichkeit, einen breiten Frequenzbereich und eine geringe Masse besitzen. In der Realität müssen allerdings meist Kompromisse gemacht werden, da z. B. eine hohe Empfindlichkeit oft eine höhere Masse des Sensors erfordert.

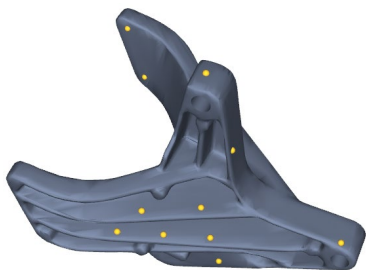
Laservibrometer

In einigen Anwendungsfällen ist der Einsatz von berührenden Sensoren nicht sinnvoll oder technisch nicht möglich, etwa bei einem ungünstigen Massenverhältnis zwischen Sensor und Messstruktur. Hier ist der Einsatz eines Laser-Doppler-Vibrometers als berührungslose Messmethode zu erwägen, da diese die Bewegung der Struktur ohne das Aufbringen zusätzlicher Masse bestimmen kann.

4. Ablauf einer Modalanalyse

1. Schritt

Das grundsätzliche Vorgehen bei der experimentellen Modalanalyse lässt sich in vier Abschnitte unterteilen. Im ersten Schritt wird ein Ersatzmodell der zu untersuchenden Struktur erstellt. Die Struktur wird dazu mit einer endlichen Anzahl von Strukturpunkten angenähert. Dabei ist es wichtig, für die Modellerstellung und alle Messungen einheitliche Koordinatensysteme und einheitliche Messpunktbezeichnungen zu verwenden. Nur so kann eine fehlerfreie Zuordnung der Messergebnisse bei der Auswertung erfolgen. Weiterhin muss die Anzahl und Position der Mess- bzw. Strukturpunkte bei der Modellerstellung so gewählt werden, dass die Schwingformen im gewünschten Frequenzbereich auch tatsächlich identifiziert werden können. Wie bei der zeitlichen



Diskretisierung analoger Signale können Struktur-schwingungen nur dann valide identifiziert werden, wenn eine adäquate Anzahl von Messpunkten an geeigneten Positionen betrachtet wird. Ansonsten werden bei höherfrequenten Schwingungen die entsprechenden Eigenmoden nicht korrekt erkannt, sondern zeigen stattdessen dieselben räumlichen Schwingungsbilder wie Eigenmoden mit niedrigerer Frequenz (räumlicher Aliasing-Effekt). Außerdem muss berücksichtigt werden, dass ein Sensor, der an einem Knotenpunkt einer Schwingform appliziert wurde, diese nicht aufzeichnen kann.

Für eine realistischere Visualisierung können in ArtemiS SUITE zusätzlich zu den Messpunkten auch Modellpunkte in Form eines 3D-Modells des Messobjekts angelegt werden.

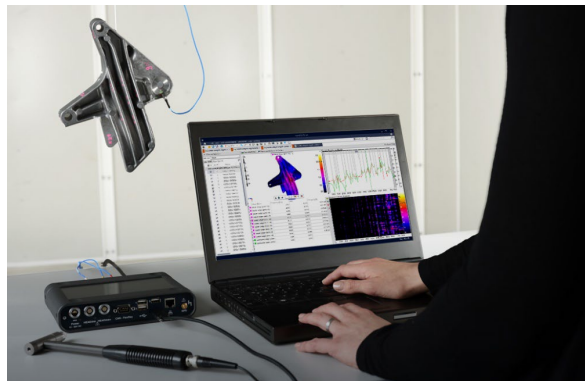
2. Schritt

Im zweiten Schritt müssen sinnvolle Anregungspunkte auf der Struktur definiert werden. Nicht alle Punkte einer Struktur eignen sich gleichermaßen zur Kräfteinleitung. Es müssen die Punkte auf der Struktur gefunden werden, bei deren Anregung alle interessierenden Schwingungsformen auch tatsächlich angeregt werden. Dies ist nicht

² Montageplättchen werden ansonsten verwendet, um den Winkel des Sensors an das globale Koordinatensystem anzupassen.

bei allen Punkten gewährleistet. Liegen bereits Erfahrungen mit einem Testobjekt vor, sind in der Regel die geeigneten Anregungspunkte bekannt. Ist dies nicht der Fall, können diese durch numerische Methoden oder durch Testmessungen bestimmt werden. In einigen Anwendungsfällen, insbesondere wenn mehrere Schwingungsformen einer Struktur relevant sind, reicht ein einziger Anregungspunkt eventuell nicht aus.

3. Schritt

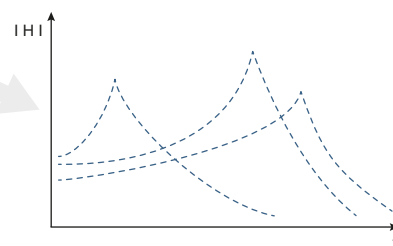
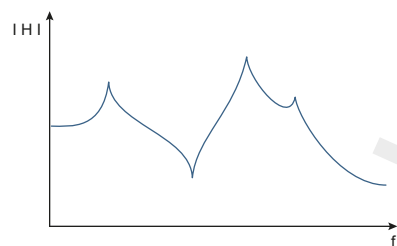


Im nächsten Schritt werden die Messungen durchgeführt und die Übertragungsfunktionen bestimmt. Dazu wird die zu untersuchende Struktur an dem/den zuvor festgelegten Messpunkt(en) mit einer Kraft (Impulshammer oder Shaker) angeregt und gleichzeitig die Systemantwort ermittelt. Die Amplitude der Systemantwort ändert sich in Abhängigkeit mit

der Frequenz der Erregerkraft. Wird das System mit einer Frequenz nahe einer der Eigenfrequenzen angeregt, ist die Systemantwort maximal. Die erfassten Zeitsignale werden in den Frequenzbereich übertragen. Aus den gemittelten Frequenzspekren werden die Übertragungsfunktionen und die Kohärenz bestimmt. Um Unregelmäßigkeiten, z. B. Störsignale oder Rauschen in den einzelnen Messungen, zu eliminieren, werden die Analyseergebnisse mehrerer Messungen gemittelt. Dabei kann die Kohärenz zur Beurteilung der Qualität der ermittelten Übertragungsfunktion herangezogen werden.

4. Schritt

Im vierten Schritt werden aus den gemessenen Übertragungsfunktionen mittels Curve Fitting die modalen Parameter bestimmt. Hierbei kommen unterschiedliche Methoden



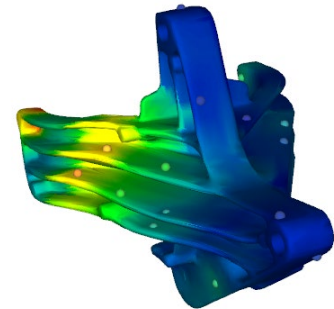
zum Einsatz, z. B. SDOF- und MDOF-Verfahren. SDOF-Verfahren können nur eingesetzt werden, wenn

schwach gekoppelte Moden vorliegen, d. h. hinreichend weit auseinanderliegende Eigenfrequenzen in einem schwach gedämpften System vorliegen. Sind die Eigenmoden des Testobjekts gekoppelt, sollten MDOF-Verfahren eingesetzt werden. Weiterhin wird zwischen lokalen und globalen Methoden unterschieden. Lokale Methoden nutzen jeweils eine einzelne Übertragungsfunktion für das Curve Fitting. Bei globalen Methoden wird ein ganzes Set von Übertragungsfunktionen ausgewertet. Das Verfahren heißt Curve-Fitting, weil die modalen Parameter bestimmt werden, indem die gemessene Übertragungsfunktion möglichst gut angenähert wird. Wird das Verfahren für mehrere Übertragungsfunktionen zeitgleich durchgeführt, können

zusätzlich die zu den Eigenfrequenzen gehörigen Eigenformen der Struktur ermittelt werden.

Visualisierung

Bei der Visualisierung werden die gewonnenen Informationen über die modalen Parameter auf das Strukturmodell mit den verschiedenen Messpunkten angewendet. So kann für jede Frequenz die Eigenmoden am Strukturmodell grafisch animiert und damit für Anwender anschaulich dargestellt werden.



Weitere Auswertungen

Die Ergebnisse der Modalanalyse können direkt zur Analyse des dynamischen Verhaltens von Strukturen und deren Schwingungsprobleme benutzt werden und sind der Startpunkt zur Optimierung des dynamischen Schwingungsverhaltens. Weiterhin können anhand der Ergebnisse auch mathematische Modelle validiert und deren Parameter an das wirkliche Verhalten angepasst werden. Dazu werden die Ergebnisse der Modalanalyse mit dem berechneten Schwingungsverhalten aus numerischen Simulationen, wie z. B. der Finite-Elemente-Methode, verglichen und falls nötig das FE-Modell optimiert. Die Anpassung der mathematischen Modelle kann notwendig sein, wenn z. B. Materialparameter und Geometrie für die Simulation nicht hinreichend genau bekannt sind oder die Geometrie beispielsweise durch Fügestellen unterbrochen ist, die in der Modellierung nur angenähert abgebildet werden können. Umgekehrt kann durch den Abgleich von Messung und Simulation auch ein Hinweis auf Ungenauigkeiten in der Messung gegeben werden. Ein weiterer Anwendungsfall für die Ergebnisse einer Modalanalyse ist die Verwendung der ermittelten modalen Dämpfung als Eingangsparemeter für Finite-Elemente-Modelle.



Weiter zur [dritten Application Note über Strukturanalyse](#) mit einer Einführung in die Betriebschwingformanalyse