

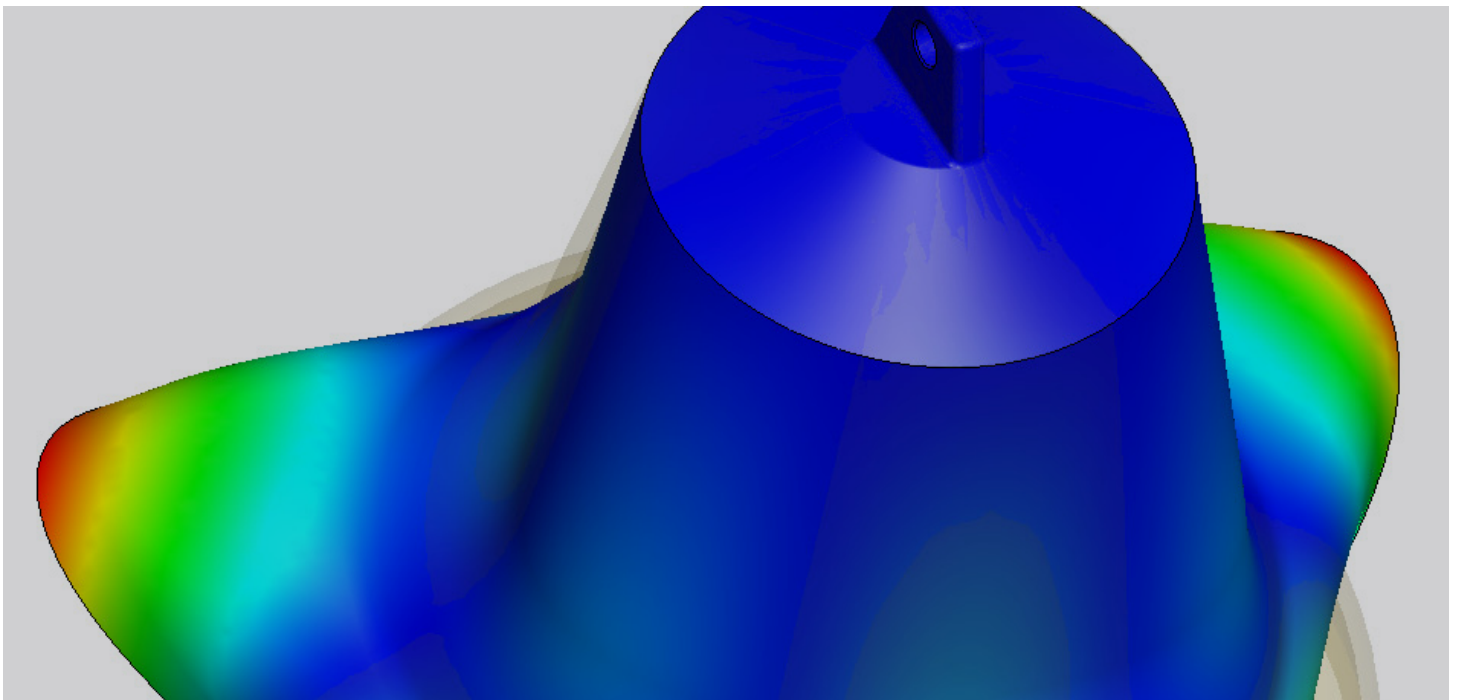
---

# RATIONALISIERUNG DER KONSTRUKTION MIT EINER VIBRATIONSANALYSE UNTER REALEN BEDINGUNGEN

---

## Übersicht

Konstrukteure setzen häufig Vibrationssimulation als zeitsparende und kosteneffiziente Alternative zum herkömmlichen Ansatz ein, bei dem die Konstruktion gebaut, getestet, modifiziert und erneut getestet werden muss. Durch das Ermitteln der Faktoren, die die Reaktion auf eine dynamische Last in einem Computermodell beeinflussen, erhalten Konstrukteure die erforderlichen Daten, um die richtigen Verbesserungen durchzuführen, bevor auch nur ein einziges Stück Metall geschnitten wird. Neben der Tatsache, dass durch die Vibrationsanalyse die Anzahl von tatsächlich erforderlichen Prototypen reduziert wird, werden auch die damit verbundenen Kosten verringert.



## Einführung in die dynamische Simulation

Mithilfe der dynamischen Simulation sind Konstrukteure in der Lage, bessere Produkte zu erzeugen. Bei der Konstruktion eines Produkts ergeben sich häufig folgende betriebsbedingte Fragen:

- Wie groß ist der Fehler, der durch die in der Montagevorrichtung auf einer Fräsmaschine entstehenden Schwingungen in einem Werkzeug hervorgerufen wird?
- Können die Ermüdungserscheinungen eines Spielers durch das Verringern der spürbaren Vibrationen durch einen neuen Tennis- oder Golfschläger gemindert werden?
- Können sich Verbindungen in Bauteilen beim Transport von Elektronikgeräten aufgrund der Vibrationen des Straßenverkehrs lösen?
- Wie dick muss die Motorblockhalterung in einem Automobil sein, ohne sie hinsichtlich Gewicht und Kosten zu überdimensionieren?
- Kann vorhergesagt werden, ob die Spindeldrehzahl einer Ölbohranlage das System in einem sicheren Betriebsbereich hält, ohne dass das System durch die auftretenden Schwingungen beschädigt wird?
- Müssen Systeme oder Konstruktionen den Vibrations- und seismischen Anforderungen der Normen MIL SPEC, Telcordia GR-63 und dem Uniform Building Code (UBC) entsprechen?

In der Vergangenheit haben Sie die Antworten auf derartige Fragen möglicherweise durch manuelle Berechnungen und einige Konstruktions-, Test- und Neukonstruktionszyklen gefunden. Mithilfe der dynamischen Simulation können Sie nun getroffene Annahmen bereits in der ersten Konstruktionsphase in konkretes Wissen umwandeln.

Immer wenn ein Bauteil oder eine Baugruppe einer sich ändernden oder dynamischen Last ausgesetzt wird, reagiert oder vibriert sie möglicherweise auf eine Art, die zwar unerwünscht ist, aber sich nicht negativ auf das Bauteil auswirkt, oder die das Bauteil derart gefährdet, dass Versagen auftreten kann. Betrachten Sie die folgenden drei konkreten Beispiele: Auch wenn die Vibrationen eines schlecht konzipierten kabellosen Bohrers den Verbraucher nicht unbedingt dazu veranlassen, das Gerät zurückzugeben, besteht die große Wahrscheinlichkeit, dass er seinen Freunden und Bekannten davon abrät, dieses Gerät zu kaufen. Ein potenzieller Käufer, der während einer Probefahrt unangenehme Vibrationen durch Fahrbahneinflüsse spürt, könnte davon abgebracht werden, das Fahrzeug zu kaufen. Dadurch geht ein Kundengeschäft verloren. Die durch Vibrationen beim Transport ausgelösten Spannungen auf das mechanische Gehäuse oder auf die Lötstellen können sich auf sensible Elektronikgeräte zerstörend auswirken.

Hauptziel der Vibrationsanalyse ist es festzustellen, ob es durch transiente Eingabegrößen zu inakzeptablen Reaktionen hinsichtlich eines tatsächlichen Bauteilversagens oder in Bezug auf die Wahrnehmung des Anwenders kommen kann. Dank dieses detaillierten Wissens können Verbesserungen an der Konstruktion vorgenommen werden, noch bevor ein Prototyp oder eine tatsächliche Konstruktion gebaut wird. Auf den folgenden Seiten werden verschiedene Ansätze zum Prüfen von Vibrationen erörtert. Des Weiteren werden die Auswirkungen von Vibrationen auf den Erfolg Ihrer Konstruktion untersucht.

---

Hauptziel der Vibrationsanalyse ist es festzustellen, ob es durch transiente Eingabegrößen zu inakzeptablen Reaktionen hinsichtlich eines tatsächlichen Bauteilversagens oder in Bezug auf die Wahrnehmung des Anwenders kommen kann.

## Drei verschiedene Arten von Vibrationen

Betrachten Sie das folgende Beispiel, das die Grundkonzepte von Vibrationen und die zu ihrer Simulation verwendeten Techniken illustriert. Sie möchten die Katze Ihres Nachbarn davon abbringen, auf Ihr Vogelfutterhaus zu klettern und dort auf eine leckere Mahlzeit zu warten. Wenn Sie dem Pfosten, auf dem das Vogelfutterhaus befestigt ist, einen kleinen Stoß versetzen, ist die Geschwindigkeit und die Verschiebung des Vogelhauses linear proportional zur Geschwindigkeit und Größe des Stoßes (Abbildung 1a). Wenn Sie nun jedoch den Pfosten zwar mit dem gleichen Kraftbetrag, aber mit größerer Geschwindigkeit schütteln, verursachen Sie dadurch ein Schwingen am oberen Ende des Pfostens, und Sie erreichen Ihr ursprüngliches Ziel, dass die unliebsame Katze verschwindet (Abbildung 1b).

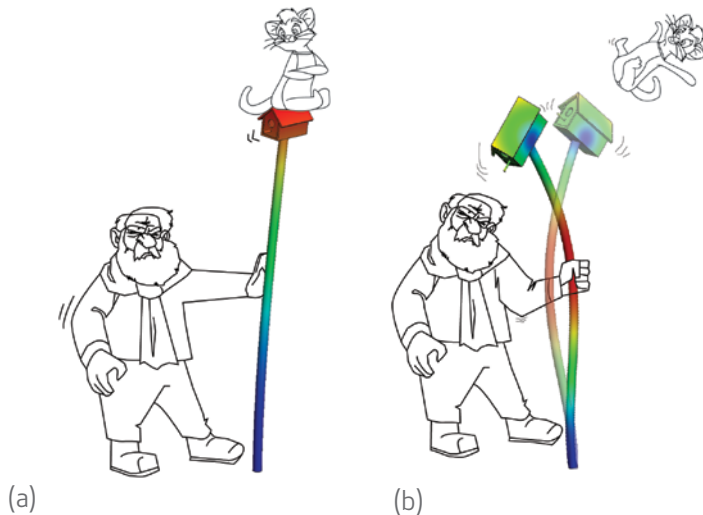


Abbildung 1: Langsames Schütteln des Pfostens (a) im Vergleich zur Vibration, die durch eine schnellere Anregung verursacht wird (b)

Dieser schwingende Effekt zeigt, dass die Schüttelgeschwindigkeit eine Resonanz im System des Vogelhauses angeregt hat: Die Ausgangsgröße (a) ist nun unverhältnismäßig hoch im Vergleich zur Eingangsgröße (b), sehr zum Leidwesen der Katze.

Diese Hin- und Herbewegung stellt eine vereinfachte Ansicht der Vorgänge dar, die bei Vibrationen auftreten. Eine zeitabhängige Eingangsgröße, durch die eine Resonanz im System erzeugt wird, kann eine dramatische, wenn nicht sogar katastrophale Reaktion hervorrufen. Eine ähnliche Eingangsgröße bei unterschiedlicher Geschwindigkeit, die keine Resonanz anregt, gibt möglicherweise keinen Anlass zur Sorge. Diese Konzepte sind auf Systeme jeder Komplexität anwendbar. Demzufolge lässt sich mithilfe der Vibrationsanalyse ermitteln, zu welchem Zeitpunkt die induzierten Schwingungen zu unwesentlichen oder katastrophalen Reaktionen am Produkt führen.

Vibrationen können auf drei verschiedene Arten, im Wesentlichen durch die Beschaffenheit oder die Form der steuernden Eingangsgröße, beschrieben werden:

1. Im physischen oder zeitlichen Bereich können Sie davon ausgehen, dass Sie die tatsächliche Bewegungsänderung in Echtzeit erleben. Eine Simulation im Zeitbereich wird häufig als transiente Analyse bezeichnet. Im oben angeführten Beispiel mit dem Vogelhaus können die Frequenz der Stöße pro Minute sowie die Amplitude des Stoßes gemessen werden. Diese Werte können dann in eine Simulation eingegeben werden. Wenn Sie die Eingabegeschwindigkeit in der Simulation erhöhen, können Sie die gleiche Erhöhung der Geschwindigkeit und der Verschiebung am oberen Ende des Pfostens beobachten und messen, als ob Sie direkt in Ihrem Garten stehen würden. Eine weitere denkbare Ausgabe ist die Zeit oder die Anzahl der Schwingungen des Pfostens bis zum Erreichen der Ruheposition aufgrund der natürlichen Dämpfung, sobald keine Stöße mehr auf den Pfosten ausgeübt werden.

Mithilfe der Vibrationsanalyse lässt sich ermitteln, zu welchem Zeitpunkt die induzierten Schwingungen zu unwesentlichen oder katastrophalen Reaktionen am Produkt führen.

Bei der transienten Beschreibung eines dynamischen Ereignisses kann sich jeder Parameter (wie Geschwindigkeit, Betrag, Richtung und Anzahl der Eingabegrößen) wie bei einem Echtzeitereignis ändern. Bei der Computersimulation dieser Ereignisse werden die Ausgaben statt in einer kontinuierlichen Reaktion in bestimmten Zeitintervallen wiedergegeben. Dies ist das ewige Dilemma zwischen digital und analog. Je länger diese Situation simuliert wird, desto mehr Zeit und Ressourcen verbraucht die Lösung dieser Probleme. Sie müssen ausreichend kleine Zeitschritte festlegen, um alle Änderungen sowie die Reaktionen auf diese Änderungen zu erfassen. Eine allgemeine Richtlinie für das Festlegen der Anzahl erforderlicher Zeitschritte geht von fünf pro Spitzen- bzw. Tiefstwert in einer Reaktion aus. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, kann diese Zahl für eine transiente Analyse eines Ereignisses schnell ansteigen.

Bei der transienten Beschreibung eines dynamischen Ereignisses kann sich jeder Parameter (wie Geschwindigkeit, Betrag, Richtung und Anzahl der Eingabegrößen) wie bei einem Echtzeitereignis ändern.

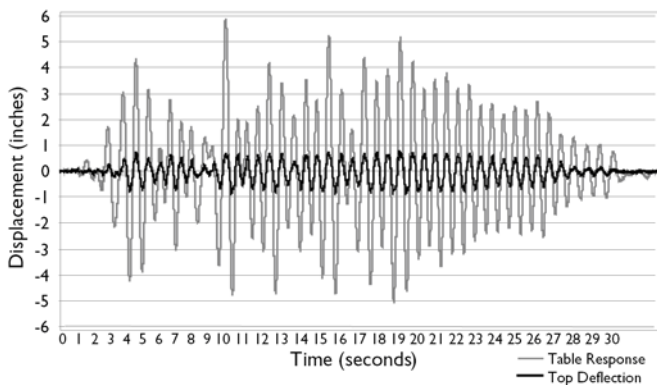


Abbildung 2: Transiente Eingabe für einen Rütteltischtest

- Beim Frequenzbereichsansatz kann lediglich eine Ausgabegröße im Vergleich zur Eingabegröße bei einer bestimmten Frequenz berücksichtigt werden. Sie müssen davon ausgehen, dass alle Eingaben von Natur aus zyklisch (sinusförmig) sind und eine konstante Amplitude bei dieser Frequenz aufweisen. Diese vereinfachte Ausgabe ist am effizientesten, wenn sich die Eingabe nur in der Geschwindigkeit unterscheidet, nicht aber in Amplitude, Ausrichtung oder Anzahl der Eingaben. Diese Methode wird häufig verwendet, um die Eingabefrequenz über den Betriebsbereich hinweg zu variieren bzw. auszutragen und damit die maximal mögliche Reaktion zu ermitteln, wie dies auf einem Rütteltisch geschieht (Abbildung 3).



Abbildung 3: Automatisches Rüttelgerät mit variabler Frequenz in der Anwendung auf ein Vogelfutterhaus, Katzenbeseitigungsproblem

Die Eingabe kann aus einer einfachen maximalen Kraft, Verschiebung oder Beschleunigung bei einer bestimmten Frequenz bestehen oder aus einer komplexen Funktion bzw. Tabelle, in der beschrieben wird, wie sich die Eingabegröße mit der Frequenz ändert.

3. Bei der dritten Art der Beschreibung von Vibrationen wagen wir uns in den Bereich der Statistik und der Wahrscheinlichkeitsrechnungen vor. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird dieser Ansatz häufig fälschlicherweise mit Zufallsvibrationen gleichgesetzt. Situationen, in denen eine Zufallsvibrationsstudie erforderlich ist, weisen eine Eingabegeschwindigkeit bzw. -frequenz und eine Amplitude auf, die nicht wiederholbar sind, deren Durchschnittsbelastung aber vorhersehbar ist. Folglich müssen Sie eine mathematisch repräsentative Eingabe über einen bestimmten Zeitraum erstellen, um eine wahrscheinliche Eingabeenergie bei einer bestimmten Frequenz zu bestimmen.

Mithilfe einer spektralen Leistungsdichtefunktion (oder -tabelle) kann die Vielzahl an erwarteten Energiewerten in den relevanten Frequenzbereichen abgebildet werden. Ein vergleichender Ansatz bietet die beste Möglichkeit zur Bewertung der Ausgabegrößen dieser Probleme, da Sie die Erhöhung oder Verringerung der Spannung oder Verschiebung, die sich auf ein System bei einer bestimmten Änderung dieser Eingaben auswirkt, angezeigt bekommen. Die spektrale Leistungsdichtefunktion (oder -tabelle) ist zwar ein eher annähernder Ansatz im Vergleich zu den beiden anderen Methoden, aber sie ist die einzige Möglichkeit, die Reaktionen eines Systems auf variable Eingabegrößen zu beschreiben, wie sie bei Erdbeben oder Fahrbananregungen auftreten (Abbildung 4).

---

Mithilfe einer spektralen Leistungsdichtefunktion (oder -tabelle) kann die Vielzahl an erwarteten Energiewerten in den relevanten Frequenzbereichen abgebildet werden.

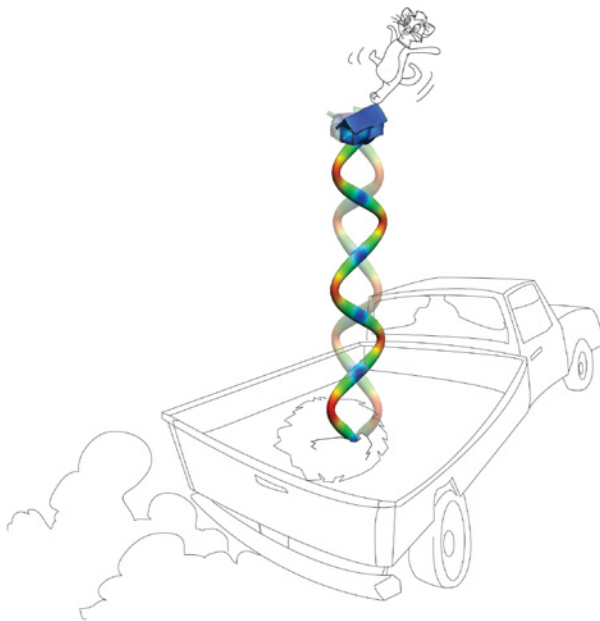


Abbildung 4: Automatisches Rüttelgerät mit variabler Frequenz in der Anwendung auf ein Vogelfutterhaus, Katzenbeseitigungsproblem

## Definition der Grundlagen der Vibrationssimulation

### Statische und dynamische Analysen

Bei statistischen Studien wird von der Annahme ausgegangen, dass Lasten konstant sind oder sehr langsam bis zum Erreichen ihres Höchstwerts aufgebracht werden. Danach bleiben die Lasten über die restliche Zeitdauer konstant. Aufgrund dieser Annahme werden alle Trägheitseffekte als vernachlässigbar betrachtet, einschließlich der Geschwindigkeit und Beschleunigung des angeregten Systems. Folglich erzeugen statische Studien konstante Spannungen und Verschiebungen.

Aus zahlreichen praktischen Gründen werden Lasten jedoch entweder nicht langsam aufgebracht oder sie ändern sich mit der Zeit oder der Frequenz. Die Trägheit und die Dämpfung werden zu relevanten Faktoren, und eine aussagekräftige Simulation erfordert die Verwendung einer dynamischen Studie. Ein häufig falscher Gebrauch ist die Verwendung einer statischen Kraft, um die Verschiebung einer Konstruktion durch seismische Ereignisse oder durch einen Aufprall zu simulieren. Diese Ereignisse beinhalten Beschleunigungen oder Verzögerungen, die sich überall auf die gesamte Masse eines Systems und nicht nur auf einen bestimmten Punkt oder den Schwerpunkt jedes einzelnen Bauteils auswirken. Wird darüber hinaus im Fall einer seismischen oder Rütteltischbelastung die aufgebrachte Last als Reaktion auf die ursprüngliche Anwendung umgekehrt, sind die induzierten Beschleunigungen in den Bauteilen ohne eine dynamische Simulation nur sehr schwer vorherzusagen. Folglich kann eine statische Vereinfachung äußerst irreführend sein. Da hinsichtlich der Konsistenz keine Aussage getroffen werden kann, ob die statische Vereinfachung konservativ oder nicht konservativ ist, wird die statische Vereinfachung in den meisten Fällen als ungeeignet angesehen.

Die Bestandteile jeder dynamischen Lösungsfunktion sind die Eigenfrequenzen und Eigenformen des Systems.

### Allgemeine Eigenformanalyse

Die Bestandteile jeder dynamischen Lösungsfunktion sind die Eigenfrequenzen und Eigenformen des Systems. Alle Körper weisen unabhängig von einer Belastung Resonanz- oder Eigenfrequenzen auf. Dieses Phänomen wird als freie Vibration eines Systems betrachtet, die erfolgt, nachdem das System einen Stoß erhält oder eine Verschiebungskraft rasch vom System entfernt wird. Die niedrigeren Eigenfrequenzen werden in Hertz (Schwingungen pro Sekunde) definiert und stellen die verformten Geometrien oder Eigenformen dar, für deren Erreichen ein Minimum an Energie aufgewendet werden muss. Im Fall des langen und dünnen Auslegers, der einem Meterstab ähnelt (Abbildung 5), ist für das Verbiegen des Teils in Abbildung (a) eindeutig weniger Energie erforderlich. Diese Form besitzt auch die niedrigste Eigenfrequenz im Vergleich zu Abbildung (b), die eine höhere Eigenfrequenz aufweist.

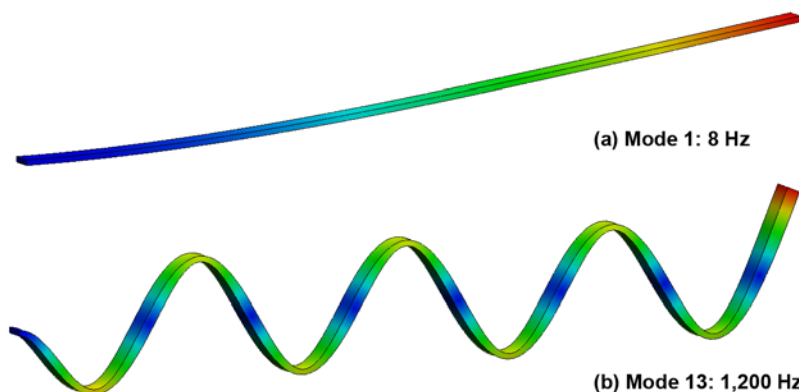


Abbildung 5: Zwei Eigenfrequenzen eines dünnen Balkens

Folglich sind für Konstrukteure im Allgemeinen nur die ersten Eigenformen von Interesse, da hier die größten Änderungen auftreten. Bei höheren Resonanzfrequenzen fällt die Vergrößerung der Reaktion in der Regel kleiner aus als bei niedrigeren Frequenzen. Bei langfristigen Vibrationen jedoch, bei denen niedrige Spannungen zu Versagen aufgrund von Ermüdung führen können, kann die Reaktion bei höheren Frequenzen immer noch erheblich sein und muss deshalb untersucht werden.

Die Bewegung von Glocken bietet eine faszinierende Studie der Eigenformen. Sie können bei einer läutenden Glocke, deren Rand beim Erklingen verschiedener Töne in einer übertriebenen Bewegung physisch vibriert, einen schlingernden Effekt beobachten. Die Klänge variieren und halten je nach Geometrie, Genauigkeit des Gusses und Material unterschiedlich lange an. Der Gesamtklang besteht aus einer Kombination der Töne, die gleichzeitig durch jedes einzelne Bewegungsmuster (Eigenform) der Glocke erzeugt werden (Abbildung 6).

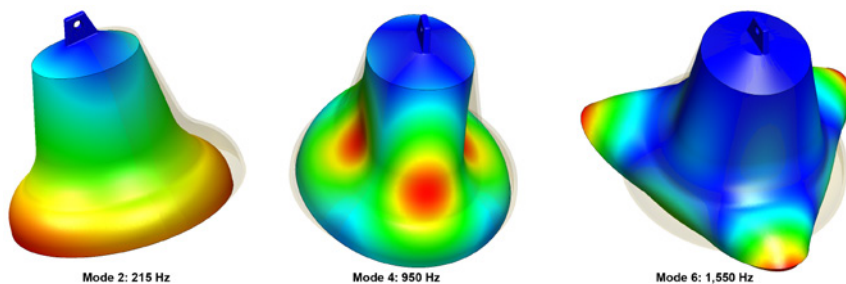


Abbildung 6: Eigenformen einer läutenden Glocke. Der eigentliche Ton entspricht der Überlagerung der Töne, die sich aus jeder Bewegung ergeben.

Ein entscheidender Faktor bei der Bestimmung, ob eine dynamische Lösung erforderlich ist, ist die Frequenz oder Impulsdauer der Anregung. Generell gilt: Ist die Frequenz einer Eingabe ähnlich oder größer als die niedrigste Eigenfrequenz des Bauteils oder Systems, sollte eine dynamische Studie ausgeführt werden. In Fällen, bei denen die dynamische Anregung ein Impuls ist, sollte bei der Simulation die Dauer des Impulses mit der Schwingungszeit der Eigenfrequenzen verglichen werden, da deren Eigenform möglicherweise durch diesen Impuls angeregt wird.

Die Schwingungszeit einer Frequenz ist die Umkehrfunktion dieser Frequenz. Die Schwingungszeit für ein 10-Hertz-Signal beträgt z. B.  $1/10$  bzw. 0,1 Sekunden. Wenn die Dauer des Impulses ähnlich der Schwingungszeit einer zugehörigen Eigenfrequenz ist, sollte eine dynamische Analyse ausgeführt werden.

### Zeitbasierte Analyse

Eine Zeitverlaufsanalyse bzw. transiente Analyse wird häufig verwendet, um die Größe von Spannungen oder Deformationen bei einem Impuls von kurzer Dauer anzuzeigen (Abbildung 7). Wenn dadurch eine Resonanzfrequenz angeregt wird, ist die resultierende Spannung oder Deformation möglicherweise größer als die im Fall einer statischen Belastung der gleichen Größe. Die tatsächliche Dauer spielt jedoch auch hier eine entscheidende Rolle. Wenn die gleiche Last weitaus schneller aufgebracht und wieder entfernt wird, findet dieser Vorgang für das System möglicherweise zu schnell statt, um darauf reagieren zu können. In diesem Fall kommt es zu keinem Problem. Ähnlich ist der Verlauf in folgendem Fall: Wenn die Last weitaus langsamer aufgebracht wird, nähert sich die Reaktion ebenfalls der einer statischen Situation, und die Reaktion ist möglicherweise wiederum relativ unauffällig. Mithilfe der transienten Analyse können alle drei Situationen beleuchtet werden.

Ein entscheidender Faktor bei der Bestimmung, ob eine dynamische Lösung erforderlich ist, ist die Frequenz oder Impulsdauer der Eingaben.



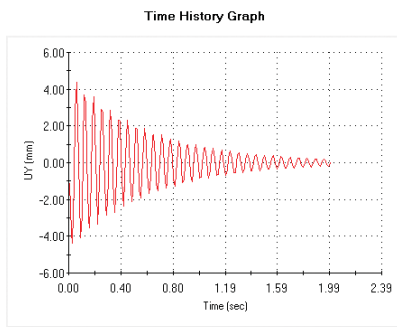


Abbildung 7: Beispieldarstellung von Verschiebung versus Zeit an einem Punkt einer Konstruktion, wobei die erste Verschiebung durch eine transiente Last hervorgerufen wurde

### Harmonische bzw. Frequenzbereichsanalyse

Die harmonische Analyse ist für die Analyse einer Konstruktion wichtig, wenn die aufgebrachte Kraft bei mindestens einer Eigenfrequenz über einen längeren Zeitraum hinweg andauert (Abbildung 8).

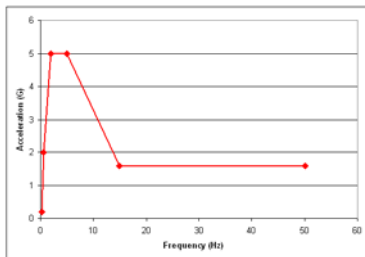


Abbildung 8: Beschleunigung-zu-Frequenz-Spektrum für Elektronikprüfungen

Ein klassisches Beispiel für eine Katastrophe, die durch eine konstante Energiespeisung der Eigenschwingungen ausgelöst wurde, ist der Einsturz der Tacoma-Narrows-Hängebrücke über den Puget Sound im US-Bundesstaat Washington vier Monate nach deren Eröffnung im Jahr 1940. Als kosteneinsparende Maßnahme wurde die ursprüngliche Konstruktion geändert und die Anzahl der Versteifungen für die Brückenfahrbahnen um einen Faktor von mehr als 4 verringert. Eines frühen Morgens verursachten Windböen von 55 bis 75 km/h eine schlingierende Bewegung der Brücke mit einer Auf- und Abwärtsverschiebung von 1 bis 1,5 Meter. Innerhalb von Stunden änderte sich die Richtung der Windböen und regte eine Torsionsschwingung an. Mit der Zeit verstärkte sich dieser Effekt, bis Teile des Fahrbahnbelags aus Beton auseinanderbrachen. Schließlich riss ein kompletter Abschnitt der Brücke und es stürzten große Teile in den Fluss. Zum Glück wurde niemand verletzt, da die Brücke bereits um 10 Uhr von den Behörden gesperrt worden war.

Zufallsvibrationseingaben werden aus einem Ereignis abgeleitet, das einen begrenzten Zeitraum andauert, bei dem aber die Details des Ereignisses nicht zeitabhängig sind.



## Zufallsvibrationsanalyse

Zufällige Vibrationseingaben werden aus einem Ereignis abgeleitet, das einen begrenzten Zeitraum andauert, bei dem aber die Details des Ereignisses nicht zeitabhängig sind (Abbildung 9). Je größer der auszuwertende Zeitraum, desto besser die statistische Stichprobenerhebung im Frequenzbereich. Die resultierenden Daten, die in die dynamische Analyse eingegeben werden, stellen im Großen und Ganzen eine Zusammenfassung der Gesamtenergie bei allen durch das Eingabeereignis angeregten Frequenzen dar. Abweichungen bei der Fahrbahnoberflächengeometrie oder die zufälligen Kräfte bei einem Erdbeben sind Beispiele derartiger Eingabegrößen.

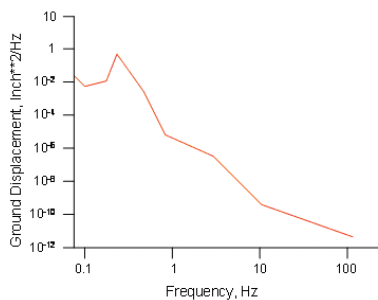


Abbildung 9: Darstellung der spektralen Leistungsdichte der Bodenverschiebung in der Nähe einer Abbruchstelle

## Ansätze zum Ausführen von dynamischen Analysen

Zunächst muss gegebenenfalls festgelegt werden, welche der drei möglichen linearen dynamischen Softwaresimulationen – Zeitverlaufsanalyse (transiente Analyse), harmonische Analyse oder Zufallsvibrationsanalyse – für die entsprechende Konstruktionsaufgabe geeignet ist. Wie bereits zuvor erwähnt, ist der beste Hinweis auf die Anforderungen der Studie die Form der Eingabedaten, die zur Verfügung stehen. Für alle drei Analysen wird die folgende Abfolge empfohlen: Erstellen eines entsprechenden CAD-Modells, Einrichten und Ausführen einer Frequenzanalyse zum Ermitteln der Resonanzfrequenzen und schließlich Einrichten und Ausführen der ausgewählten dynamischen Analyse.

### Erstellen eines entsprechenden CAD-Modells

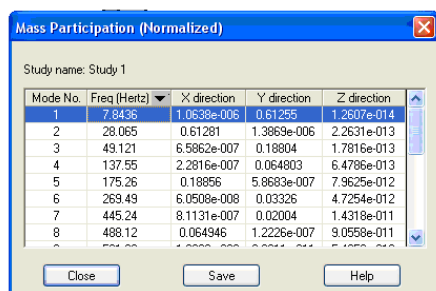
Dynamische Simulationen sind in der Regel zeitaufwendig und benötigen viel Arbeitsspeicher. Schon allein aus diesen beiden Gründen lohnt es sich, ein vereinfachtes und effizientes CAD-Modell zu erstellen. Die Berücksichtigung der Richtlinien bei der Wahl des Modelltyps – Balken-/Linienmodelle, Schalen-/Oberflächenmodell oder Volumenkörpermodelle – sind für diese Studien enorm wichtig. Für Spannungsergebnisse ist eine große CAD-Detailtiefe ausschlaggebend. Für Verschiebungs- oder Beschleunigungsdaten ist ein einfacheres CAD-Modell möglicherweise völlig ausreichend. Berücksichtigen Sie beim Erstellen der Geometrie auch den relativen Grad der Annäherung für die verschiedenen Studien. Da bei einer transienten Analyse „echte“ Eingaben mit wenig Filterung oder Vereinfachung verwendet werden, zahlen sich die umfassenden Ressourcenanforderungen eines detaillierten Volumenkörpermodells möglicherweise aus. Andererseits werden bei der harmonischen Analyse vereinfachte Datensätze verwendet, und Zufallsvibrationsstudien vereinfachen die ursprünglichen zeitbasierten Eingaben noch weiter. In diesen Fällen nimmt die Aussagekraft von hochdetaillierten CAD-Beschreibungen rapide ab.

.....  
Dynamische Simulationen sind in der Regel zeitaufwendig und benötigen viel Arbeitsspeicher. Schon allein aus diesen beiden Gründen lohnt es sich, ein vereinfachtes und effizientes CAD-Modell zu erstellen.

## Ausführen der Frequenzanalyse

Eine dynamische Analyse basiert in der Regel auf den Eigenfrequenzen eines Systems. Bevor Sie sich mit der detaillierten Untersuchung einer zeitabhängigen Reaktion befassen, müssen Sie zunächst diese Frequenzen (d. h., das Eigenformverhalten) bestimmen. In den meisten Softwaresimulationswerkzeugen können Sie dieses Verhalten vor dem Ausführen der dynamischen Analyse ermitteln, oder Sie können die Ermittlung automatisch als ersten Schritt in einer von drei möglichen dynamischen Analyseabfolgen ausführen.

Die Ausgabe der Frequenzstudie (Abbildung 10) enthält Eigenformen, Eigenfrequenzen und Massenpartizipationsfaktoren. Diese letzte Ausgabegröße ist ein Hinweis darauf, wie maßgeblich sich jede berechnete Eigenform an einer dynamischen Reaktion beteiligen könnte.



Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	7.8436	1.0638e-006	0.61255	1.3607e-014
2	28.065	0.61281	1.3869e-006	2.2631e-013
3	49.121	6.5862e-007	0.18804	1.7816e-013
4	137.55	2.2816e-007	0.064803	6.4786e-013
5	175.26	0.18856	5.8683e-007	7.9625e-012
6	269.49	6.0508e-008	0.03326	4.7254e-012
7	445.24	8.1131e-007	0.02004	1.4318e-011
8	488.12	0.064946	1.2226e-007	9.0558e-011

Abbildung 10: Typische Eigenfrequenzliste mit Massenpartizipationsfaktoren

## Überprüfen der Frequenzergebnisse

Sie sollten bei der ersten dynamischen Simulation eines Systems immer zuerst das Eigenverhalten ermitteln und überprüfen, bevor Sie entscheiden, ob eine dynamische Analyse erforderlich ist. Wenn ja, dann müssen Sie entscheiden, welche dynamische Analyse zu verwenden ist.

Wenn sich keine Resonanzfrequenzen im Interessens- oder Betriebsbereich befinden, brauchen Sie keine dynamische Analyse durchführen. Selbst wenn sich Frequenzen im Bereich der Betriebsbedingungen befinden, sollten Sie sicherstellen, dass sie Formen darstellen, die durch die angewendeten Lasten auch tatsächlich angeregt werden würden. Eine seitliche Last stimuliert möglicherweise eine Resonanzfrequenz, aber die Eigenform bei dieser Frequenz verläuft eventuell in Längsrichtung. In diesem Fall wirkt sich der dynamische Aspekt der Last nur sehr gering auf die Ergebnisse aus.

Wenn die Wahrscheinlichkeit besteht, dass die Betriebsfrequenzen mehrere Eigenfrequenzen und Eigenformen anregen, sollten Sie zu allererst die Konstruktion so verändern, dass die berechneten Eigenfrequenzen über den Betriebsfrequenzen liegen. Diese Aufgabe wird als Eigenformvermeidung bezeichnet. Herkömmliche Techniken umfassen die Reduzierung oder Umverteilung des Gewichts, das Hinzufügen von Verstärkungs-Features oder Änderungen des Materials.

Wenn Sie die Konstruktion nicht derart ändern können, dass der gesamte Betriebsbereich unterhalb der ersten Eigenfrequenz liegt, ist es akzeptabel, die niedrigeren Eigenformen noch weiter zu verringern. Eine Anregung bei geringeren Geschwindigkeiten entspricht niedrigeren Energiewerten. Deshalb verringert sich die resultierende Vibration. Viele Konstrukteure können diese Effekte beobachten, wenn z. B. eine Maschine beim Starten zu „zittern“ anfängt. Sobald sie die Betriebsgeschwindigkeit erreicht hat, lösen sich diese deutlich spürbaren Vibrationen auf. Wenn Sie nicht in der Lage sind, Ihre Konstruktion derart anzupassen, dass Eigenfrequenzen im akzeptablen Bereich vermieden werden können, sollten Sie eine dynamische Analyse ausführen.

Wenn die Wahrscheinlichkeit besteht, dass die Betriebsfrequenzen mehrere Eigenfrequenzen und Eigenformen anregen, sollten Sie zu allererst die Konstruktion so verändern, dass die berechneten Eigenfrequenzen über den Betriebsfrequenzen liegen.

## Einrichten der dynamischen Analyse

Da die Eigenformlösung den Grundbaustein für die nachfolgende dynamische Studie darstellt, müssen Sie sicherstellen, dass ausreichend Eigenformen ermittelt wurden, um das System zu charakterisieren. Sie sollten genügend Eigenformen berechnen, die zumindest eine Eigenfrequenz enthalten, die mindestens doppelt so groß ist, wie die maximale Betriebsfrequenz. Wenn die Anregungsfrequenz beispielsweise von 0 bis 50 Hertz reicht, sollte die Eigenfrequenzliste genügend Eigenformen enthalten, die den Bereich 100 Hertz einschließen.

Neben dieser Richtlinie müssen Sie auch die Massenpartizipationsfaktoren für die angegebene Eingaberichtung überprüfen. Die Summe aus den eingeschlossenen Massenpartizipationsfaktoren sollte mindestens 0,8 (oder 80 Prozent) ergeben. Dadurch müssen Sie eventuell mehr Eigenformen als die doppelte maximale Eingabegeschwindigkeit einschließen, oder es kann darauf hingewiesen werden, dass Sie weniger Eigenformen einschließen sollten. Reduzieren Sie die Anzahl der eingeschlossenen Eigenformen jedoch nicht auf eine Zahl, die unter der doppelten maximalen Eingabefrequenz liegt. Dies könnte dazu führen, dass die Lösung Reaktionen bei dieser Frequenz ignoriert, die in Kombination mit niedrigeren Frequenzergebnissen die Ausgabegrößen in einen nicht akzeptablen Bereich verweisen.

Zu den erforderlichen Eingaben für die dynamische Analyse gehören die Lastgröße, deren Richtung, Angriffspunkt oder -fläche, Dämpfung sowie Frequenzbereich oder Zeitdauer. Die Ausgabewerte helfen Ihnen dabei, die Parameter wie Spannung, Beschleunigung und Verschiebung mit den bekannten Grenzwerten Ihres Systems zu vergleichen. Dadurch können Sie bestimmen, ob ein Versagen der Konstruktion wahrscheinlich ist oder Kosteneinsparungen möglich sind.

Zu den erforderlichen Eingaben für die dynamische Analyse gehören die Lastgröße, deren Richtung, Angriffspunkt oder -fläche, Dämpfung sowie Frequenzbereich oder Zeitdauer.

Bringen Sie bei einer transienten Analyse die Lasten und Randbedingungen genauso auf wie bei einer statischen Analyse, mit dem einzigen Unterschied, dass die Lasten derart definiert werden müssen, dass sie über die Zeit variieren.

Bei Verwendung der harmonischen Analyse müssen Sie das System mit der aufgebrachten Last in Schwingung versetzen. Sie haben die Möglichkeit, eine Tabelle oder eine Funktion für die Lasten zu definieren, die deren Amplitude bei wechselnder Frequenz erhöht oder verringert. Alternativ können Sie das System an einer der Randbedingungen in Schwingung versetzen. Dies wird als Basiserregung bezeichnet. Im mathematischen Sinn entspricht dies einem Rütteltischtest.

Auch wenn das Einrichten einer Zufallsschwingungsanalyse dem Vorbereiten einer harmonischen Analyse ähnelt, beziehen sich die Eingaben für die Last oder die Basiserregung auf die spektrale Leistungsdichte gegenüber einfacher Kraft, Verschiebung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung. Die Ausgabe der Zufallsvibrationsanalyse liefert für die Reaktion die Werte für RMS (Effektivwerte) und PSD (spektrale Leistungsdichte) (Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Spannungen). Diese Daten stellen tatsächlich den wahrscheinlichen Höchstwert der zu erwartenden Reaktion bei einer bestimmten Frequenz dar. Da die Eingabe aus einer statistischen Stichprobenerhebung stammt, können keine genaueren Ausgabedaten erwartet werden. Dies ist jedoch der effizienteste Weg, zuverlässige Konstruktionsdaten für zufällige Ereignisse zu erhalten.

## Dämpfung

Eine dynamische Analyse ist in der Regel ohne einen Eigendämpfungsfaktor bedeutungslos. Die Dämpfung ( $\zeta$ ) stellt die Menge an Energie dar, die im System aufgrund der Vibrationsbewegung verloren geht. Ohne Dämpfung würde ein angeregtes System die Vibration endlos fortsetzen. Zum Dämpfungsfaktor tragen viele Dämpfungsquellen bei. Dazu gehören Materialkennwerte, Reibung, Rauschen und Umgebungseffekte wie Strömungsinteraktionen. Dieser Faktor liegt in der Regel im Bereich von 0,01 für leicht gedämpfte Systeme (einzelne Stahlbauteile) und 0,15 für stark gedämpfte Systeme. Wenn keine weiteren Daten zur Dämpfung zur Verfügung stehen, wird von einem Standardwert von 2 Prozent (0,02) ausgegangen. Mit einem gültigen Dämpfungsfaktor können realistische Konstruktionsprozesse durchgeführt werden.

Abbildung 11 zeigt das typische Amplitudenverhältnis (Beschleunigung  $A$ ) in einem System bei unterschiedlichen Frequenzen, wobei der Wert  $X = 1$  die Erregung eines Systems bei der ersten Eigenfrequenz darstellt ( $\omega =$  Erregerfrequenz,  $\omega_n =$  Eigenfrequenz). Sie sehen, dass bei einem Dämpfungsfaktor ( $\zeta$ ) = 0 die dynamische Verstärkung (Amplitudenverhältnis) theoretisch ins Unendliche geht. Bei steigender Dämpfung nimmt das Amplitudenverhältnis rasch ab. Diese Ergebnisse können Ihre Entscheidung stark beeinflussen. Durch einfache Tests kann die anwendbare Dämpfung bestimmt werden.

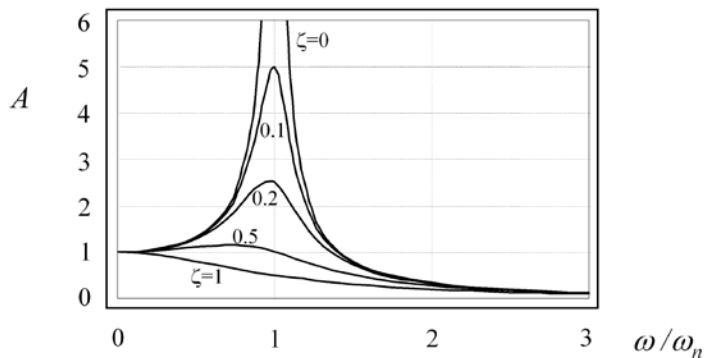


Abbildung 11: Amplitudenverhältnis eines Systems bei Resonanz mit unterschiedlichen Dämpfungsfaktoren

Zum Dämpfungsfaktor tragen viele Dämpfungsquellen bei. Dazu gehören Materialkennwerte, Reibung, Rauschen und Umgebungseffekte wie Strömungsinteraktionen.

## Nichtlineare dynamische Analyse

Ein weiterer Aspekt, der bei der dynamischen Analyse berücksichtigt werden muss, besteht darin, dass alle bisher erörterten Simulationstechniken lineare Studien sind, insofern alle Regeln für eine lineare Analyse angewendet werden. Sie müssen eine nichtlineare dynamische Studie durchführen, wenn das Material selbst nichtlineare Eigenschaften aufweist, ein nichtlinearer Kontakt zwischen den Bauteilen besteht oder das System großen Verschiebungen unterliegt, die eine nichtlineare Lösung erfordern. Die meisten nichtlinearen dynamischen Lösungen treten im physischen oder zeitlichen Bereich auf, da der grundlegende mathematische Ansatz im Bereich der Eigenfrequenzen mit nichtlinearem Verhalten nicht angewendet werden kann.

## Schlussfolgerung

Da die meisten Produkte bewegliche Teile besitzen und durch eine externe Kraft gehandhabt oder bewegt werden, sogar in so einfachen Fällen wie beim Transport auf der Straße, stellt die dynamische Simulation die natürliche Erweiterung eines Prognosesimulationsprogramms dar. Wenn Daten zu Produktreaktionen auf Vibrationen und Stöße frühzeitig im Konstruktionsprozess zur Verfügung stehen, können entsprechende Entscheidungen über Änderungen an der Konstruktion von den Unternehmen ebenfalls frühzeitig getroffen werden. Dadurch wird nicht nur die Notwendigkeit der Entwicklung von Prototypen reduziert, sondern auch sichergestellt, dass der Prototyp und Testplan so effektiv wie möglich gestaltet werden.

Nehmen Sie als Beispiel einen Hersteller von Telekommunikationsverteilerkästen, der vier bis sechs Wochen darauf verwendet hat, einen Prototyp zu bauen, zu liefern und auf seismische Schwingungen entlang dreier Achsen zu testen, um dann herauszufinden, dass einige Schweißnähte beim ersten Test versagten. Alle nachfolgenden Testergebnisse mussten daraufhin verworfen werden. Die Kosten spielten zwar eine Rolle, aber die verlorene Zeit für die Entwicklung des Projekts war wesentlich kritischer. Als Reaktion darauf begann der Hersteller mit der Durchführung virtueller Rütteltischprüfungen unter Verwendung der harmonischen Reaktionsanalyse und konnte somit Bereiche bestimmen, in denen ein Materialversagen als wahrscheinlich angesehen wurde. Aufgrund dieser Daten konnten die Konstrukteure effiziente und kostengünstige Korrekturen erarbeiten, mit denen die Wahrscheinlichkeit eines Materialversagens eingedämmt wurde. Die Abfolge der Prototypentests wurde ebenfalls abgeändert, sodass der Test, der am wahrscheinlichsten ein Versagen herbeiführt, als letzter Test durchgeführt wird. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass das Programm für zerstörende Materialprüfungen die maximalen Vorzüge mit nur geringem oder gar keinem Verlust an Zeit, Geld oder Aufwand geboten hat.

Die in diesem Dokument beschriebenen Techniken sind in jedem standardmäßig erhältlichen Konstruktionssimulationswerkzeug zu finden. Einige Versionen sind sogar in gängige CAD-Systeme wie der SolidWorks® 3D CAD-Software von Dassault Systèmes SolidWorks Corp. integriert. Da mithilfe der dynamischen Simulation verbesserte Produkte konstruiert werden können, empfiehlt sich die eingehendere Beschäftigung mit dieser Technologie für Ihre eigenen Anwendungen. Nachstehend sind drei entscheidende Werke zur Vibrationsanalyse aufgeführt.

## Referenzen:

*Elements of Vibration Analysis*; Leonard Meirovitch; McGraw-Hill, Inc., 1986.  
*Mechanical Vibrations (vierte Ausgabe)*; Singiresu S. Rao; Pearson Education, Inc., 2005.  
*A Finite Element Dynamic Primer*; D. Hitchings (ed.); NAFEMS 1992.

---

Unternehmenssitz  
Dassault Systèmes SolidWorks Corp.  
175 Wyman Street  
Waltham, MA 02451 USA  
Telefon: +1-781-810-5011  
E-Mail: info@solidworks.com

Hauptsitz Europa  
Telefon: +33-(0)4-13-10-80-20  
E-Mail: infoeurope@solidworks.com

Niederlassung Deutschland  
Telefon: +49-(0)89-612-956-0  
E-Mail: infoGermany@solidworks.com

