

Einführung in dynamische Analysen mit Pro/MECHANICA Structure

Dr.-Ing. Roland Jakel
DENC AG Langenfeld



Inhalt

- Einführung
- Vorbereitungen für dynamische Analysen
- Dynamische Frequenzanalysen
- Dynamische Zeitanalysen
- Stochastische Antwortanalysen
- Dynamische Stoßanalysen
- Zusammenfassung



Einführung

■ Grundsätzliche Unterscheidung in:

- Mehrkörperdynamik, in der Regel mit starren Körpern und großen Bewegungen
 - MKS-Programme wie Pro/MECHANICA Motion bzw. MDX/MDO

- (Mehrkörper-)Dynamik mit flexiblen Körpern und kleinen Verformungen (und ggf. auch kleinen Starrkörperbewegungen)
 - FEM-Programme wie Pro/MECHANICA Structure („Vibration“)



Einführung

■ Warum dynamische Analysen mit flexiblen Körpern?

- Immer dann,
 - wenn die Last auf die Struktur eine Funktion der Zeit ist und nicht quasistatisch aufgebracht wird;
 - wenn dabei dynamische Lastüberhöhungen (Resonanzen) befürchtet werden;
 - wenn dynamische Verformungen die Funktion des Maschinensystems beeinträchtigen können;
 - wenn durch dynamische Lasten Materialermüdung erwartet wird.

■ Einfache Beispiele sind:

- Modalanalysen
- Frequenzgänge
- Impulsantworten



Einführung

- **Grundlegende Beziehung jeder dynamischen Analyse ist das Differentialgleichungssystem:**

$$|M|\ddot{x} + |C|\dot{x} + |K|x = F(t)$$

Hierin ist:

| M | Massenmatrix

| C | Dämpfungsmatrix (geschwindigkeitsproportionale Dämpfung)

| K | Steifigkeitsmatrix

F(t) Zeitabhängiger Belastungsvektor

- **Zwei Sonderfälle sind:**

Statische Analyse

$$|K|x = F$$

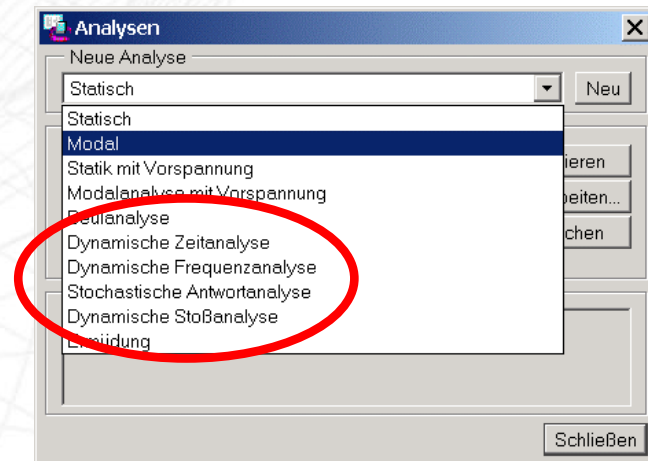
Modalanalyse

$$|M|\ddot{x} + |K|x = 0$$



Einführung

- **Wie wird das System in Pro/MECHANICA gelöst?**
 - Je nach Zeitabhängigkeit/Art des Belastungsvektors $F(t)$ bietet Pro/MECHANICA verschiedene Analysearten zur Lösung der DGL an:
 - Dynamische Frequenzanalyse
 - Dynamische Zeitanalyse
 - Stochastische Antwortanalyse
 - Dynamische Stoßanalyse



- **Unterscheidung, ob der Belastungsvektor $F(t)$ periodisch oder transient bzw. deterministisch oder stochastisch ist**



Wichtige Vorbereitungen für dynamische Analysen in Pro/MECHANICA Structure

■ Messgrößendefinition:

- weil nicht automatisch erzeugt
- weil bei dynamischen Analysen mit automatischen Ausgabeintervallen nur Messgrößen (keine vollen Datensätze) ausgegeben werden

■ Modalanalysedefinition:

- Da in Pro/MECHANICA die dynamischen Antworten von Strukturen als Linearkombination ihrer Eigenmoden dargestellt werden, muss **jeder** dynamischen Analyse immer eine Modalanalyse vorangestellt werden.
- Diese Modalanalyse kann als Teil der dynamischen Analyse oder separat ausgeführt werden.
- Unterschiedliche dynamische Analysen können sich auf dieselbe Modalanalyse beziehen (→Rechenzeiterparnis!)



Wichtige Vorbereitungen für dynamische Analysen in Pro/MECHANICA Structure

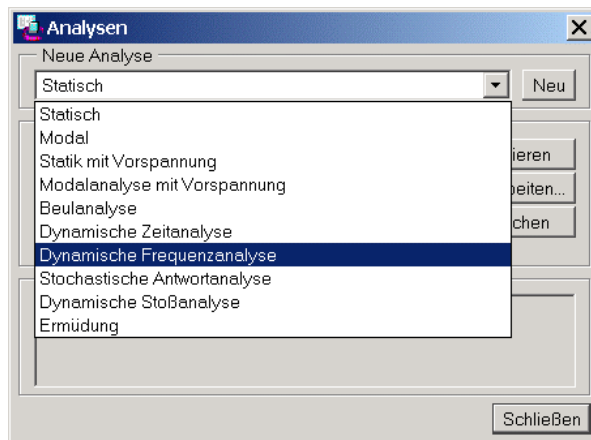
■ Modalanalysedefinition – Tipps & Tricks:

- Bei der Modalanalyse ist darauf zu achten, dass genügend Eigenfrequenzen errechnet werden, so dass die dynamischen Antwortformen hinreichend genau beschrieben werden können.
- Als Daumenregel gilt, mindestens Eigenfrequenzen bis zur doppelten Höhe der Erregerfrequenzen berechnen zu lassen.
- Bei Fußpunkterregung lassen sich bei den dynamischen Analysen die modalen Massen errechnen. Sie sollten mindestens 80% der Strukturmasse, besser jedoch mehr als 90% betragen.
- Bei Krafterregung ist keine Kontrolle der modalen Massen möglich. Die Konvergenz ist durch Berücksichtigen zusätzlicher Moden zu prüfen.



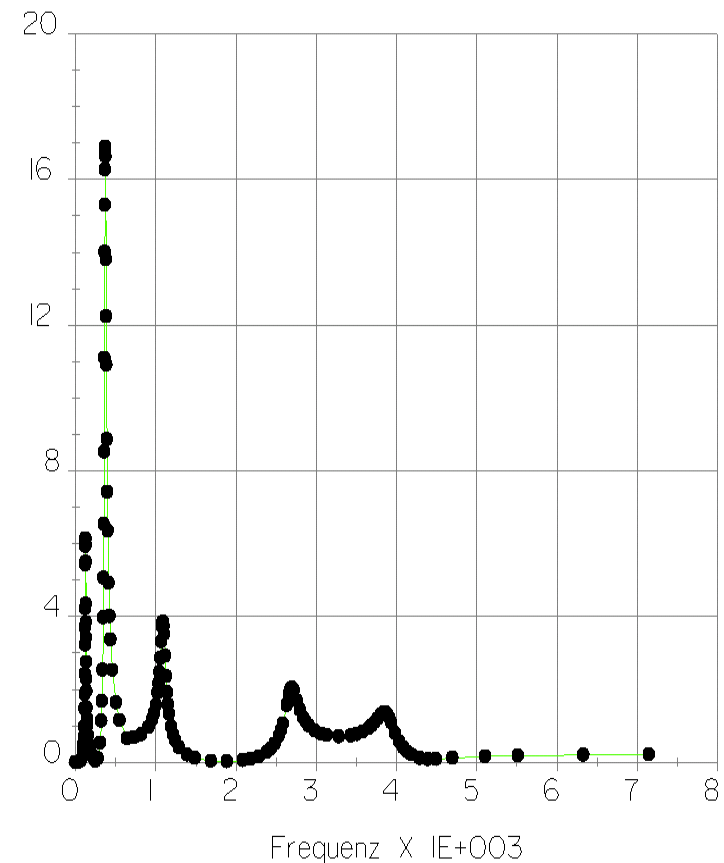
Dynamische Frequenzanalyse

- Bei dieser Analyse interessiert, wie die Antwort des Systems im eingeschwungenen Zustand auf harmonische Anregungen (Sinus-Anregungen), deren Höhe sich mit der Frequenz ändern kann, aussieht.



- Die Eingaben der Amplitudenmaxima der Last erfolgen als Funktion der Frequenz
- Typisches Ergebnis ist die Ausgabe von Messgrößen (die Systemantwort) als Funktion der Frequenz

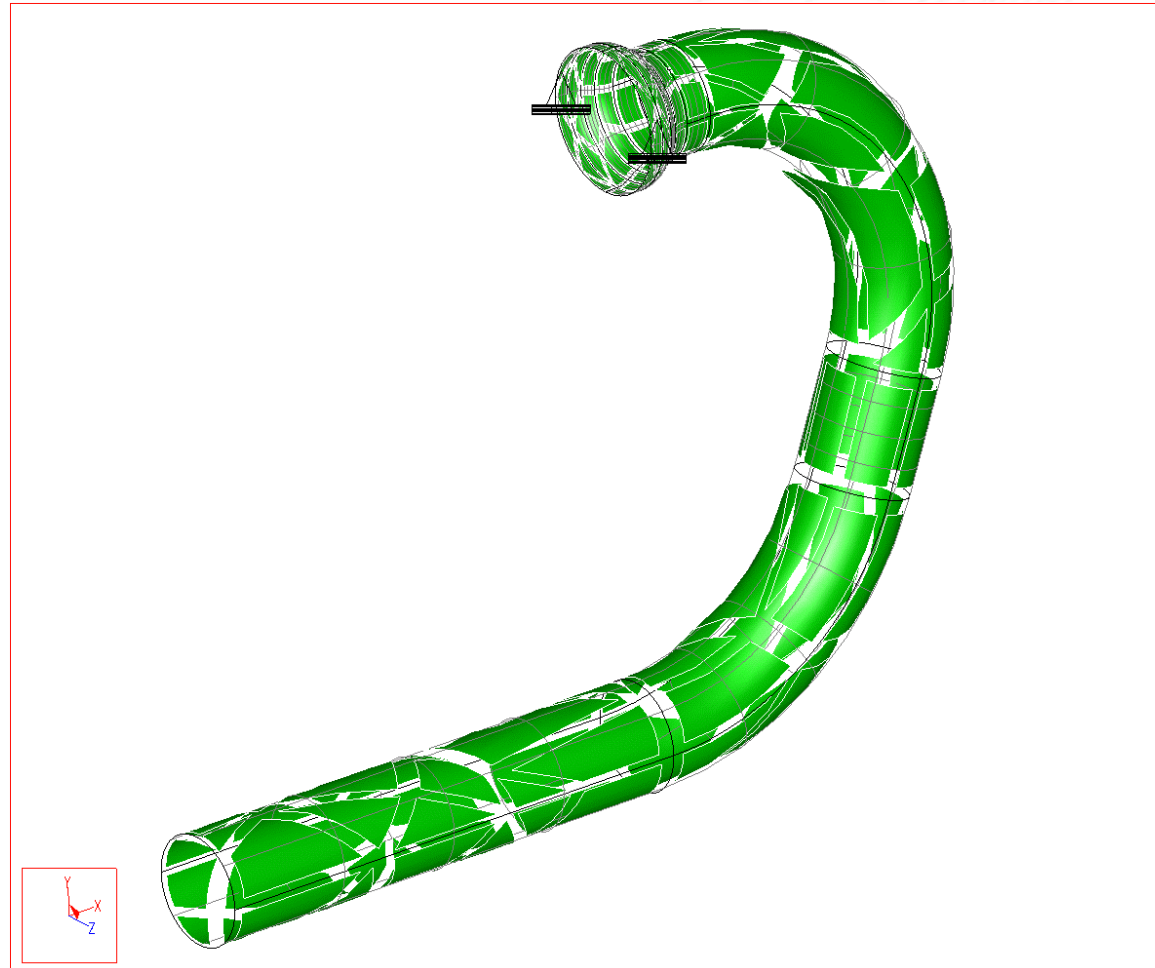
acc_y_max_ende X IE+005





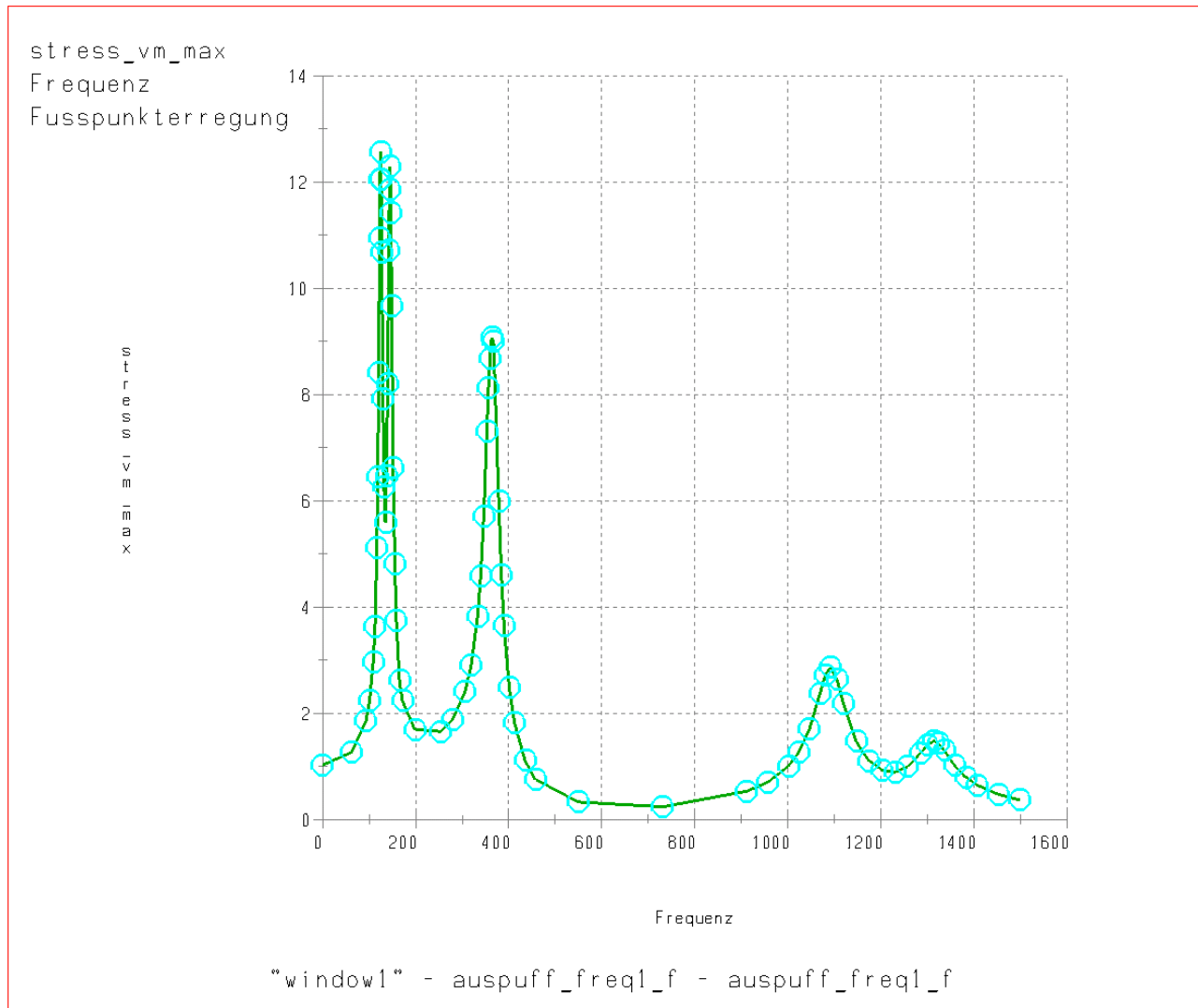
Dynamische Frequenzanalyse - Beispiel

- Auspuff unter konstanter Fußpunkterregung





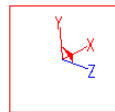
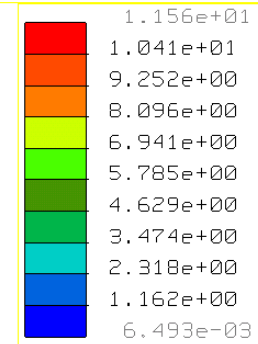
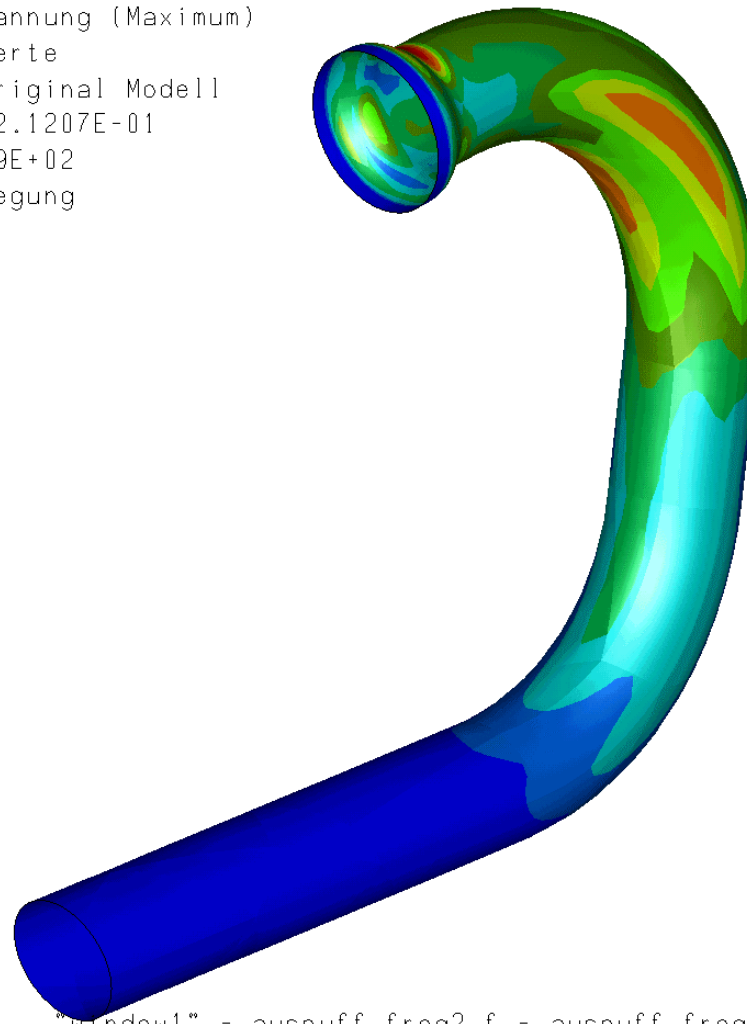
Dynamische Frequenzanalyse - Beispiel





Dynamische Frequenzanalyse - Beispiel

Von Mises-Spannung (Maximum)
Gemittelte Werte
Verformtes Original Modell
Max Darst +2.1207E-01
Skala 1.5189E+02
Fusspunkterregung



"window1" - auspuff_freq2_f - auspuff_freq2_f



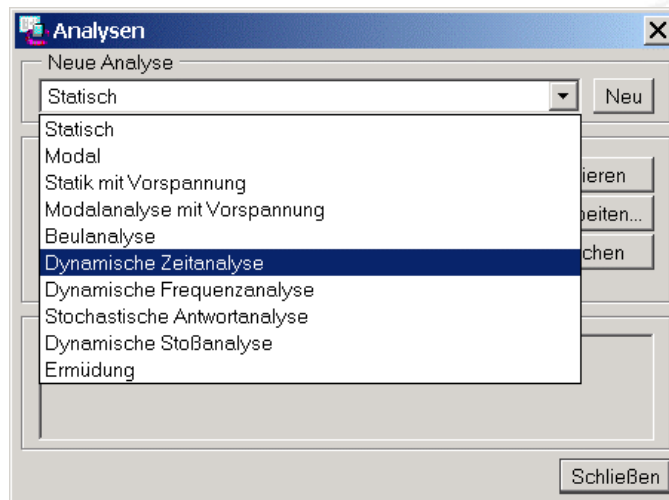
Dynamische Frequenzanalyse

- **Eine dynamische Frequenzanalyse wird in der Regel mindestens zweimal ausgeführt:**
 - im ersten Schritt mit automatischen Ausgabeintervallen
→ rascher Überblick über die Systemantwort im Frequenzbereich
 - im zweiten Schritt mit benutzerdefinierten Ausgabeintervallen:
→ volle Ergebnissätze (Spannungsfelder)
- **Erregung wahlweise über ein oder mehrere Lastsätze oder über einen Randbedingungssatz (Fußpunkterregung)**
- **Tipps & Tricks:**
 - Grundsätzlich mindestens maximale Beschleunigung/ Verschiebung und ggf. max. Vergleichsspannung als Messgrößen definieren
 - Interessierende Messgrößen schon bei der Modalanalyse festlegen, wenn dafür Extra-Punkte definiert werden müssen
 - Bei Eingabe von Lasterregungssätzen können seit Version 2001 Phasenverschiebungen berücksichtigt werden



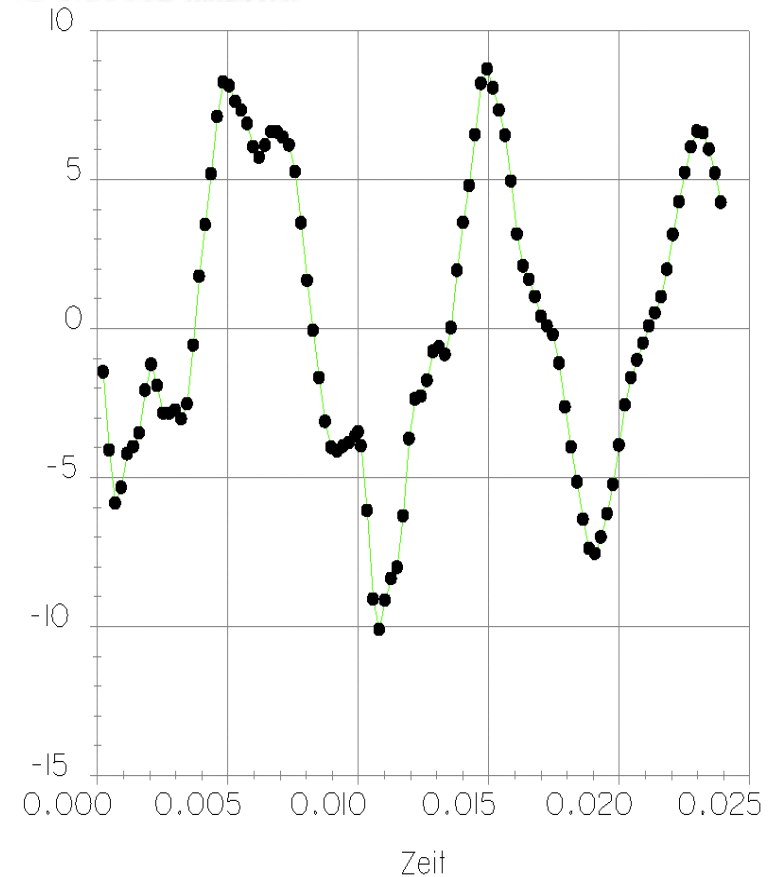
Dynamische Zeitanalyse

- Bei dieser Analyse interessiert die Antwort des Systems auf eine zeitlich veränderliche (transiente) Belastung (z.B. auf einen Impuls oder eine Sinushalbwellen)



- Die Eingabe der Last erfolgt als zeitabhängige, analytische Funktion
- Die Systemantwort wird als Funktion der Zeit ausgegeben

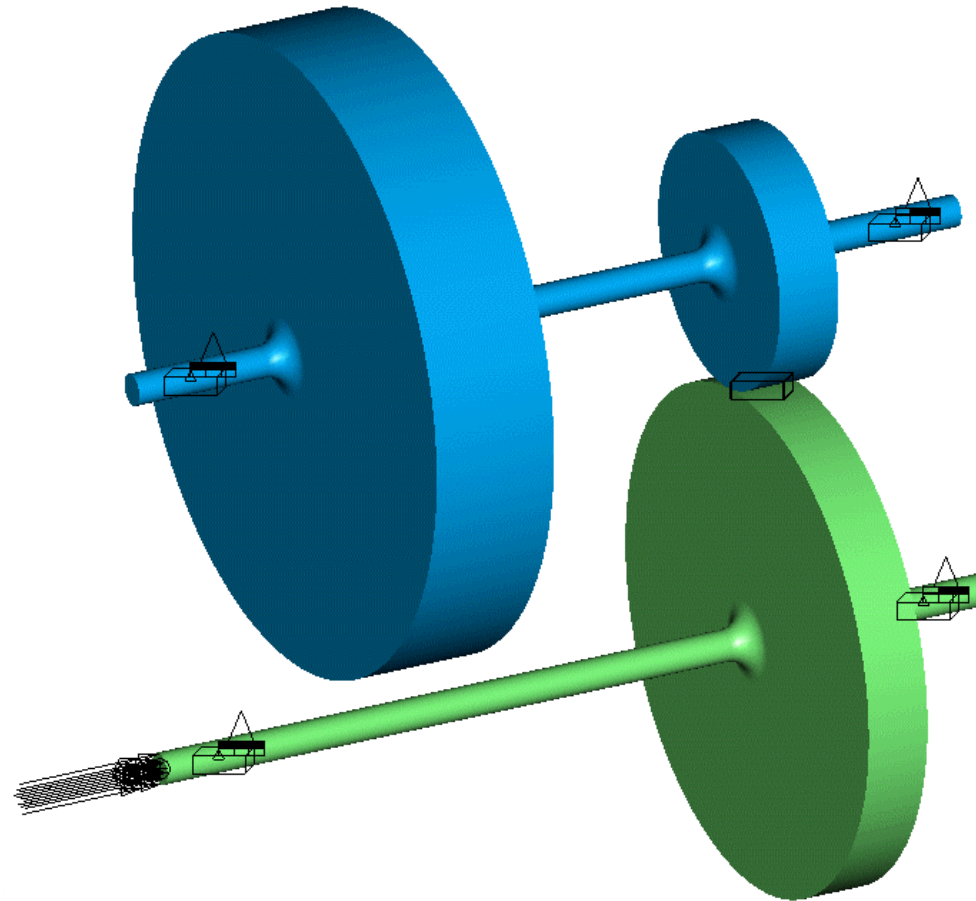
acc_y_max_ende X 1E+004





Dynamische Zeitanalyse - Beispiel

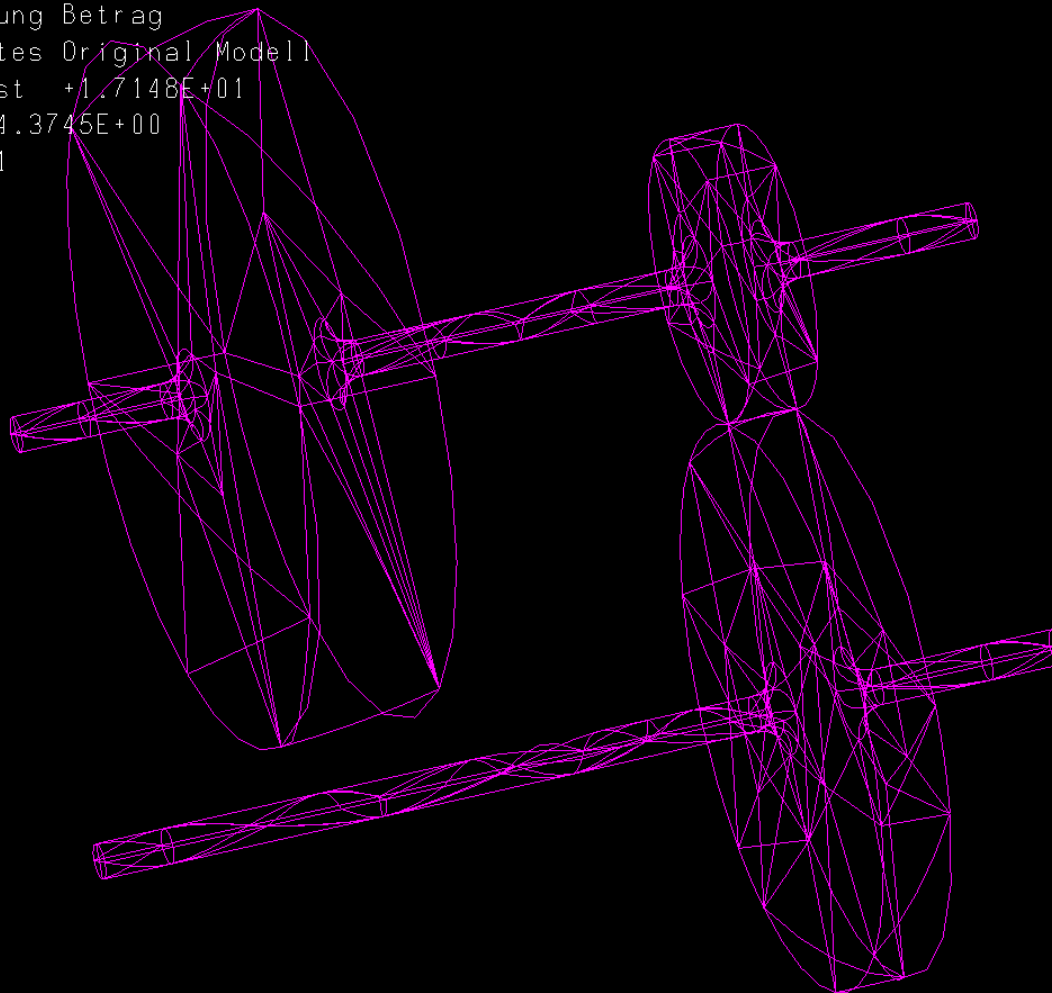
- Drehimpuls auf Getriebe mit frei drehbarer Lagerung (1 Starrkörpermode)





Dynamische Zeitanalyse - Beispiel

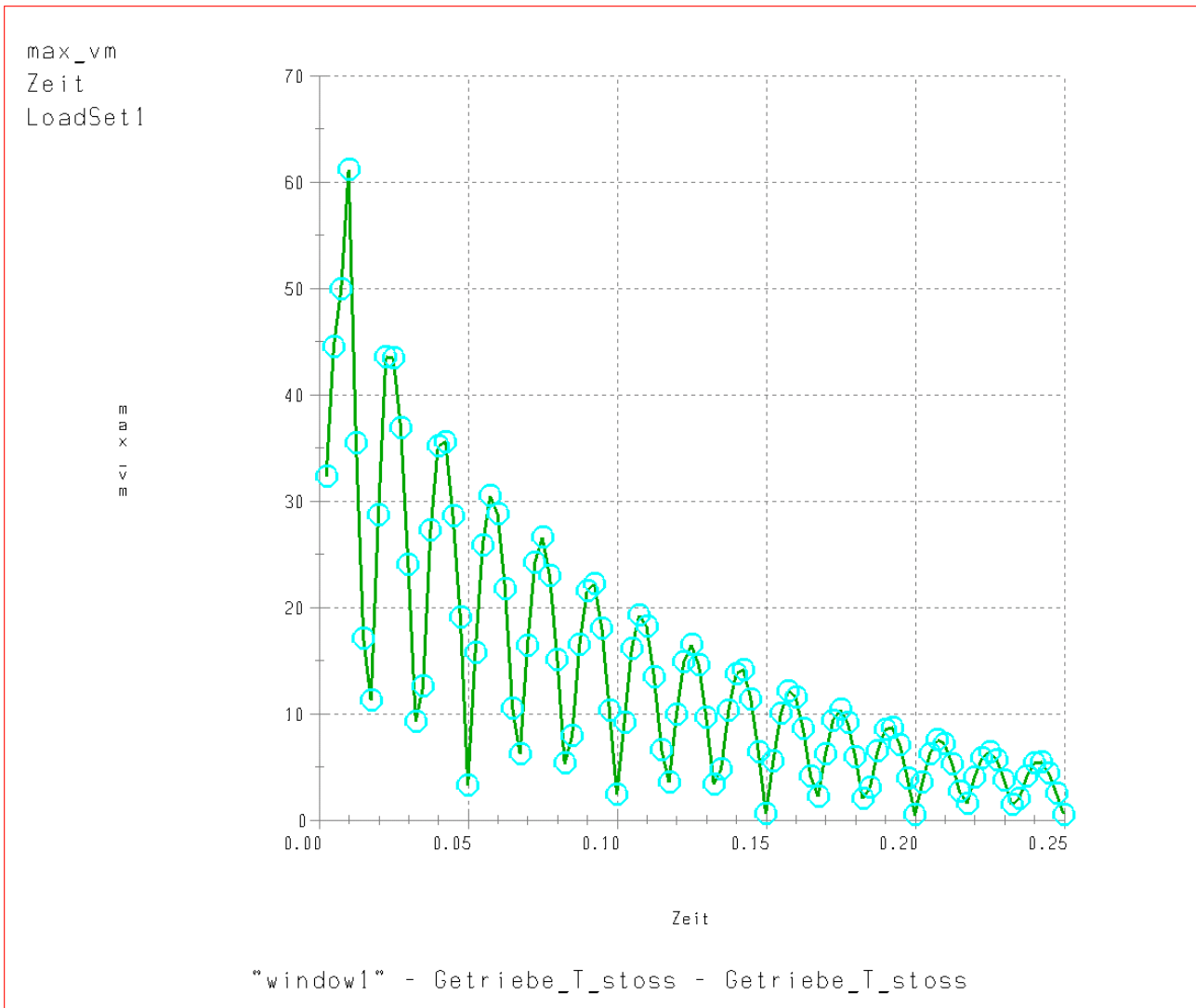
Verformung Betrag
Verformtes Original Modell
Max Darst +1.7148E+01
Skala 4.3745E+00
LoadSet1



"window1" - Getriebe_T_stoss - Getriebe_T_stoss



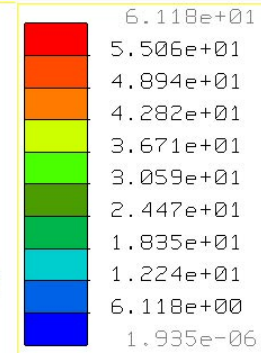
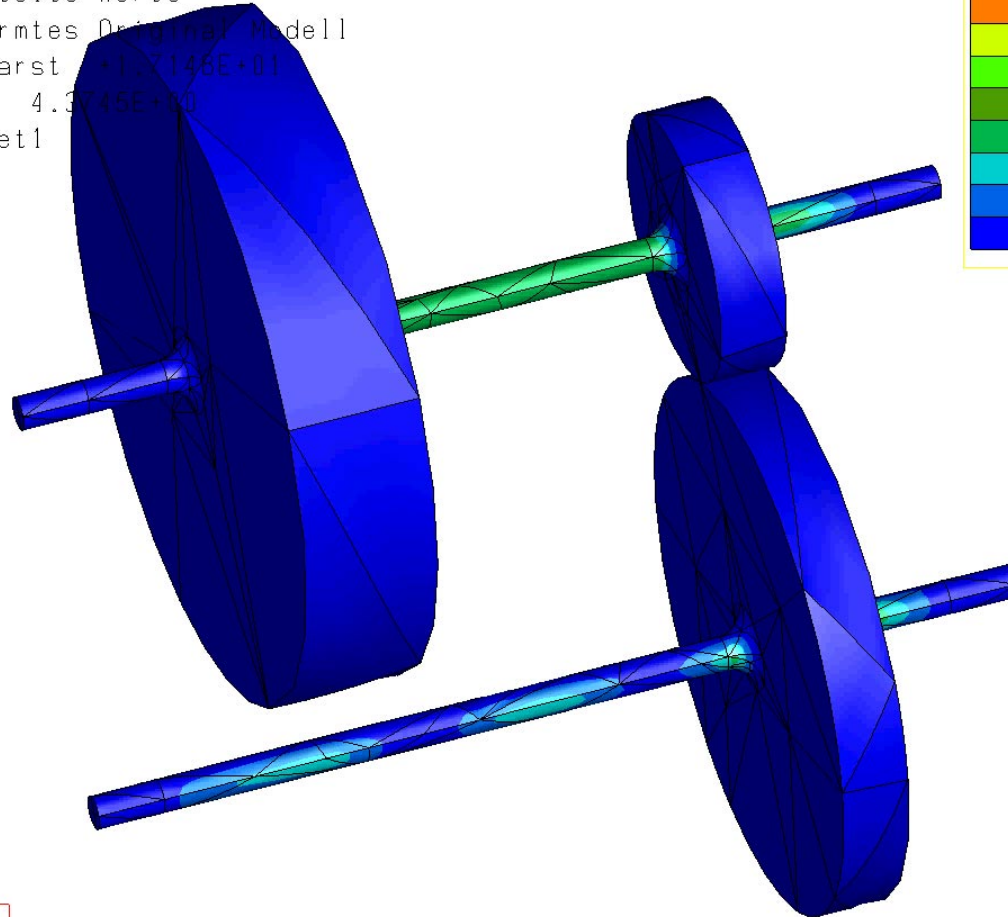
Dynamische Zeitanalyse - Beispiel





Dynamische Zeitanalyse - Beispiel

Von Mises-Spannung (Maximum)
Gemittelte Werte
Verformtes Original Modell
Max Darst. $+1.2146E+01$
Skala $4.3745E+00$
LoadSet1



"window1" - Getriebe_T_stoss - Getriebe_T_stoss



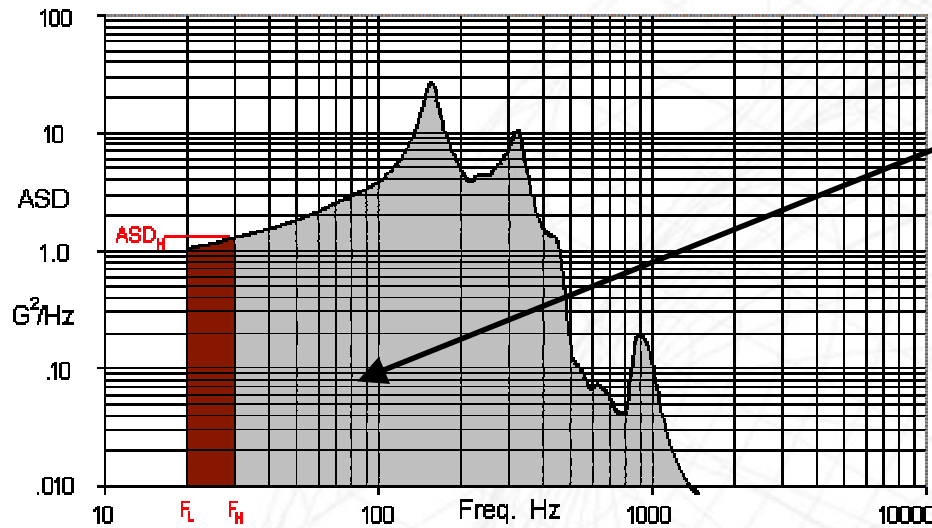
Dynamische Zeitanalyse

- **Eine dynamische Zeitanalyse wird in der Regel mindestens zweimal ausgeführt:**
 - im ersten Schritt mit automatischen Ausgabeintervallen
→ rascher Überblick über die Systemantwort im Zeitbereich
 - im zweiten Schritt mit benutzerdefinierten Ausgabeintervallen
→ volle Ergebnissätze (Spannungsfelder)
- **Erregung wahlweise über ein oder mehrere Lastsätze oder über einen Randbedingungssatz (Fußpunkterregung)**
- **Tipps & Tricks:**
 - Grundsätzlich mindestens maximale Beschleunigungen/Verschiebungen und ggf. max. Vergleichsspannungen als Messgrößen definieren
 - Bei benutzerdefinierten Ausgabeintervallen rechtzeitig VOR dem interessierendem Zeitbereich starten oder von Null, um Fehler zu verringern!
 - Messgrößen aus automatischer und benutzerdefinierter Analyse vergleichen!



Stochastische Antwortanalyse

- In dieser dynamischen Analyse interessiert die Systemantwort auf das Leistungsdichtespektrum (PSD-Power Spectral Density), bzw. üblicherweise das Beschleunigungsdichtespektrum ASD (Acceleration Spectral Density)



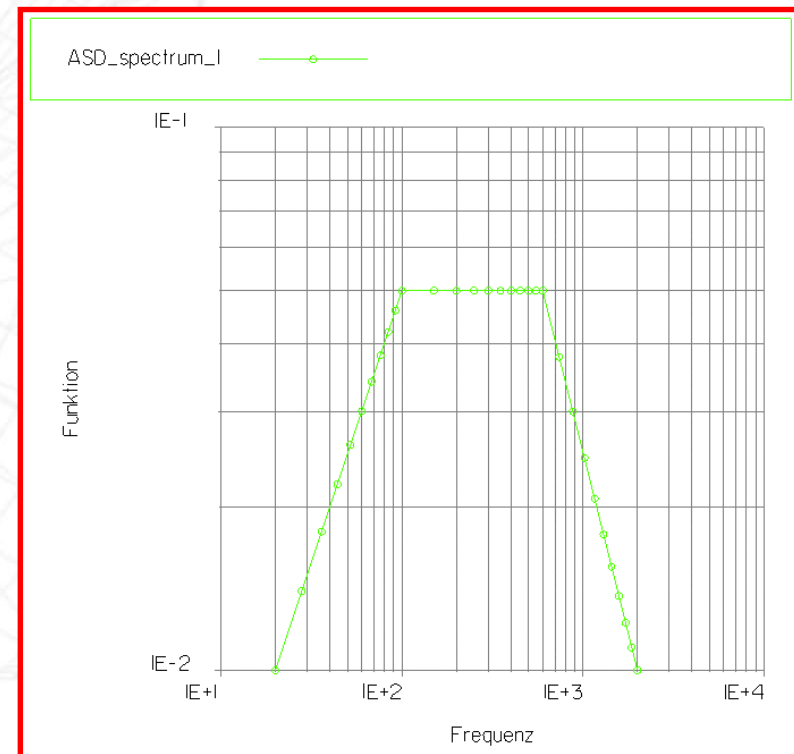
Die Quadratwurzel der Fläche unterhalb der ASD-Kurve ist der zur Kennzeichnung herangezogene g_{RMS} -Wert (Root Mean Square of g)

- Die einzelnen Anregungsfrequenzen wirken dabei simultan und die Amplituden sind statistisch verteilt.
- Die Erregung ist nicht zeitabhängig, wird aber über eine möglichst lange zeitliche Periode gemessen.



Stochastische Antwortanalyse

- Das Erregungs-Beschleunigungsdichtespektrum wird messtechnisch unter Anwendung statistischer Methoden aus Versuchen ermittelt (Beispiel: Fahrversuche mit einem PKW)
- Das Spektrum wird vereinfacht („umhüllt“) in Pro/MECHANICA eingegeben, in der Regel als Fußpunkterregung
- Es können RMS-Messgrößen für diskrete Punkte und optional auch volle RMS-Datensätze angefordert werden
- Auslegung erfolgt üblicherweise gegen die Spannung bei der 3σ -Antwortbeschleunigung (99,7% aller Momentanwerte der Antwortbeschleunigung liegen unterhalb der 3σ -Spitze)





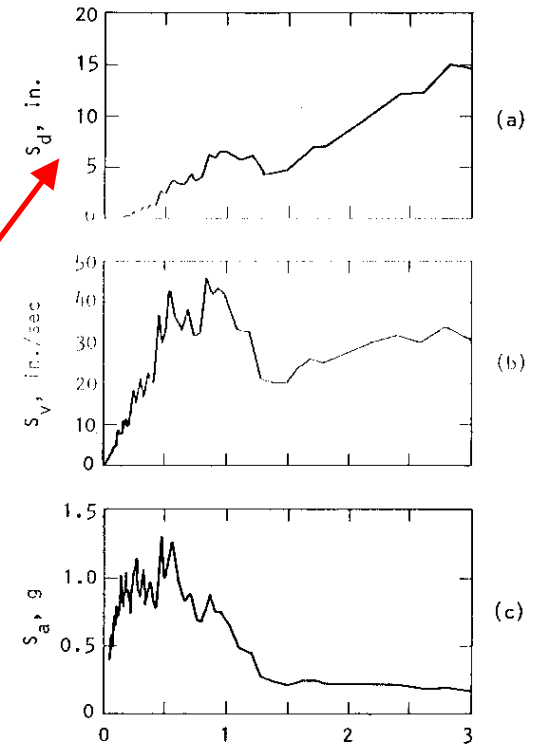
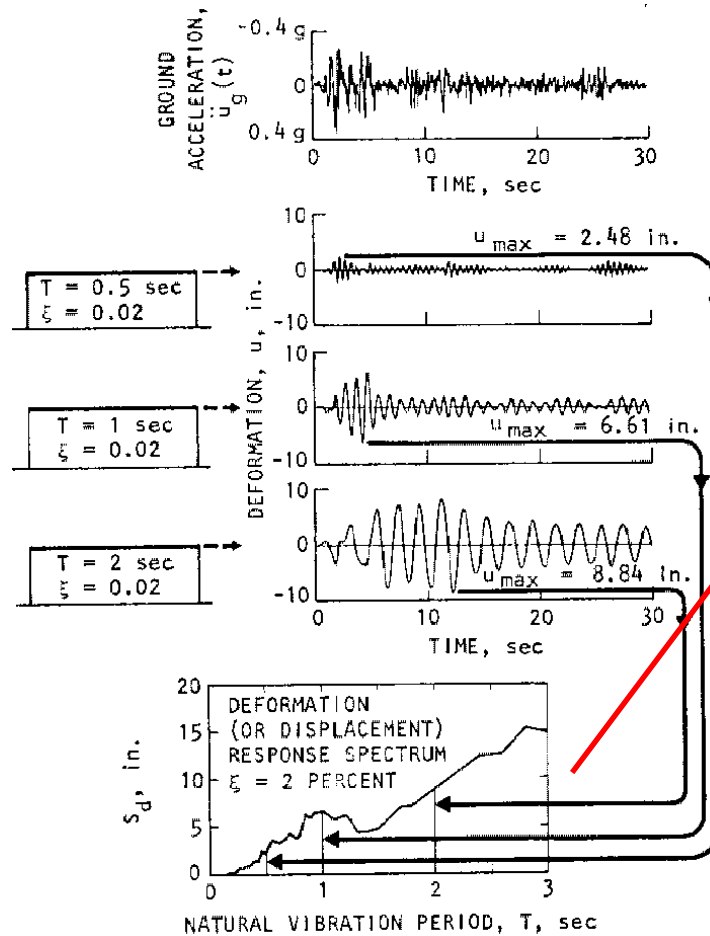
Dynamische Stoßanalyse („Erdbebenanalyse“)

- Eine dynamische „Stoßanalyse“ dient nicht zum Bestimmen der zeitlichen Systemantwort auf eine Impulslast, sondern errechnet nur die maximale Systemantwort auf eine transiente, erdbebenartige Erschütterungen als Fußpunkterregung
→ Ergebnis ist „*EIN* buntes Bild“
- Als Fußpunkterregungsfunktion muss ein „Antwortspektrum“ aufgebracht werden – die explizite Eingabe einer Dämpfung ist nicht möglich.
- Das Antwortspektrum ist definiert als die überlagerte Antwort vieler gedämpfter 1-Massen-Schwinger mit variabler Schwingungsdauer auf die Erregungsfunktion. Damit ist implizit sowohl die Anregungsfunktion als auch die Dämpfung enthalten.



Dynamische Stoßanalyse

- Die Erzeugung des Antwortspektrums kann graphisch wie folgt veranschaulicht werden:



Umrechnung der Spektren möglich mit der „Spectra Response Relation“:

$$s_a = \omega s_v = \omega^2 s_d$$



Dynamische Stoßanalyse

- **Pro/MECHANICA** errechnet dann die maximale Systemantwort aus Überlagerung der mit den (aus dem Antwortspektrum gewonnenen) Wichtungsfaktoren multiplizierten Moden.
- Die Überlagerung der Moden kann wahlweise mit der absoluten Summe (konservativ) oder dem **SRSS-Verfahren** erfolgen („Square Root of the Sum of the Squares“)
- **Tipps & Tricks:**
 - Das SRSS-Verfahren ist realistischer, da die individuellen Maxima selten zur gleichen Zeit auftreten
 - Praktisch eignet sich die dynamische Stossanalyse vor allem zur schnellen Bestimmung der modalen Masse bei Eingabe eines entsprechenden Richtungsvektors



Zusammenfassung

- Pro/MECHANICA bietet vier verschiedene dynamische Analysen an, die wesentliche praktische ingenieurtechnische Problemstellungen lösen können.

	Periodische Systeme	Transiente Systeme
Exaktes (deterministisches) System	Dynamische Frequenzanalyse: Belastung ist stationär, periodisch und harmonisch und wird frequenzabhängig eingegeben; Lösung erfolgt im Frequenzbereich	Dynamische Zeitanalyse: Belastung wirkt zeitabhängig auf die Struktur, Lösung erfolgt für den gewählten Zeitbereich
Stochastisches (zufälliges) System	Stochastische Antwortanalyse: Last wird mit statistischen Methoden ermittelt und als Leistungsspektraldichte (PSD) aufgegeben	Dynamische Stoßanalyse: Last wirkt als kurzzeitige Erschütterung („Erdbeben“). Die Eingabe erfolgt als Antwortspektrum.