the product development company

Berechnung von Schockspektren und praktische Anwendung der dynamischen Stoßanalyse in Creo Elements / Pro Mechanica

Dr.-Ing. Roland Jakel, PTC
Anwendervortrag zum 3. SAXSIM an der TU Chemnitz
19. April 2011 | Rev. 1.0

Inhaltsverzeichnis

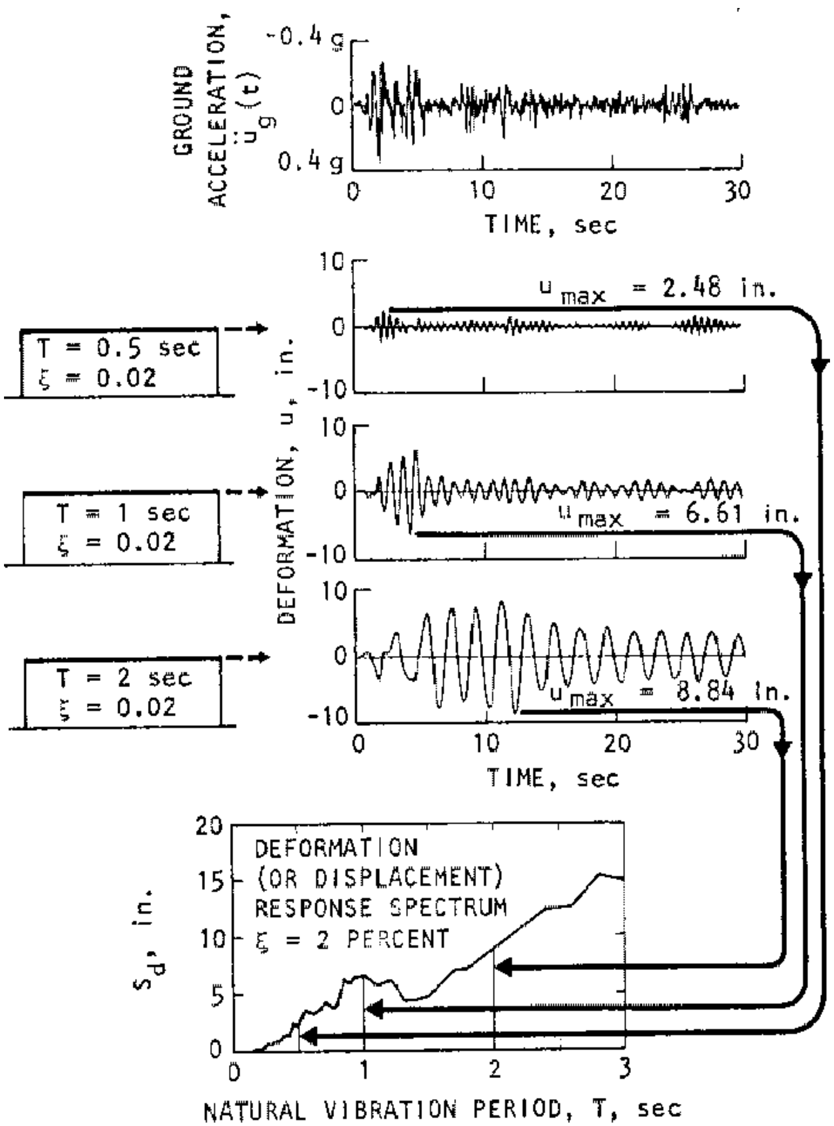
Der Firma Carl Zeiss Optronics wird für die Freigabe der Analysen zum Wärmebildgerät gedankt!

- Motivation:
  – Viele technische Kleingeräte, z.B. Hifikomponenten oder Steuergeräte für Kraftfahrzeuge, werden bei Frequenzen von etwa 5-2000 Hz dynamisch getestet
  – Im Test sind solche Geräte über Ihre Anschraubösen („Fußpunkte“) auf einen Shaker geschraubt und werden darüber angeregt (sog. „Fußpunkterregung“)
  – Zu den Tests gehören:
    - Sinus-Sweepversuche zur Eigenfrequenzbestimmung (in Mechanica berechenbar mit der „*dynamischen Frequenzanalyse*“)
    - Random Vibration-Versuche zum Testen der Betriebsfestigkeit, z.B. Schmal- oder Breitbandrauschen (in Mechanica „*stochastische Antwortanalyse*“)
    - Schockversuche zum Überprüfen der Schockfestigkeit, z.B. mit Halbsinusschocks (in Mechanica „*dynamische Zeitanalyse*“)
  – Die Berechnung von Schockantworten im Zeitbereich (dynamische Zeitanalyse) ist aber je nach angeforderter Ergebnisdatenmenge sehr aufwendig!
  – Alternativ dazu kann eine Näherungsberechnung mittels einer sehr schnellen sogenannten „dynamischen Stoßanalyse“ von Interesse sein!

Idee des Schockantwortspektrums (1)

Was ist ein Schockspektrum?

- Die dynamische Stoßanalyse greift auf ein sog. „Schockantwortspektrum“ (engl. „SRS“-Shock Response Spectra) zurück
- Diesem liegt die Idee zugrunde, den erheblichen mathematischen Aufwand für die Berechnung der maximalen dynamischen Antwort linearer Systeme zu reduzieren
- Man stellt in einem Schockspektrum die maximale Antwort eines linearen (wahlweise auch bedämpften) Einmassenschwingers auf eine vorgegebene transiente Erregung (üblicherweise eine Fußpunkt-beschleunigung) <u>als Funktion seiner Eigenfrequenz f_0</u> oder Periodendauer T_0 dar



Idee des Schockantwortspektrums (2)

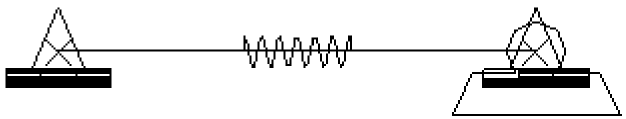
- Damit enthält das Schockantwortspektrum sowohl Informationen über die Anregungsfunktion als auch über die vorliegende Dämpfung der anzuregenden Struktur
- Ist das Schockspektrum bekannt, so braucht dann die allgemein bekannte Bewegungsdifferenzialgleichung für die vorliegende Anregung nicht mehr gelöst zu werden: Die maximale Antwort eines Einmassenschwingers einer bestimmten Frequenz auf diese Anregung kann dann direkt aus dem Spektrum abgelesen werden

- **Geschichtliches:**
  - Vorgestellt wurde das Verfahren erstmalig 1932 (Doktorarbeit des belgisch-amerikanischen Wissenschaftlers Maurice Anthony Biot)
  - Anwendung und Weiterentwicklung vor allem im Bauingenieurwesen (Erdbeben) oder bei allgemein schockbeanspruchten Strukturen (z.B. in der Militärtechnik, im Schiffbau oder der Luft- und Raumfahrt)
  - Weitere Infos können beispielsweise [1] oder [2] entnommen werden (Anhang)

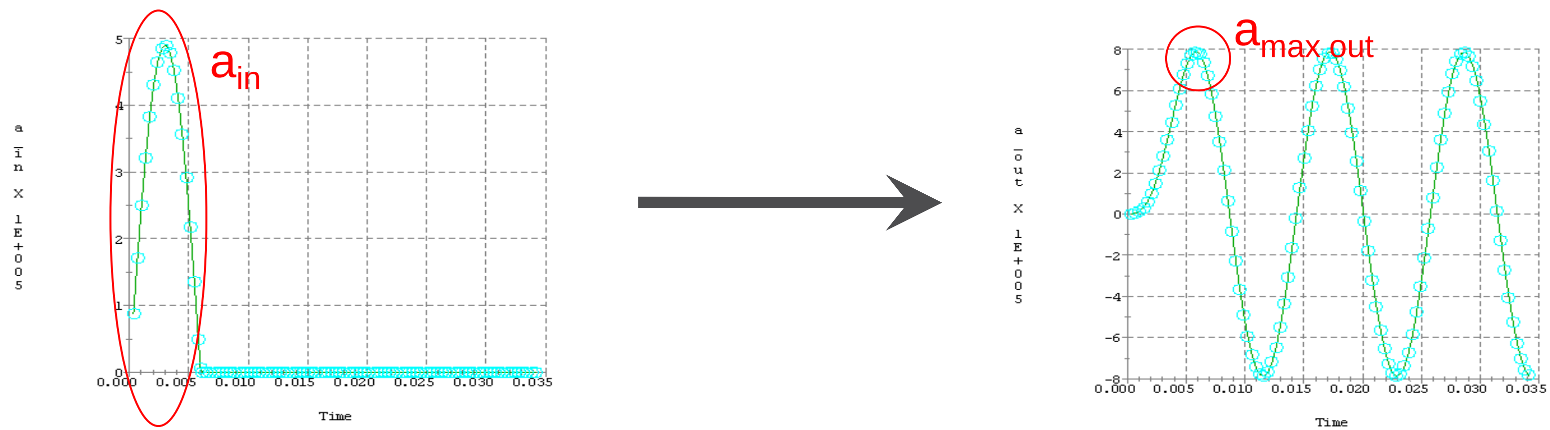
Allg. Vorgehensweisen zum Bestimmen eines Schockantwortspektrums

- Problem:
  - Für eine dynamische Stoßanalyse in Mechanica benötigt man zunächst ein Schockantwortspektrum für die vorliegende Erregung des Systems!
- Beispielhafte Vorgehensweisen zur Bestimmung:
  - Schockspektrum der Literatur, einer entsprechenden Norm oder Spezifikation entnehmen
  - Vorträge von Herrn Dr. Rathmann [3], [4] nehmen
    - Mathcad-Formblätter, sehr elegant und extrem schnell!
  - Mechanica selbst zum Generieren des Schockspektrums verwenden
    - weit langsamer
    - geht aber ohne Mathcad und Spezialkenntnisse in DGLn etc.
    - außerdem sehr einfach auch für schwach gedämpfte Systeme durchführbar

- Grundsätzliche Vorgehensweise in Mechanica
  - Erzeugen eines einfachen Einmassenschwingers mit idealisierter Feder und Punktmasse

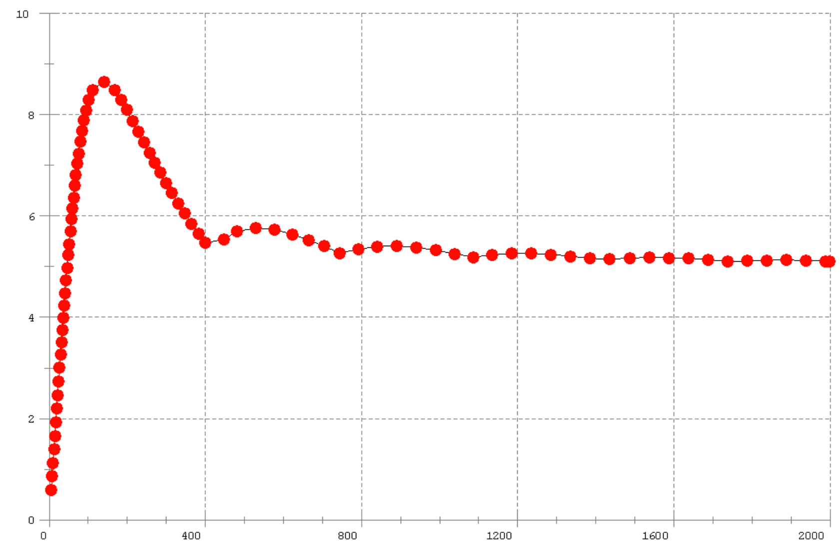


  - In dynamischer Zeitanalyse die Anregungsfunktion definieren (z.B. einen Halbsinusschock), dabei als Messgröße die jeweils maximale Schockantwort der Punktmasse über die gesamte Analysedauer definieren

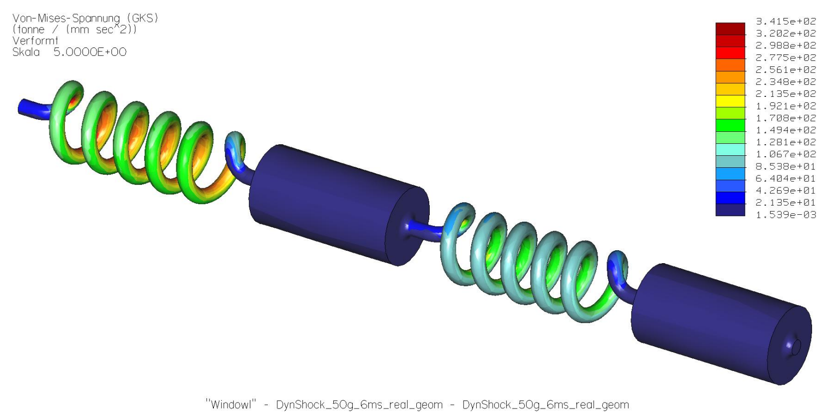


  - In globaler Sensitivitätsstudie die Eigenfrequenz des Einmassenschwingers über den gewünschten Frequenzbereich „sweepen“ (durch Parametervariable für die Federsteifigkeit oder die Masse)

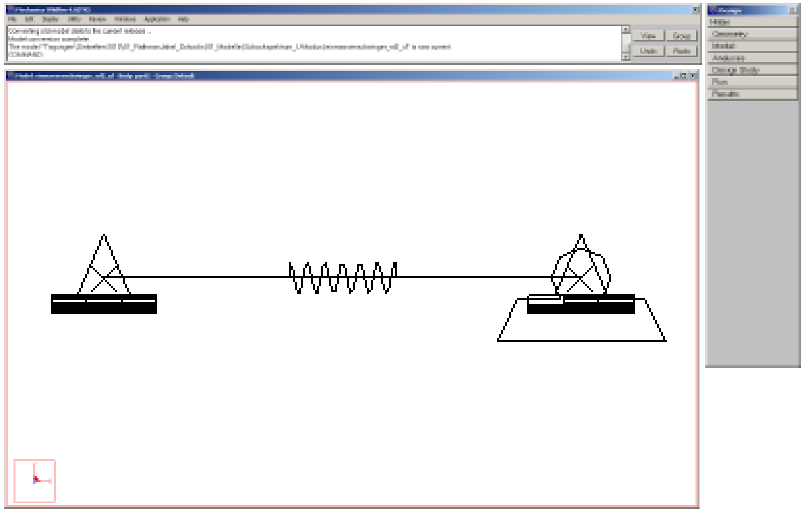
- **Vorgehensweise in Mechanica (cont'd)**
  - Nach der Sensitivitätsstudie die Messgröße „maximale Schockantwort" über die Eigenfrequenz des Schwingers auftragen – fertig ist das Schockantwortspektrum!



  - Das so generierte Schockantwortspektrum kann dann in Tabellenform in eine Mechanica-Stoßanalyse eingelesen und die maximale Schockantwort der zu berechnenden Struktur näherungsweise bestimmt werden!



- Integrierter oder unabhängiger Modus?
  - Zur Erzeugung des Schockspektrums in Mechanica kann sowohl der integrierte als auch der unabhängige Modus verwendet werden
  - Vorteile integrierter Modus: Bekannte Benutzeroberfläche, sehr schnell ab WF5
  - Vorteile unabhängiger Modus: Bis incl. WF4 rechnet die Sensitivitätsstudie viel schneller, da zur Variation der Frequenz (über die Parametervariable Federsteifigkeit) nicht jedes Mal Pro/E im Hintergrund neu gestartet („xtop") und das Modell regeneriert werden muss
  - Nachfolgend wird der Lösungsvorgang für „noch bis WF4"-Anwender für den unabhängigen Modus exemplarisch erläutert
  - Das Vorgehen im integrierten Modus ist analog. Hier kann darüberhinaus alternativ auch die Masse parametrisiert werden!

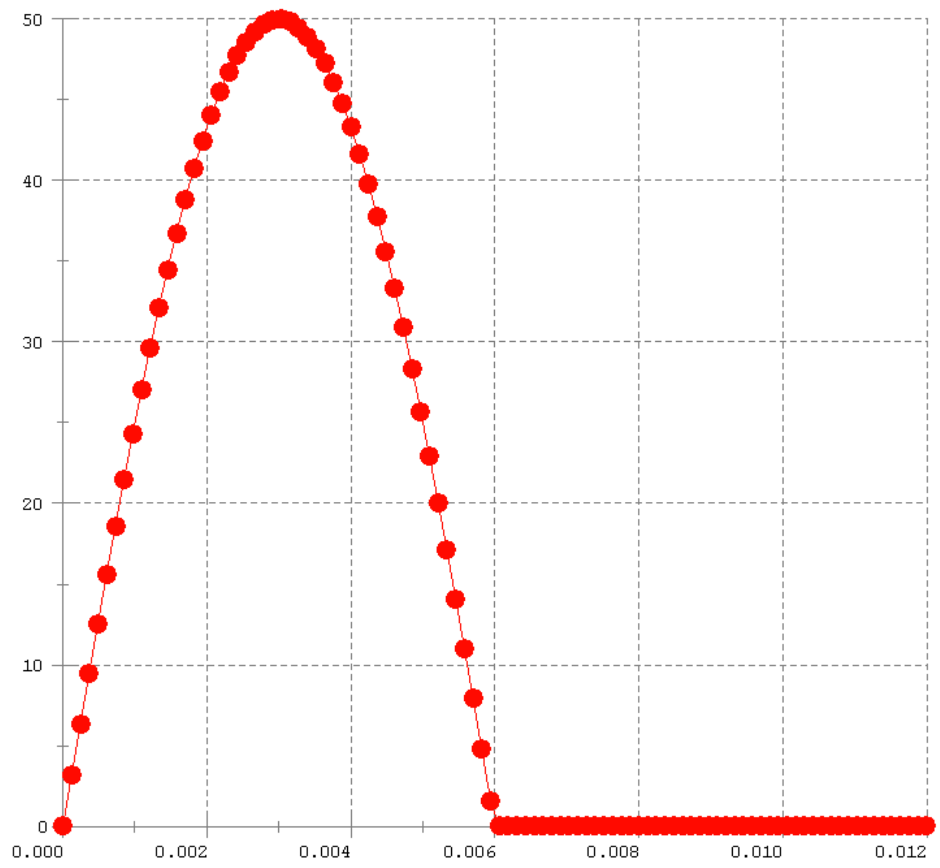


Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (2)

- **Beispiel zur Ermittlung eines Schockspektrums in Mechanica:**
  – Wir wollen nun folgenden typischen Halbsinus-Beschleunigungsschock berechnen:
    - 50 g, 6 ms

  – Die Periodendauer T bei einer Halbwellenzeit von 6 ms beträgt 12 ms, daher ist die zugehörige Frequenz

$$f = \frac{1}{T} = 83{,}\overline{3}\,Hz$$



Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (3)

– Wir möchten die typischen Frequenzen von 5-2000 Hz abdecken. Unter Berücksichtigung der Gleichung für die Eigenfrequenz,

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{m}} \Leftrightarrow K = 4\pi^2 m f_0^2$$

erhalten wir bei fest vorgegebener Masse von willkürlich 1 kg = 0,001 t für die Federsteifigkeiten am unteren und oberen Ende des Frequenzbandes:

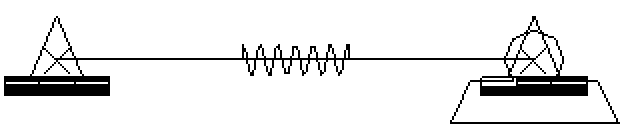
$$K(f_0 = 5Hz) = 0{,}986.960.4 \text{ N/mm}$$

$$K(f_0 = 2000Hz) = 157.913{,}67 \text{ N/mm}$$

– Für die Anregungsfrequenz des Sinusstoßes z.B. wäre die Federsteifigkeit:

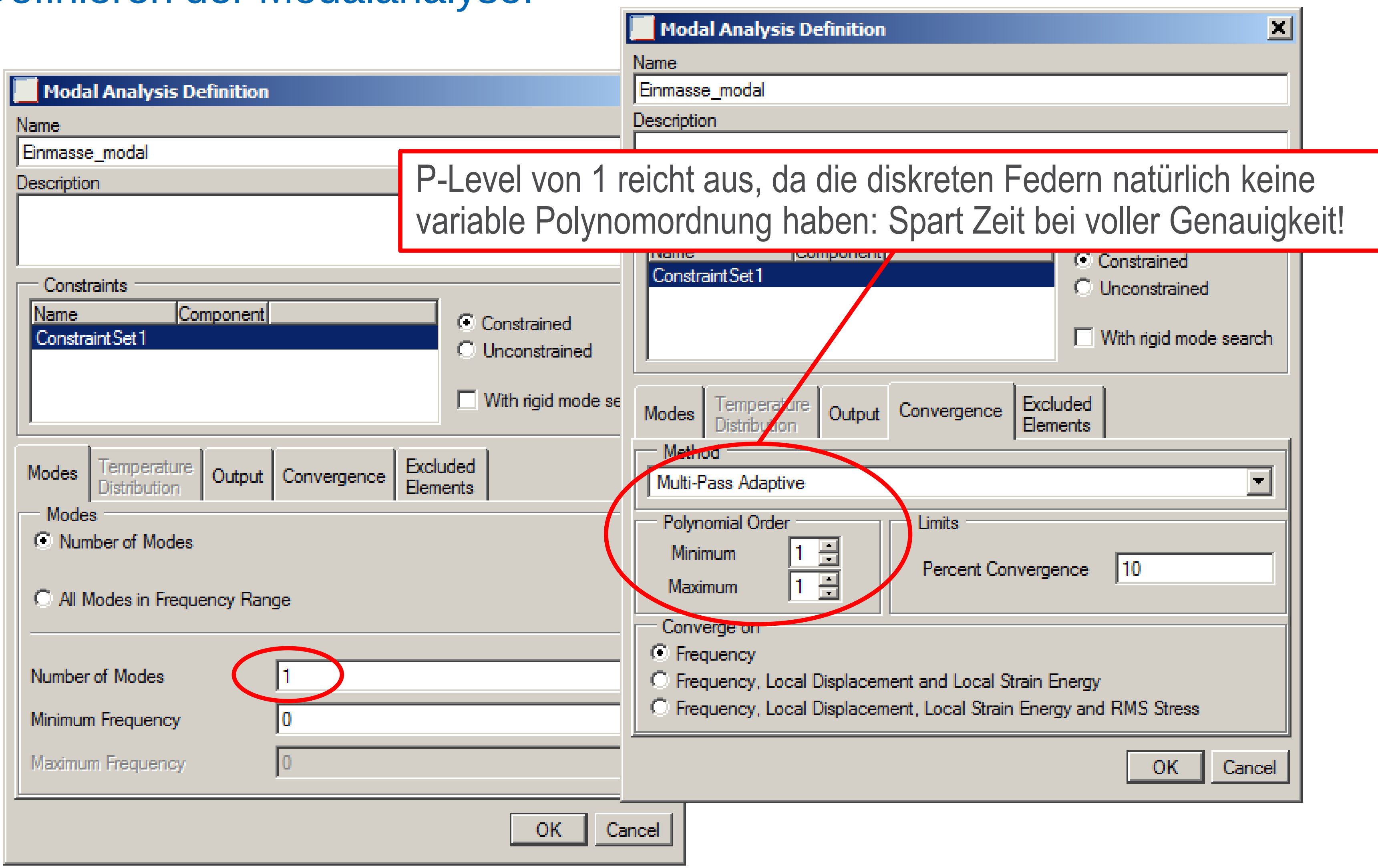
$$K(83{,}333Hz) = 274{,}1557 \text{ N/mm}$$

– Jetzt erzeugen wir in Mechanica einen Einmassenschwinger aus einer Punktmasse und einer Punkt-zu-Punkt Feder mit diesen Eigenschaften:



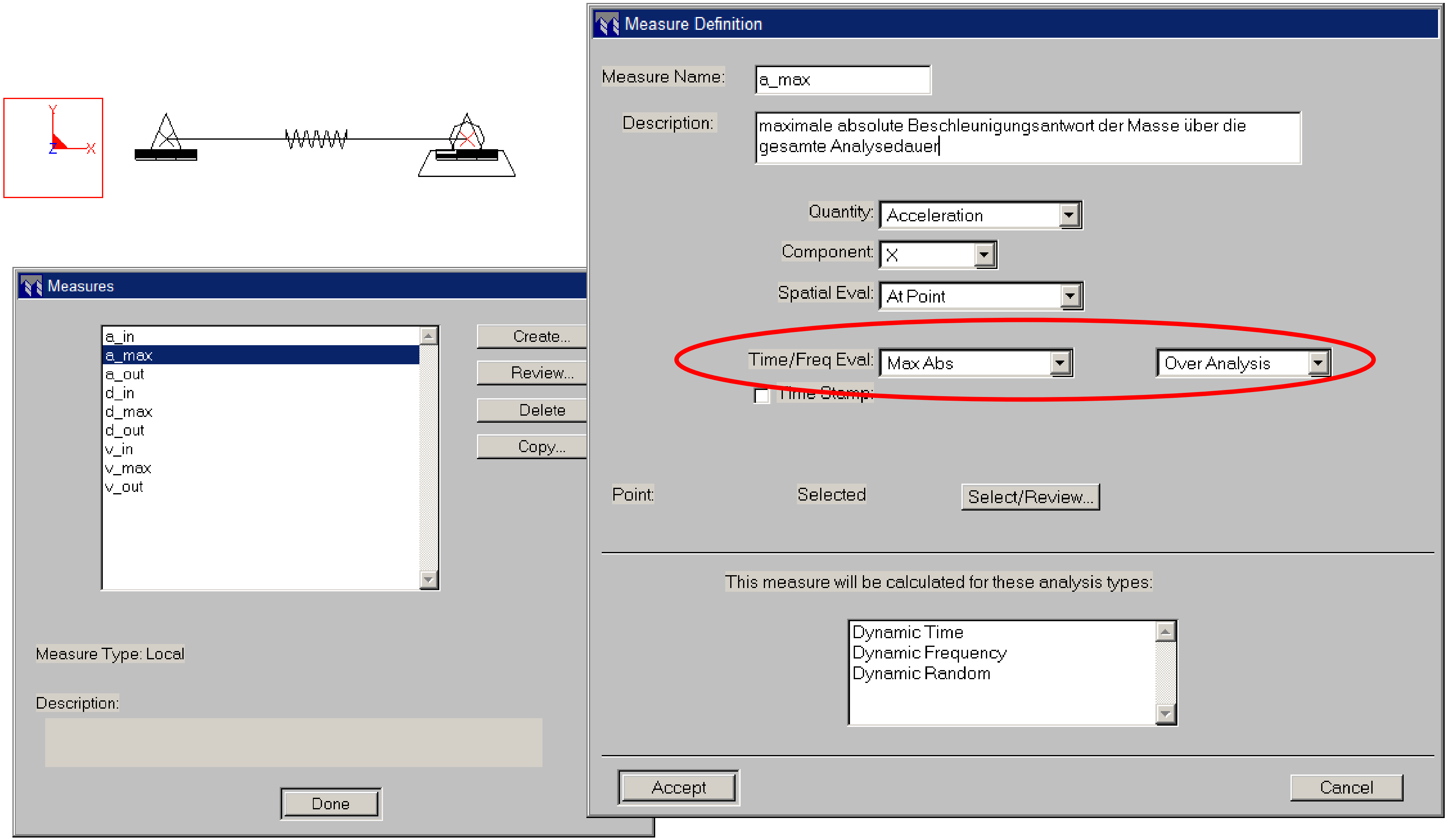
Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (4)

- Definieren der Modalanalyse:



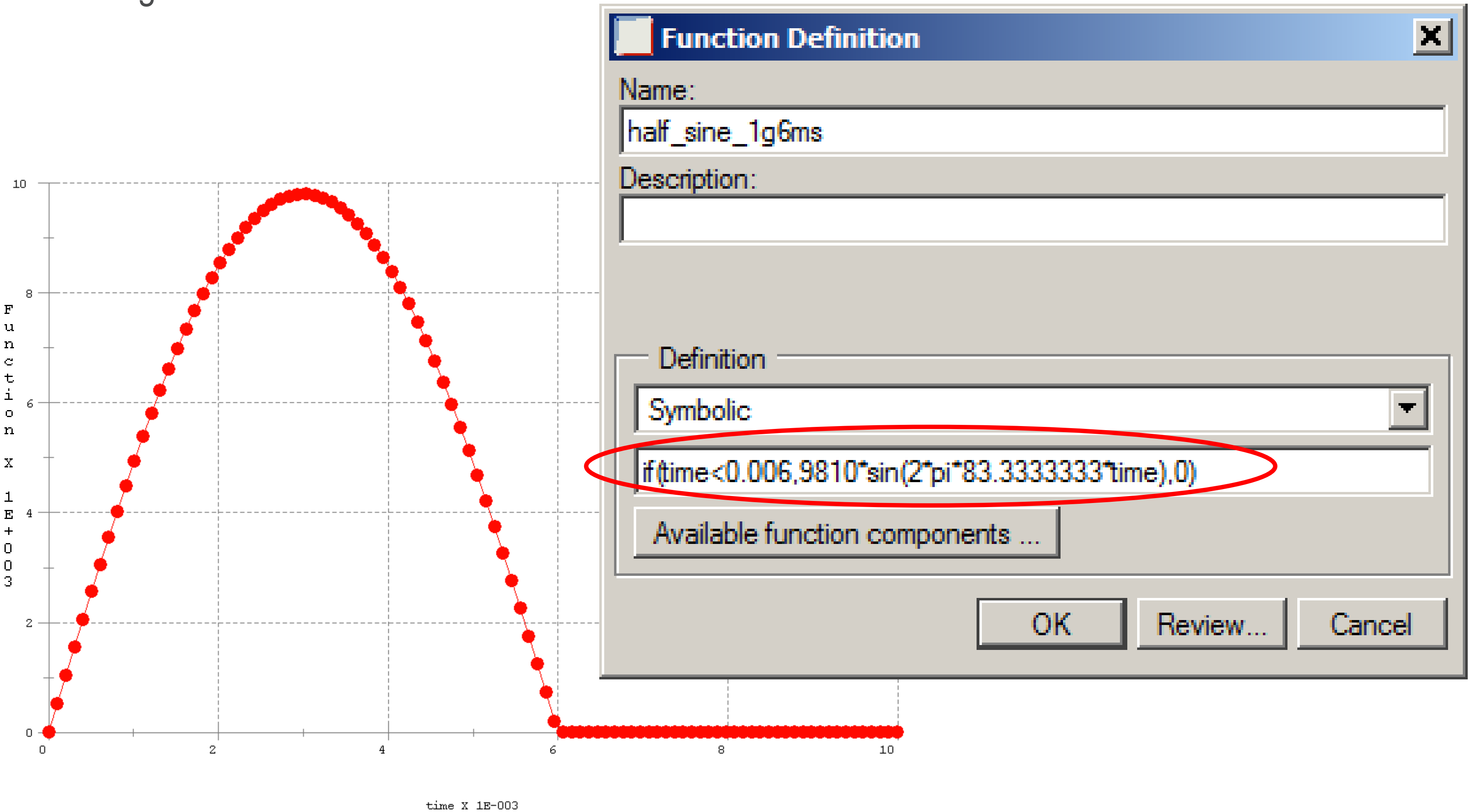
Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (5)

- Erzeugen der Messgrößen für die dynamische Zeitanalyse
  - Main > Model > Measures



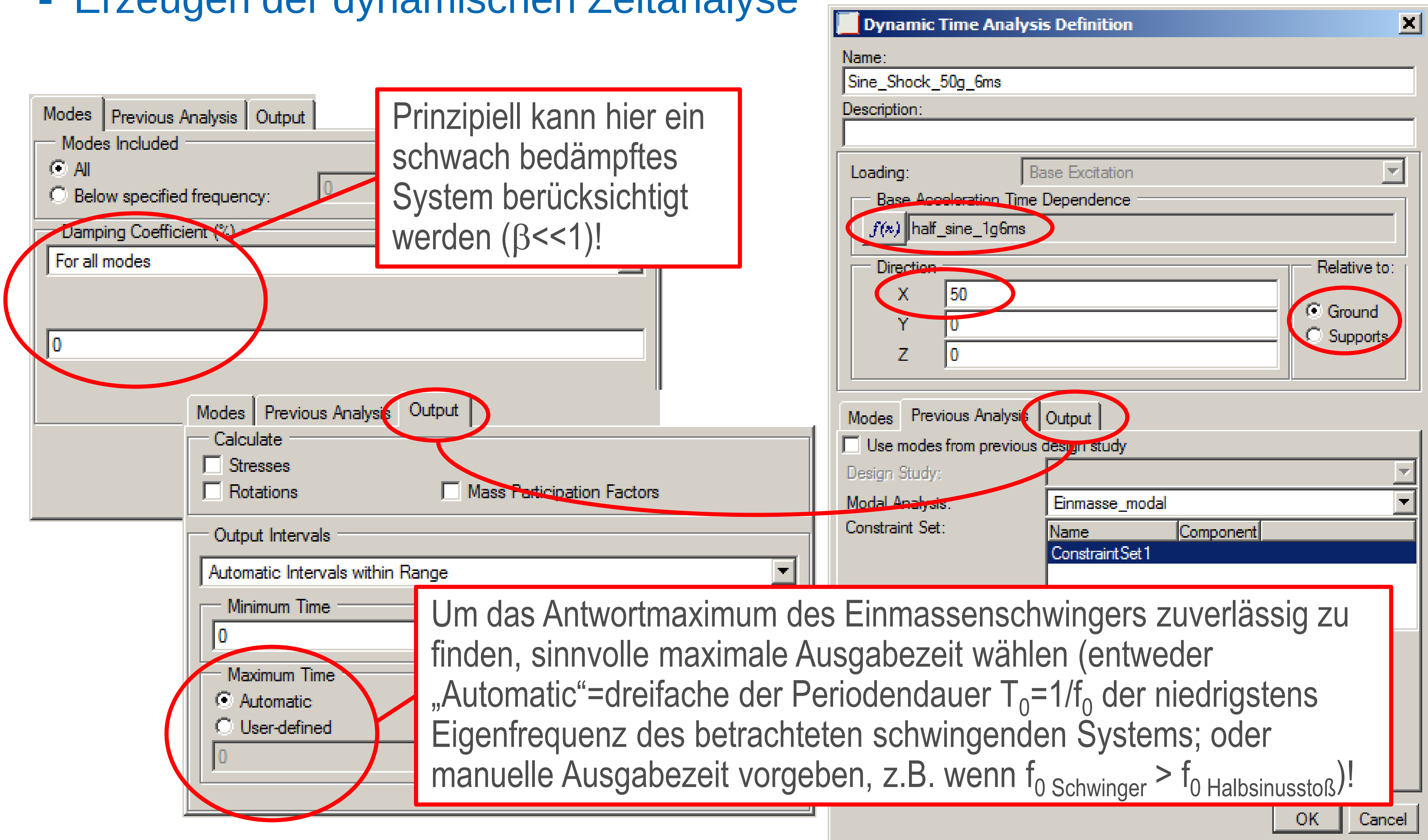
Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (6)

- Erzeugen der Halbsinus-Stoßfunktion:
  - 1g = 9810 mm/s^2



PTC®

- Erzeugen der dynamischen Zeitanalyse



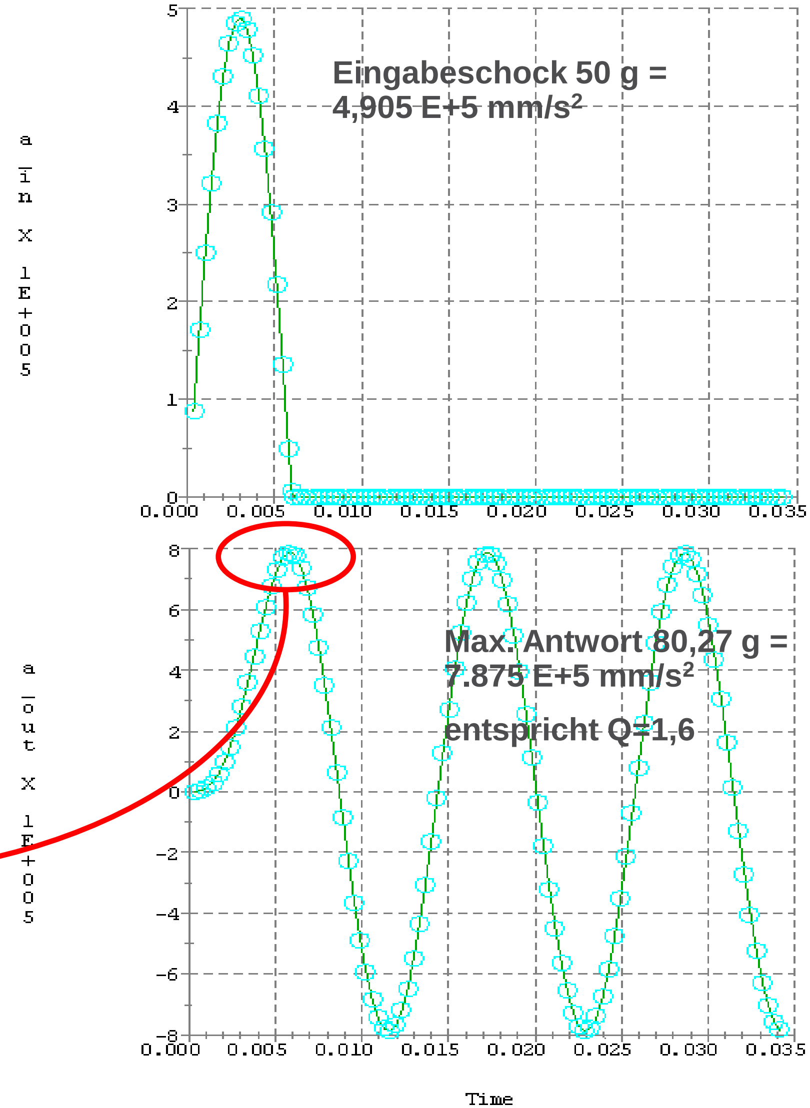
Prinzipiell kann hier ein schwach bedämpftes System berücksichtigt werden (β<<1)!

Um das Antwortmaximum des Einmassenschwingers zuverlässig zu finden, sinnvolle maximale Ausgabezeit wählen (entweder „Automatic“=dreifache der Periodendauer $T_0=1/f_0$ der niedrigstens Eigenfrequenz des betrachteten schwingenden Systems; oder manuelle Ausgabezeit vorgeben, z.B. wenn $f_{0\ Schwinger} > f_{0\ Halbsinusstoß}$)!

Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (8)

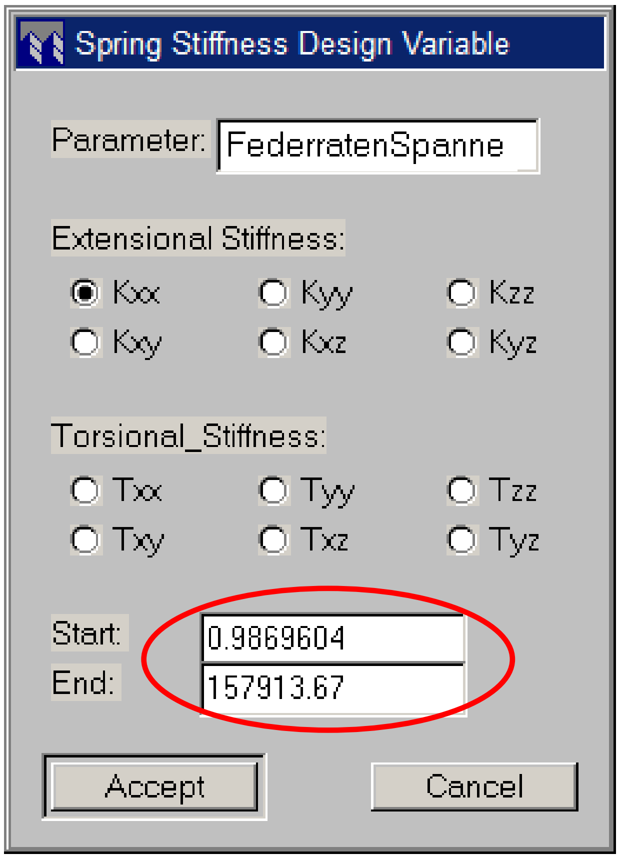
- Ergebnis der dynamischen Zeitanalyse:
  - Graph mit der Zeitantwort des Einmassenschwingers auf die Schockanregung für die Beschleunigung (oder auch Geschwindigkeit bzw. Weg)
  - Absolutes Maximum z.B. der Beschleunigungs-Schockantwort des Schwingers (hier für Beispielfedersteife K=304,3791 N/mm
    → f_0=87,8 Hz):
    Dieses ist dann **ein** Punkt des noch zu erzeugenden Schockantwortspektrums

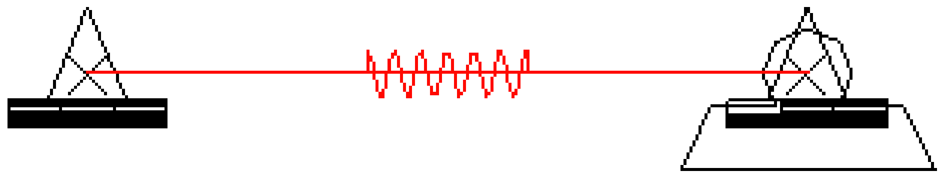
```
Enforced Displacement

Measures:

a_max:        7.874842e+05
d_max:        6.082563e+01
v_max:        3.296130e+03

Analysis "Sine_Shock_50g_6ms" Completed
```

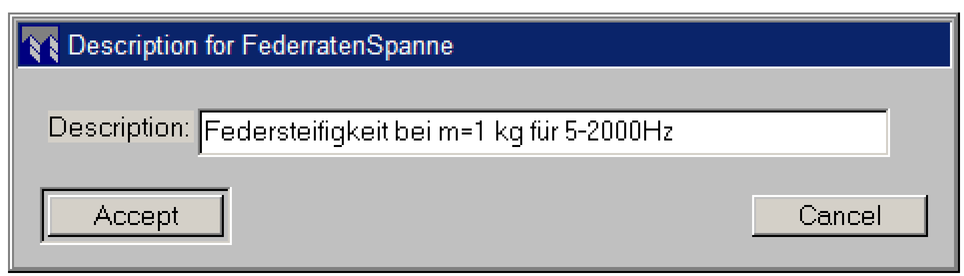


Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (9)

- Erzeugen der Eigenschaftvariable für die Federsteifigkeit
  - Main > Model > Design Variables > Property Vars: > Spring Stiffness



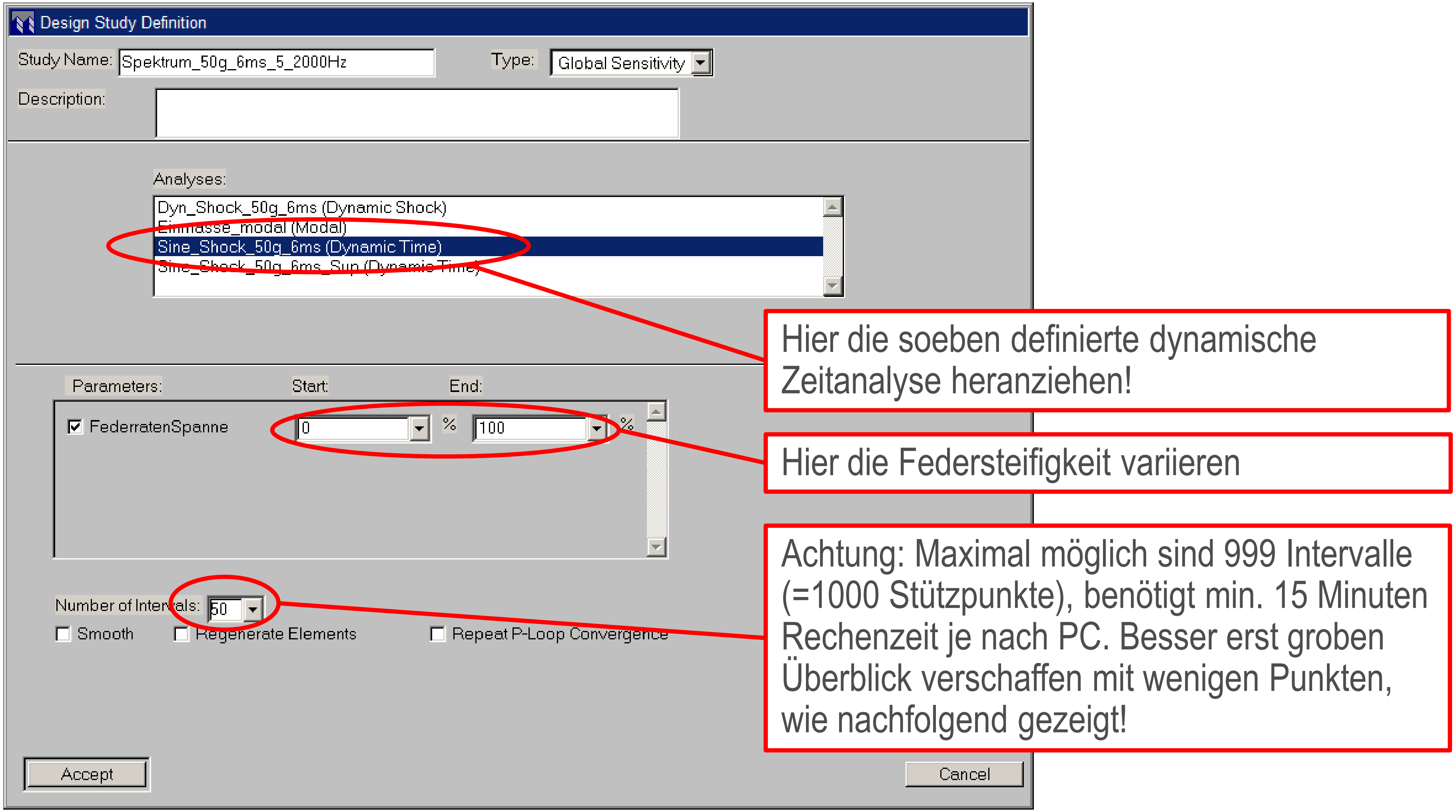




Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (10)

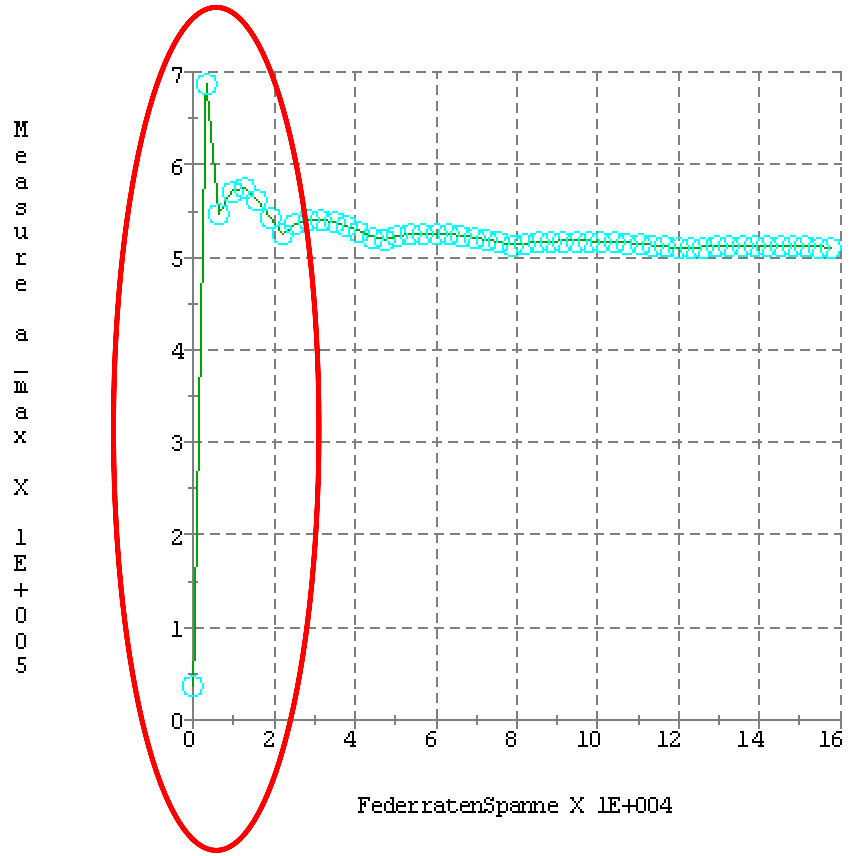
PTC®

- Erzeugen der Designstudie vom Typ „Globale Sensitivität“



Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (11)

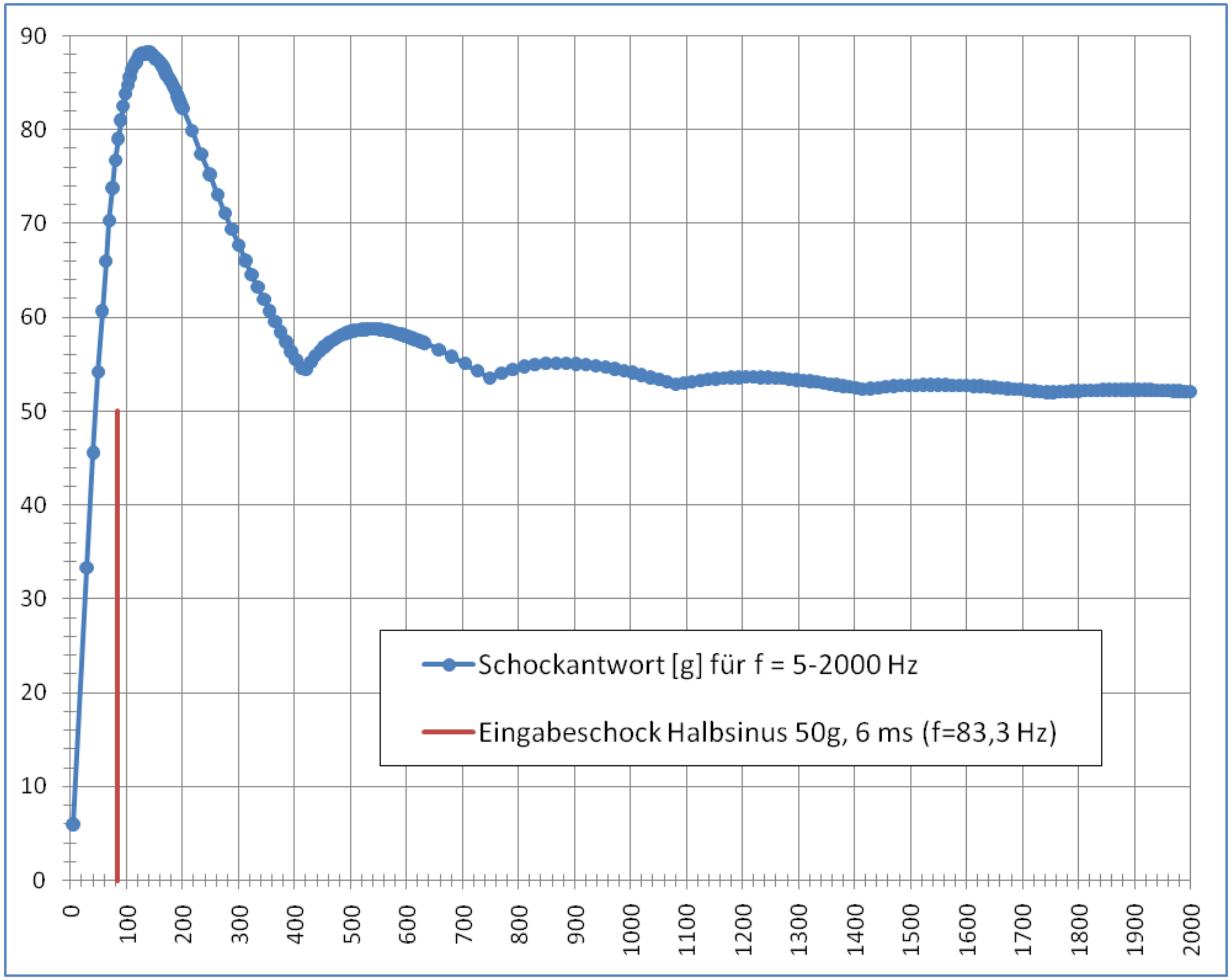
- Ergebnisse der Designstudie
  - Rechts aufgetragen die maximale Beschleunigung über den Parameter Federsteife (entspricht 5-2000 Hz)
  - Hier erkennt man sofort, dass für Federsteifen K < ca. 30000 N/mm die Anzahl an Stützpunkten erhöht werden muss
  - Im gezeigten Fall bieten sich vier Sensitiviätsstudien mit z.B. folgenden Parametervariationen an (mit jeweils z.B. 50 Intervallen):
    - 0-1%
    - 1-10%
    - 10-50%
    - 50-100%



Hinweis:
Wegen der Proportionalität f~SQRT(K) sind im unteren Frequenzbereich weniger Stützpunkte vorhanden!

Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (12)

- Verarbeiten der Ergebnisse zu einem Antwortspektrum



– Die Einzelkurven dieser Sensitivitäts-studien werden dann exportiert und z.B. in EXCEL verbunden

– Dort wird der Parameter Federsteifigkeit in eine entsprechende Eigenfrequenz umgerechnet

– Dann Darstellung der maximalen Beschleunigungs-Schockantwort über der Eigenfrequenz des Einmassenschwingers

Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (13)

- Spektrum der Beschleunigung, der Geschwindigkeit oder des Weges?

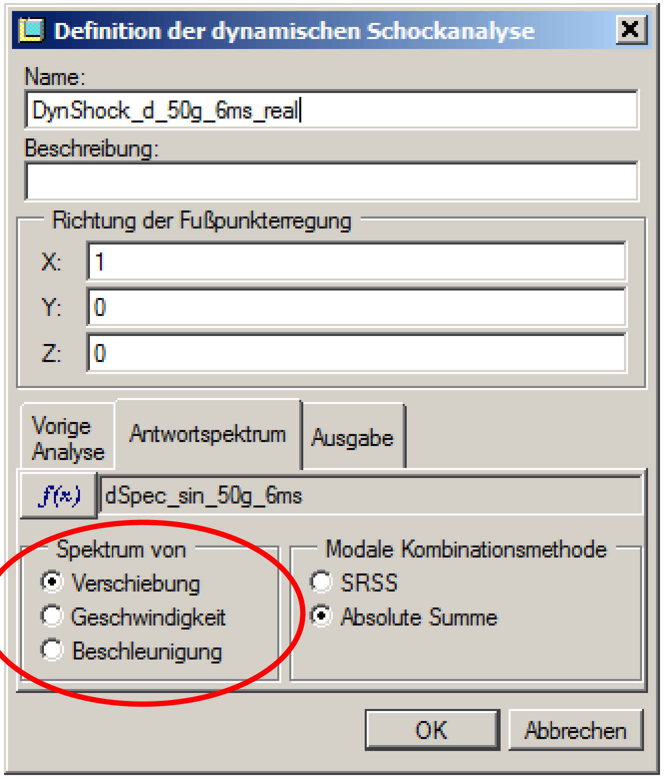
  – Das bisherige Halbsinus-Antwortspektrum ist ein Beschleunigungs-Antwortspektrum relativ zur Basis (=Umgebung). Alternativ könnte in der Mechanica-Stoßanalyse für die Eingabe das Antwortspektrum auch in Geschwindigkeiten oder Wegen ausgedrückt werden

  – Zusammenhang zwischen den drei Spektren gegeben über die „Spectra Response Relation“:

$$\ddot{x}_{\max} = \dot{x}_{\max} \cdot \omega = x_{\max} \cdot \omega^2$$

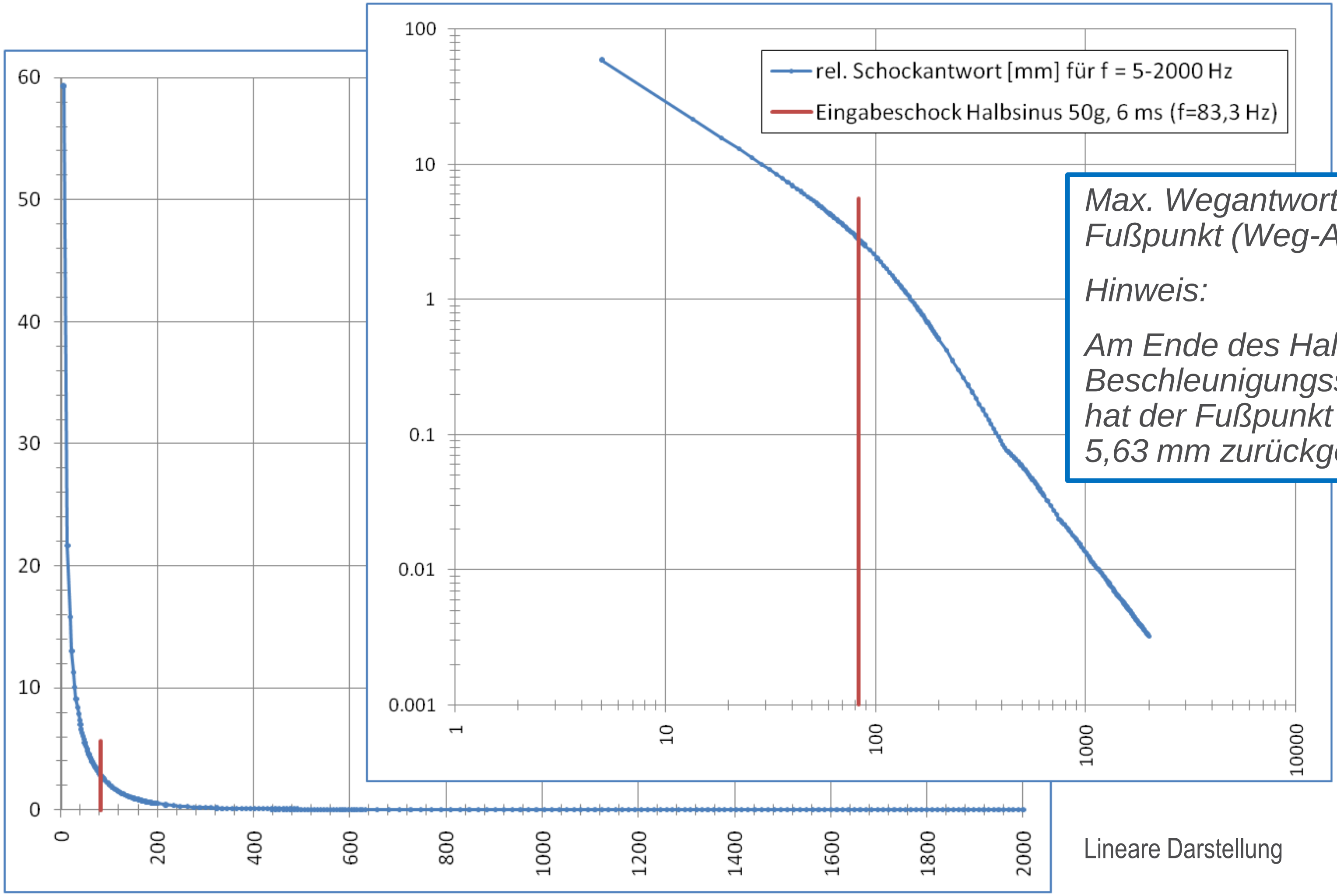
  – Soll z.B. das Antwortspektrum in Wegen dargestellt werden, so kann dieses entweder durch Berechnung der maximalen Wegantworten relativ zu den Fußpunkten ermittelt werden oder durch Division des Beschleunigungsspektrums (relativ zur Basis) durch ω^2

  – Zur Erzeugung des Geschwindigkeits-Antwortspektrums siehe Folie 23



Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (14)

- Halbsinusschock (50 g, 6 ms) – rel. Wegantwortspektrum



Log-Darstellung

Max. Wegantwort relativ zum Fußpunkt (Weg-Antwortspektrum)!

Hinweis:

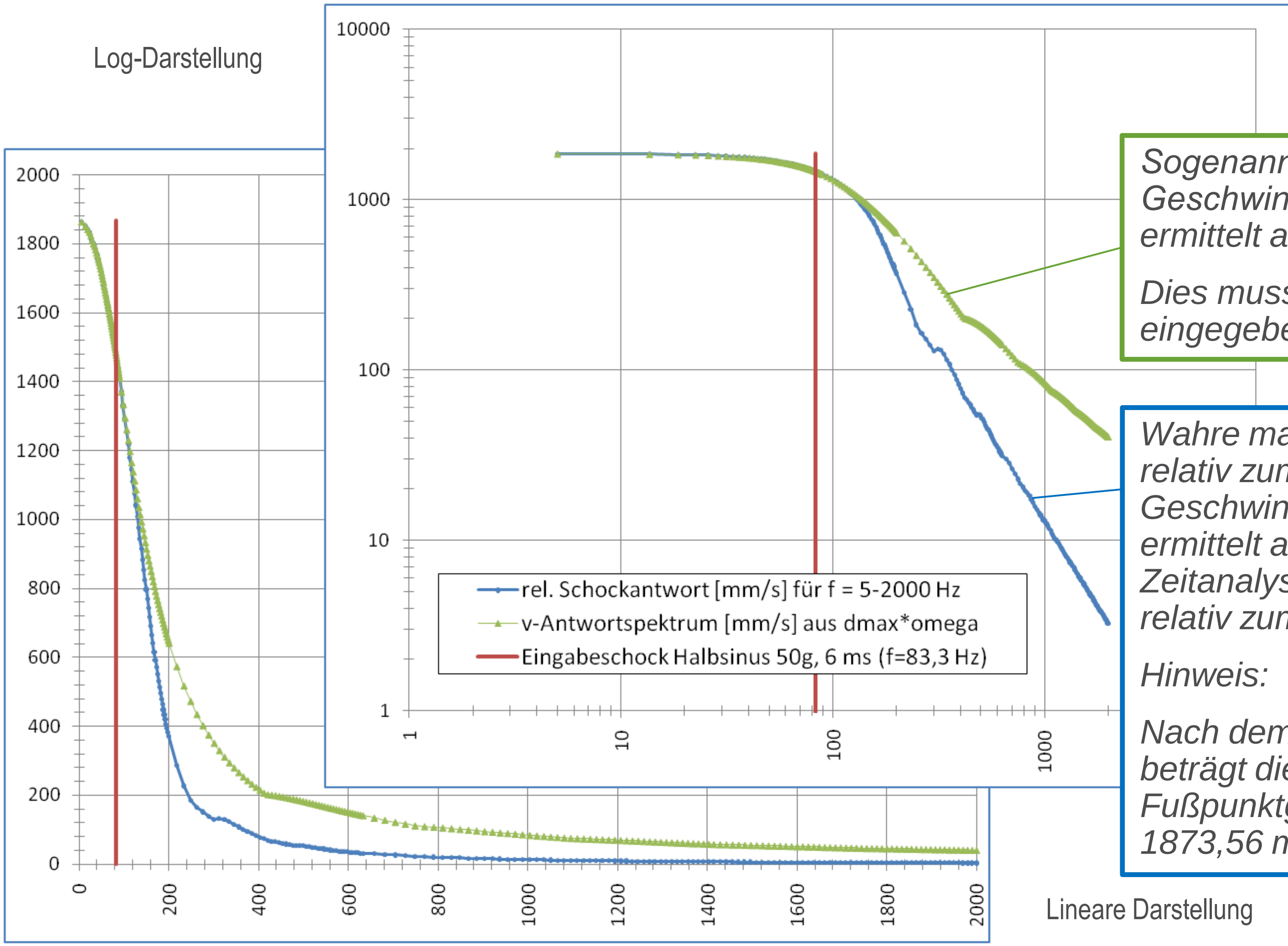
Am Ende des Halbsinus-Beschleunigungsstoßes (t=6 ms) hat der Fußpunkt einen Weg von 5,63 mm zurückgelegt

Lineare Darstellung

Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (15)

- Halbsinusschock (50 g, 6 ms) – Geschwindigkeitsantwortspektren

Log-Darstellung



Lineare Darstellung

Sogenanntes „Pseudo-Geschwindigkeitsspektrum“, ermittelt aus $\dot{x}_{max} = x_{max} \cdot \omega$

Dies muss in Mechanica eingegeben werden!

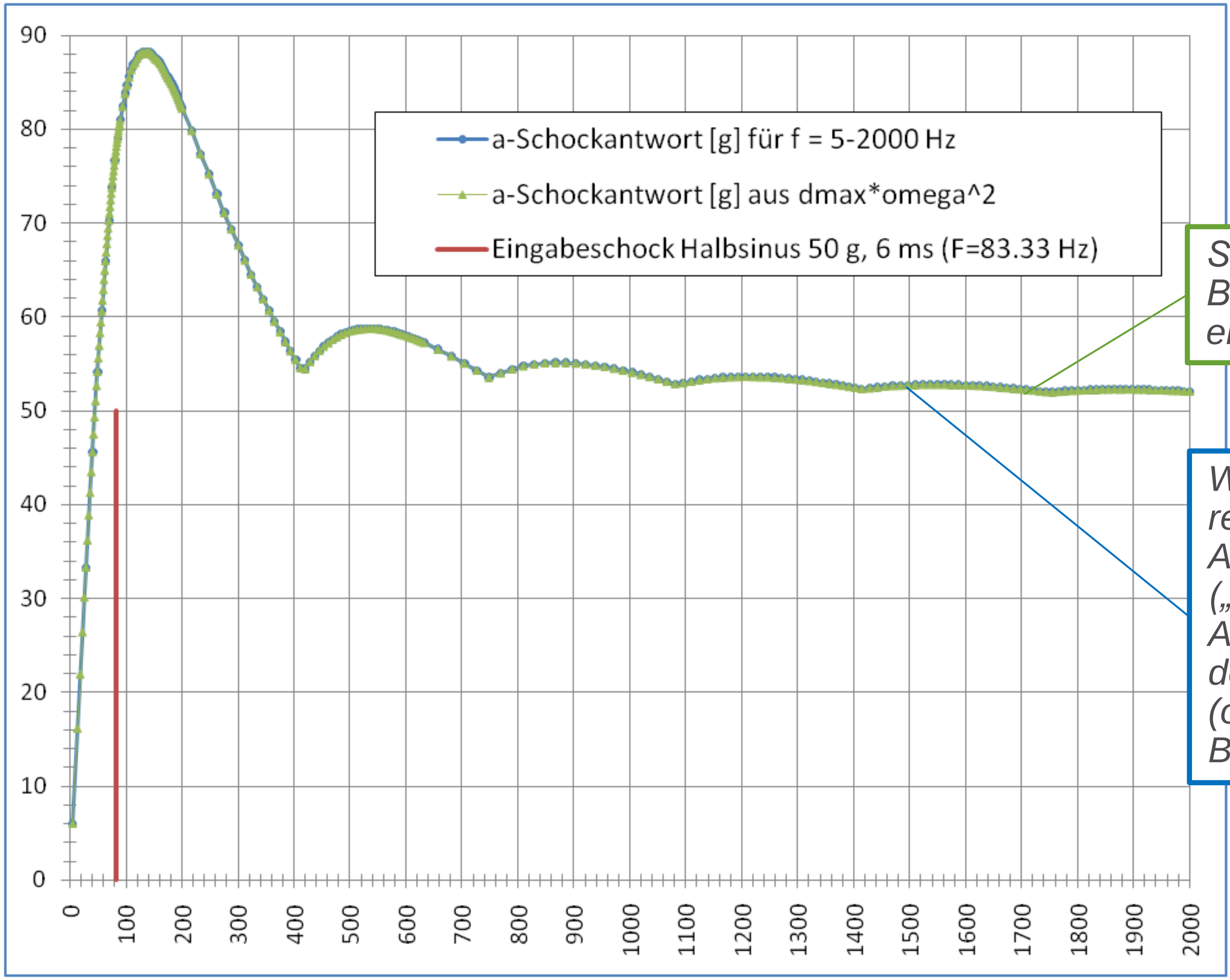
Wahre max. Geschwindigkeit relativ zum Fußpunkt (echtes Geschwindigkeitsspektrum), ermittelt aus der dynamischen Zeitanalyse (oder einer Messung relativ zum Fußpunkt)!

Hinweis:

Nach dem Beschleunigungsstoß beträgt die konstante Fußpunktgeschwindigkeit 1873,56 mm/s

Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (16)

- Halbsinusschock (50 g, 6 ms) – Beschleunigungsantwortspektren



Sogenanntes „Pseudo-Beschleunigungsspektrum", ermittelt aus $\ddot{x}_{\max} = x_{\max} \cdot \omega^2$

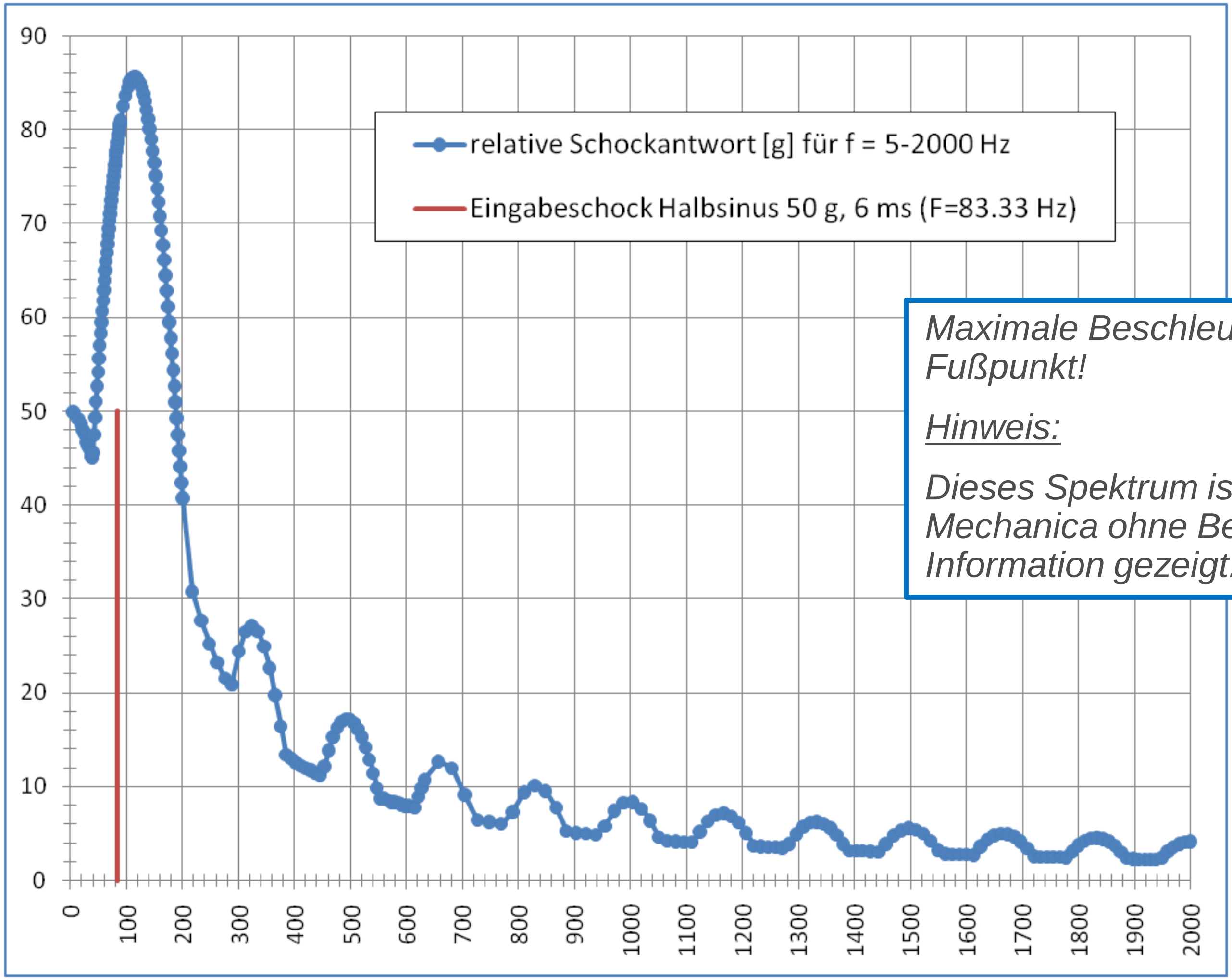
Wahre max. Beschleunigung relativ zur Umgebung = Absolutbeschleunigung („echtes" Beschleunigungs-Antwortspektrum), ermittelt aus der dynamischen Zeitanalyse (oder einer absoluten Beschleunigungsmessung)!

Lineare Darstellung

Erzeugung eines Halbsinus-Schockantwortspektrums in Mechanica (17)

PTC®

- Halbsinusschock (50 g, 6 ms) – rel. Beschleunigungsantwortspektrum



Maximale Beschleunigungsantwort relativ zum Fußpunkt!

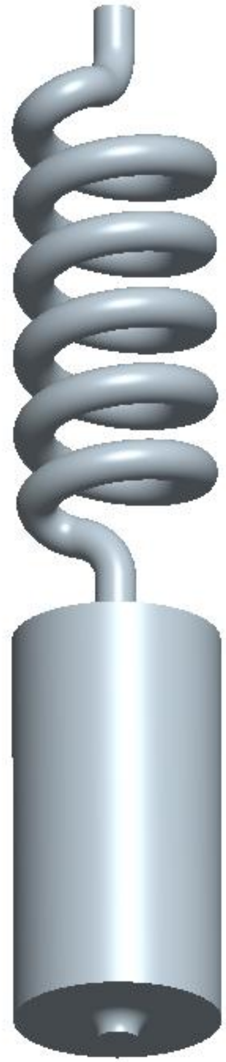
Hinweis:

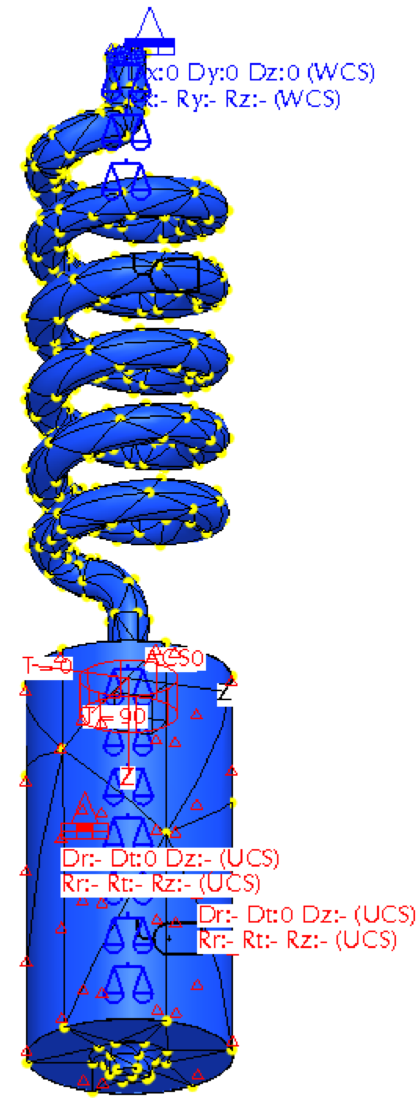
Dieses Spektrum ist für die praktische Arbeit mit Mechanica ohne Bedeutung, es wird nur zur Information gezeigt!

Lineare Darstellung

Überprüfen des Schockantwortspektrums an einem Beispiel (1)

- „Realer“ Einmassenschwinger
  - Masse des Gewichts 1 kg
  - Masselose Stahlfeder mit K=304,3791 N/mm → f_0=87,8 Hz (Dichte vernachlässigbar klein gesetzt)
  - Nur eine Eigenfrequenz wird berechnet, Biege- und Torsionsschwingungen sind durch tangentiale Fesselung des Gewichts unterdrückt
  - Berechnet wird
    - die Schockantwort auf den 50 g / 6 ms-Schock in einer dynamischen Zeitanalyse für eine Zeitdauer von t=3T_0 (einmal mit Ergebnissen relativ zur Umgebung und einmal relativ zum Fußpunkt)
    - alternativ die maximale Schockantwort dieses Schwingers in einer dynamischen Stoßanalyse

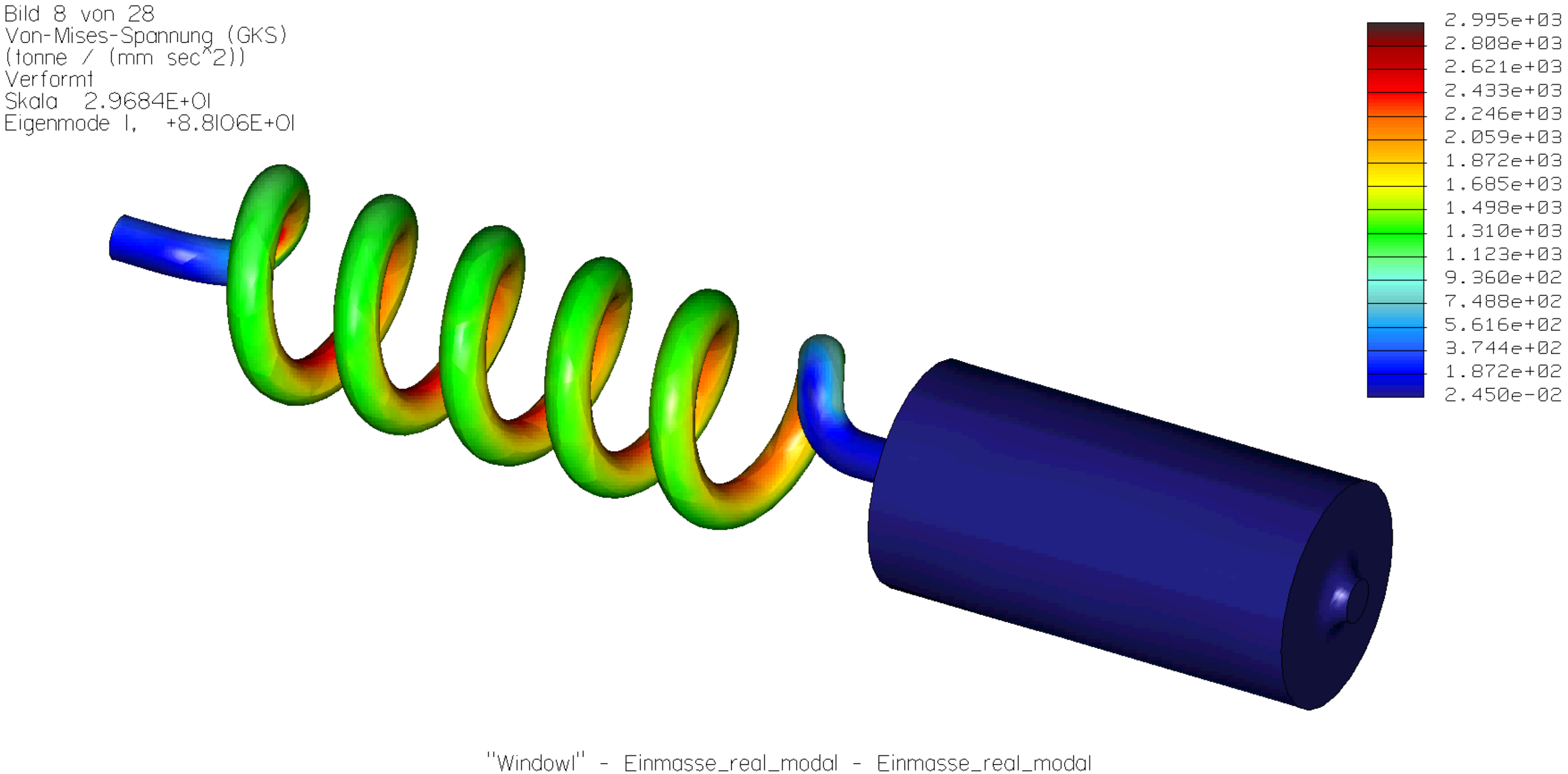




Überprüfen des Schockantwortspektrums an einem Beispiel (2)

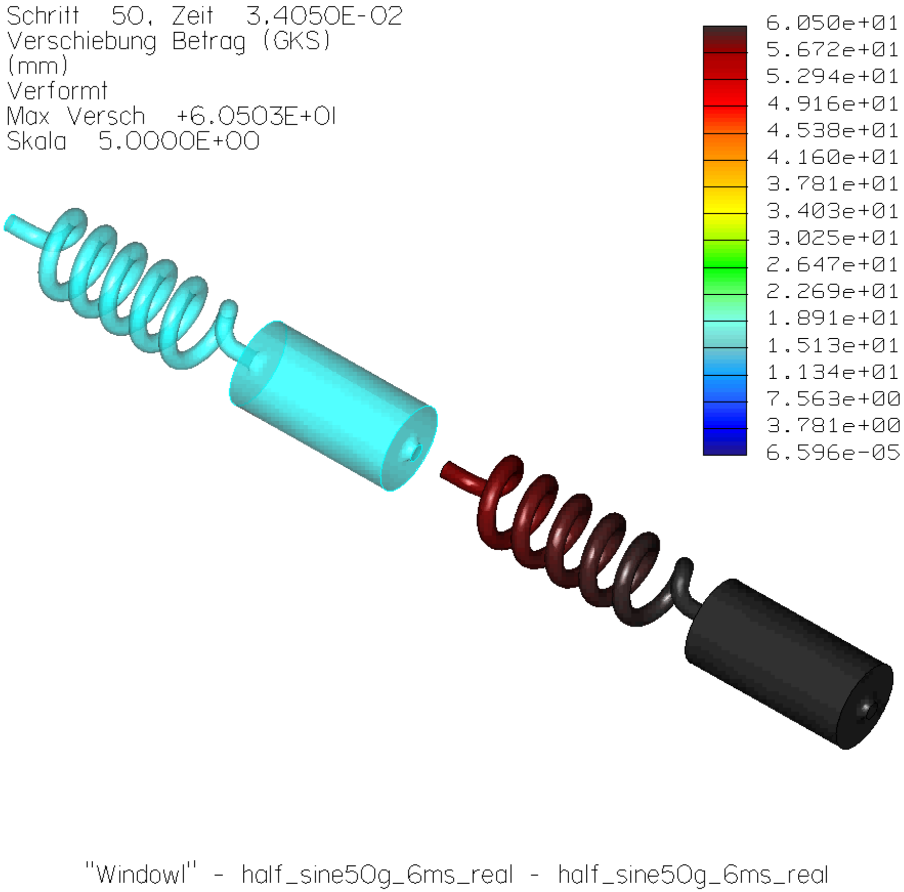
PTC®

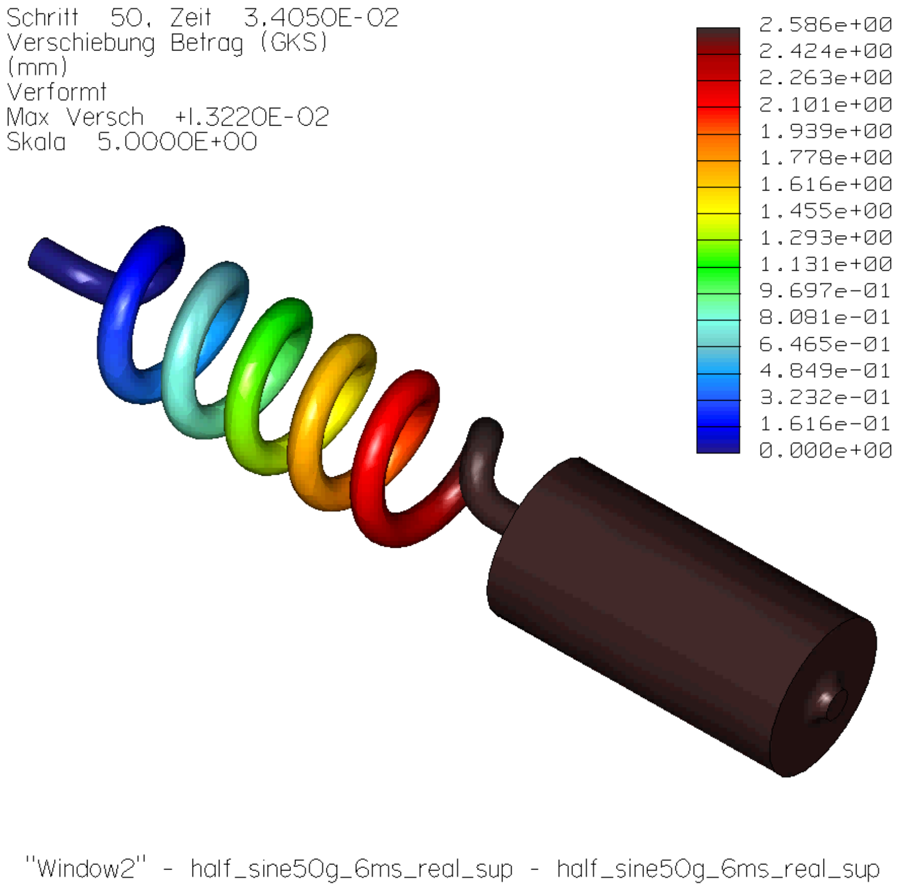
- Ergebnis der Modalanalyse im Single Pass: f_0 = 88,1 Hz (ideal 87,8 Hz)
  – Dargestellt: Modale Spannungen (für massenormierten Eigenvektor)



Überprüfen des Schockantwortspektrums an einem Beispiel (3)

- Ergebnisse der dynamischen Zeitanalysen
  - Verschiebungsbetrag relativ zur Umgebung (5-fach überhöht)
  - Verschiebungsbetrag relativ zum Fußpunkt (5-fach überhöht)

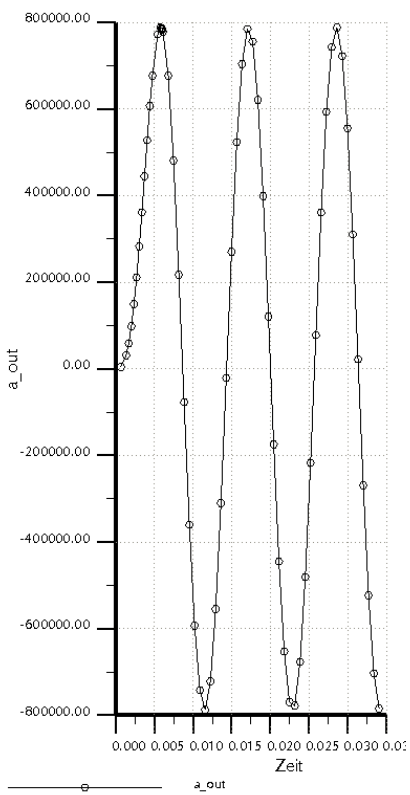


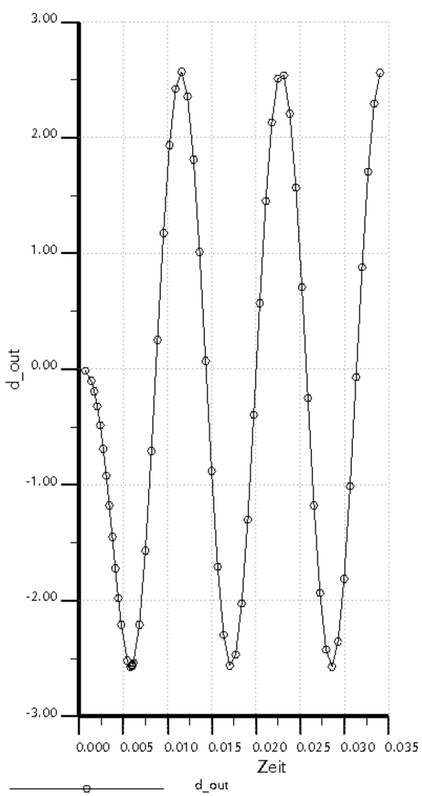


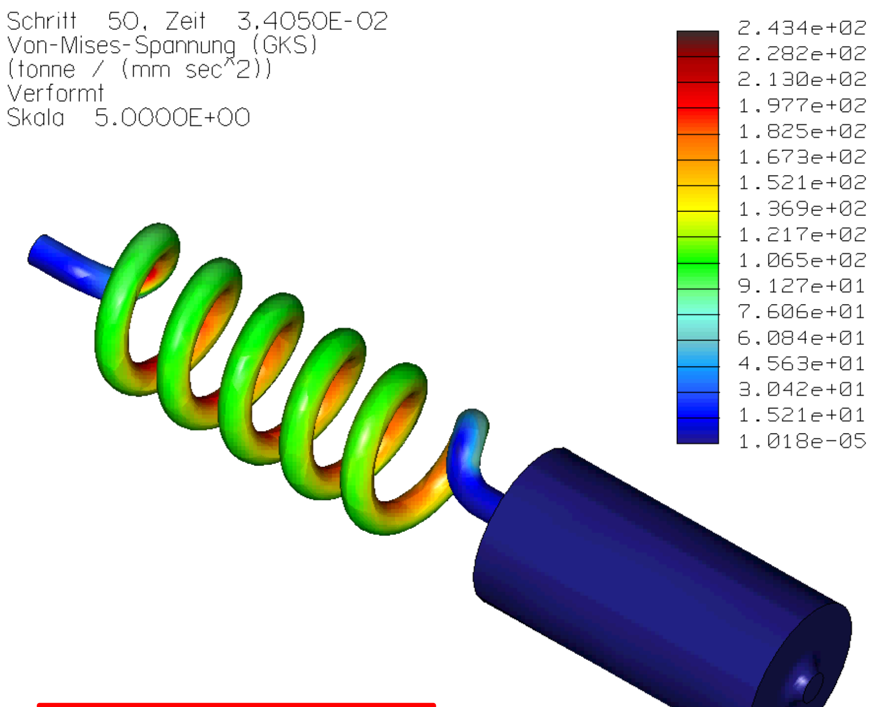
- Ergebnisse der der dynamischen Zeitanalysen
  - Beschleunigung relativ zur Umgebung, Weg relativ zum Fusspunkt:
  - Von Mises Spannung (Verformung relativ zum Fußpunkt, 5-fach überhöht):

Max. Antwortbeschleunigung:
7,878E+5 mm/s2 = 80,3 g

Max. Längs-Antwortweg:
2,571 mm



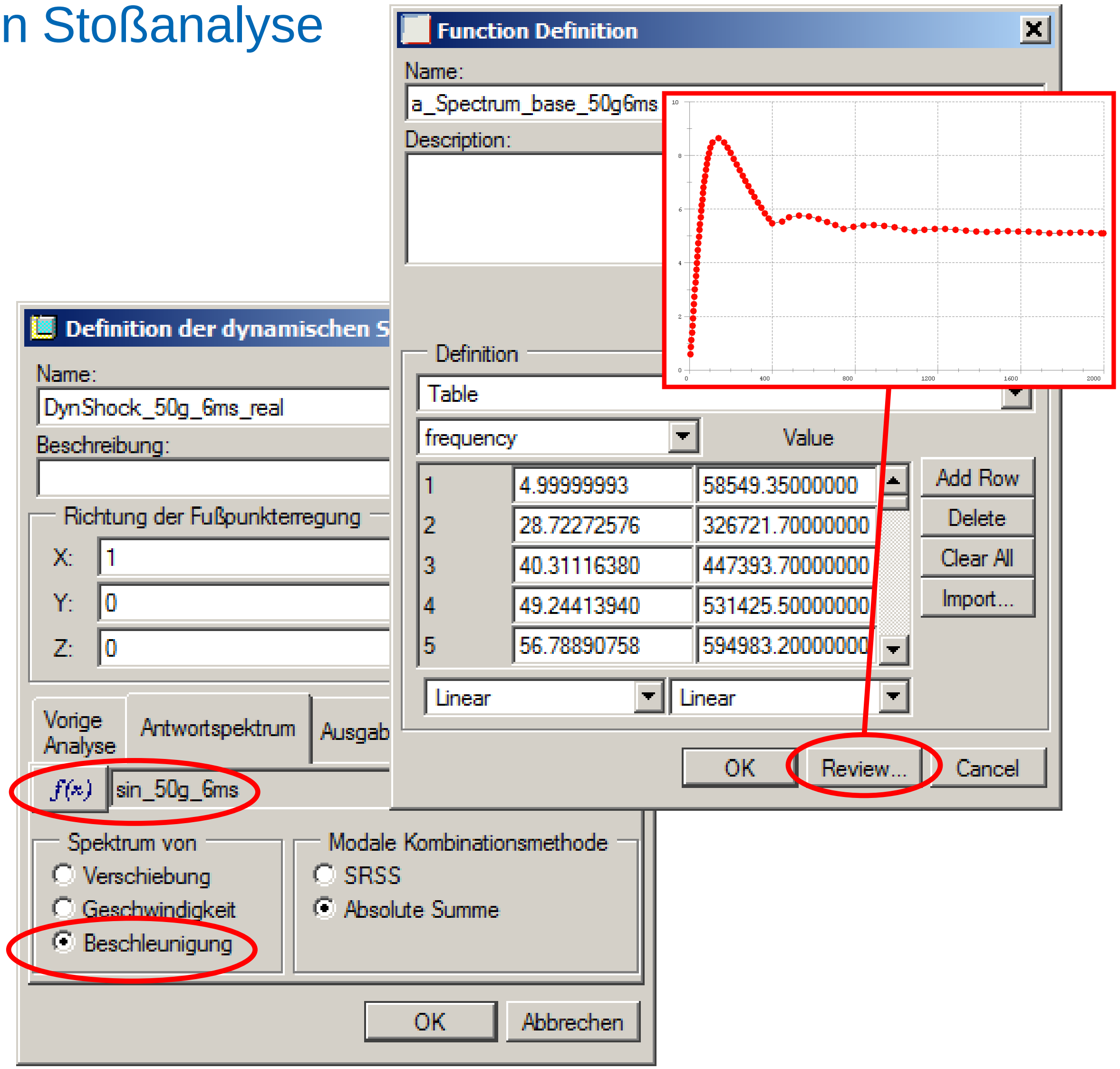




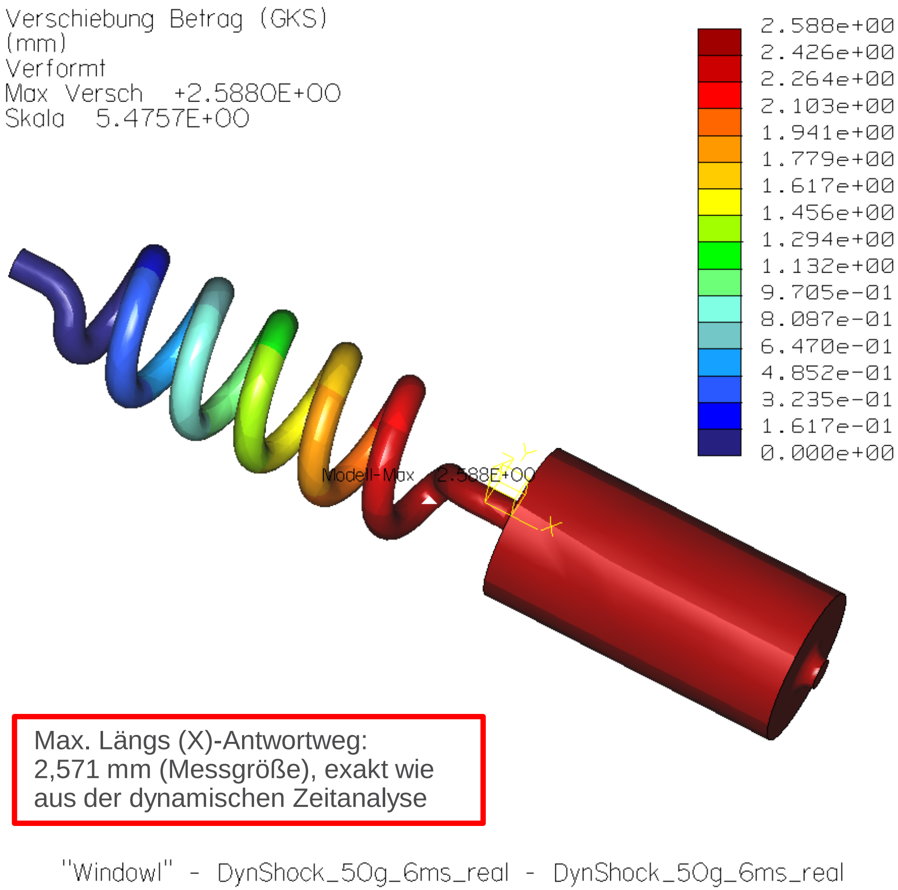
Max. Von Mises-Spannung:
243,4 MPa

"Window2" - half_sine50g_6ms_real_sup - half_sine50g_6ms_real_sup

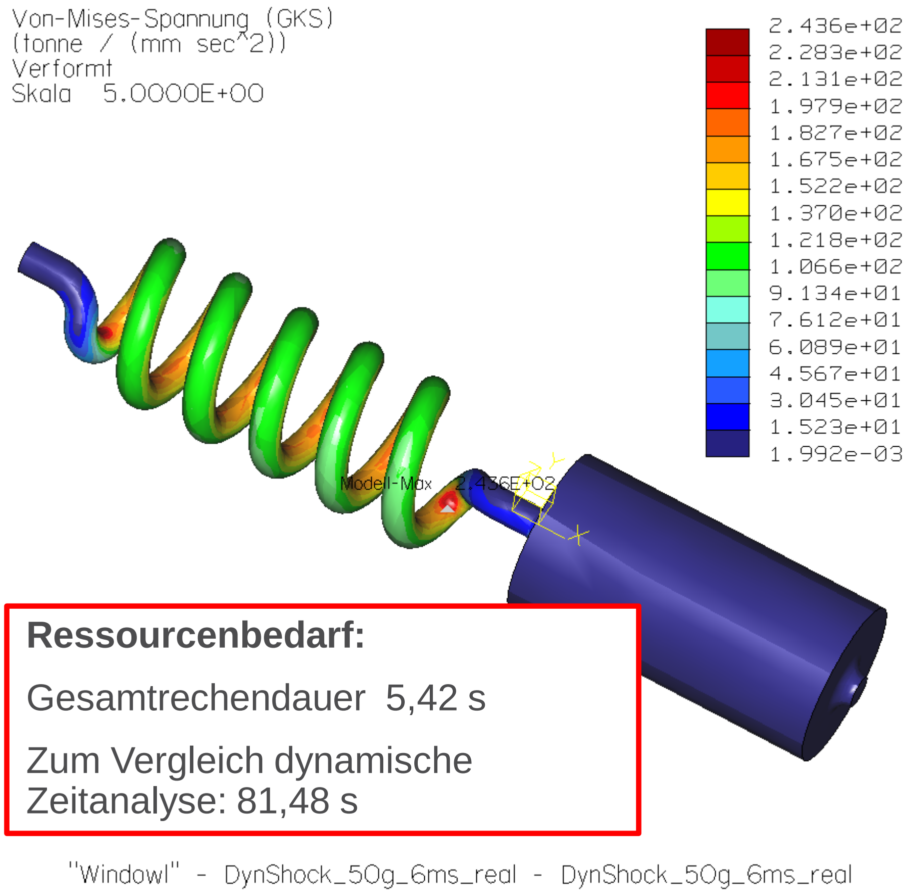
- Erzeugen der dynamischen Stoßanalyse
  - Für die Stoßanalyse wird das Beschleunigungs-Schock-antwortspektrum (Folie 20) als Tabelle (Textdatei) in Mechanica eingelesen
  - Wichtig sind die Einheiten (Beschleunigung konsistent angeben!), die Erregungs-richtung und die Angabe, ob es sich um ein Weg-, Pseudogeschwindigkeits- oder, wie im Beispiel, um ein Beschleunigungsspektrum handelt
  - Bei der Ausgabe werden Spannungen angefordert



- Ergebnis der dynamischen Stoßanalyse
  - Verschiebungsbetrag (Ausgabe immer rel. zum Fußpunkt, hier 5-fach überhöht):
  - Max. Von Mises Spannung [MPa]:



Max. Längs (X)-Antwortweg:
2,571 mm (Messgröße), exakt wie aus der dynamischen Zeitanalyse

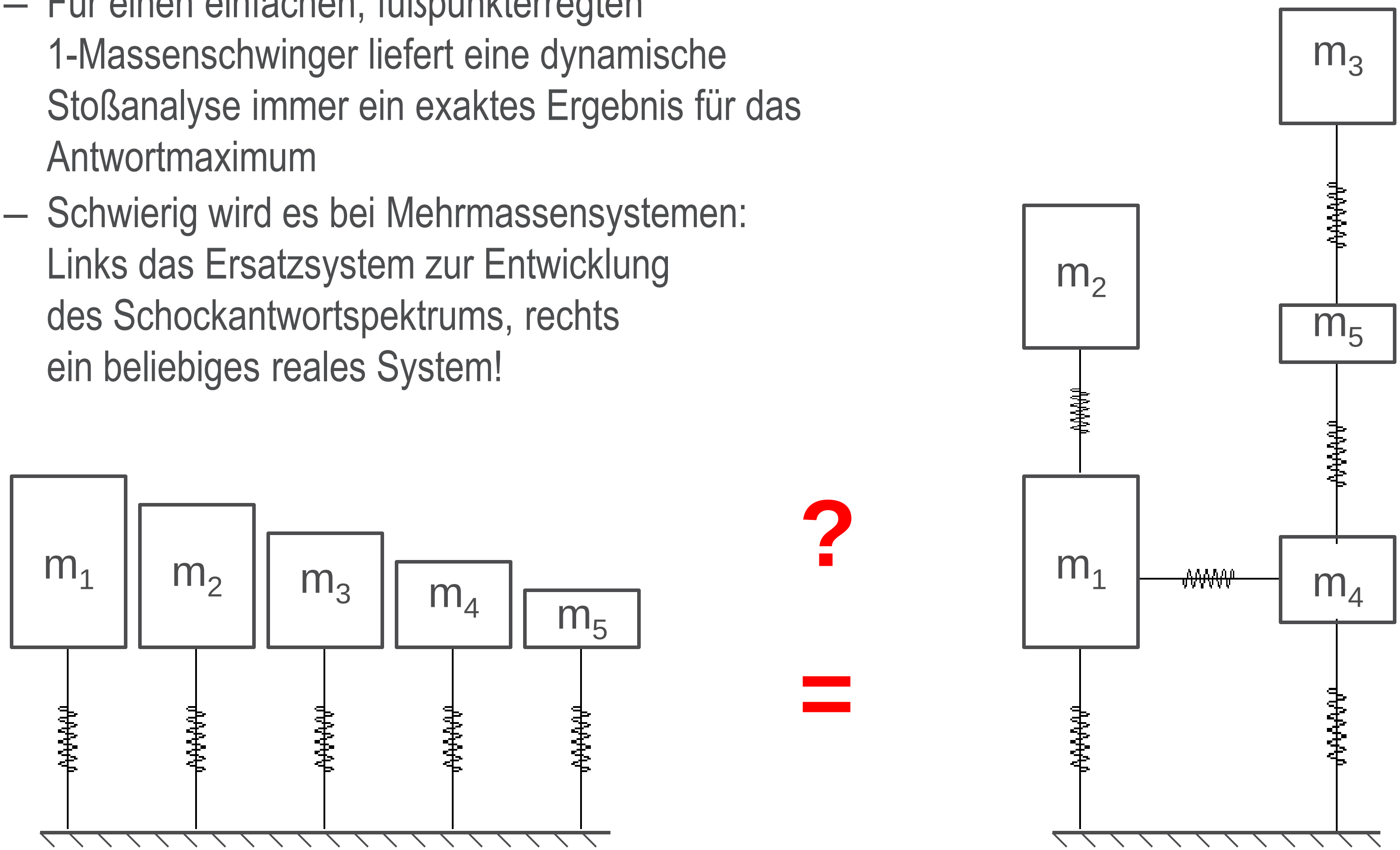


Ressourcenbedarf:

Gesamtrechendauer 5,42 s

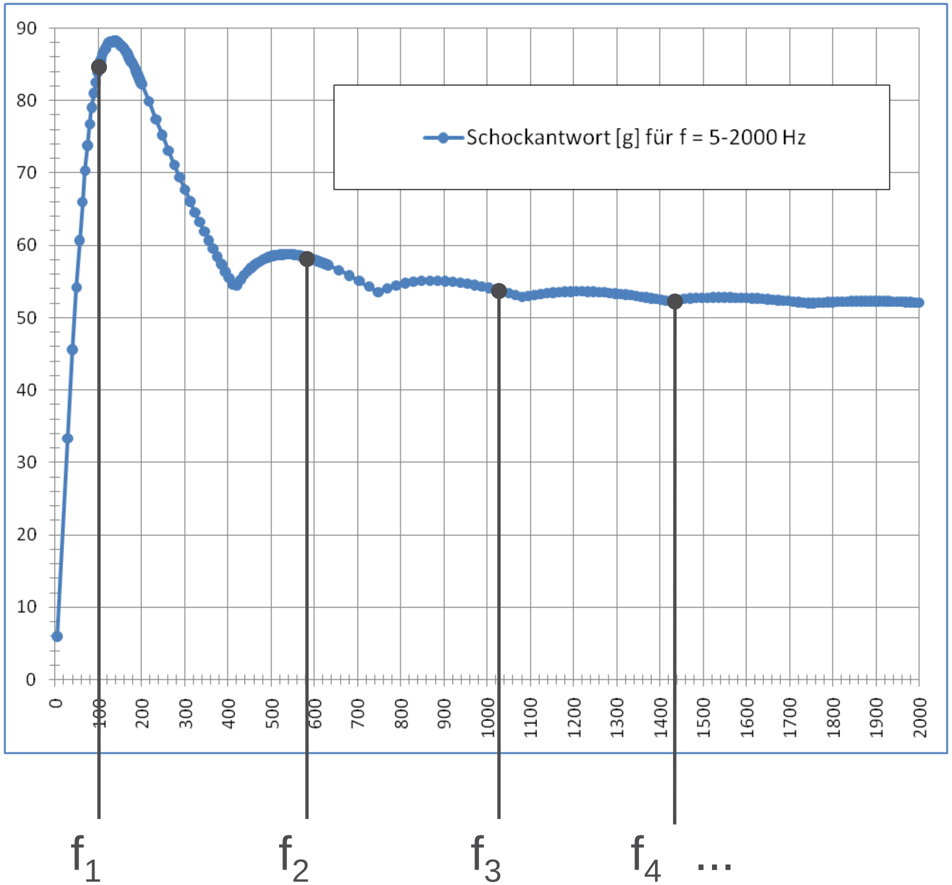
Zum Vergleich dynamische Zeitanalyse: 81,48 s

- Motivation:
  - Für einen einfachen, fußpunkterregten 1-Massenschwinger liefert eine dynamische Stoßanalyse immer ein exaktes Ergebnis für das Antwortmaximum
  - Schwierig wird es bei Mehrmassensystemen: Links das Ersatzsystem zur Entwicklung des Schockantwortspektrums, rechts ein beliebiges reales System!



Modale Superpositionsmethode (2)

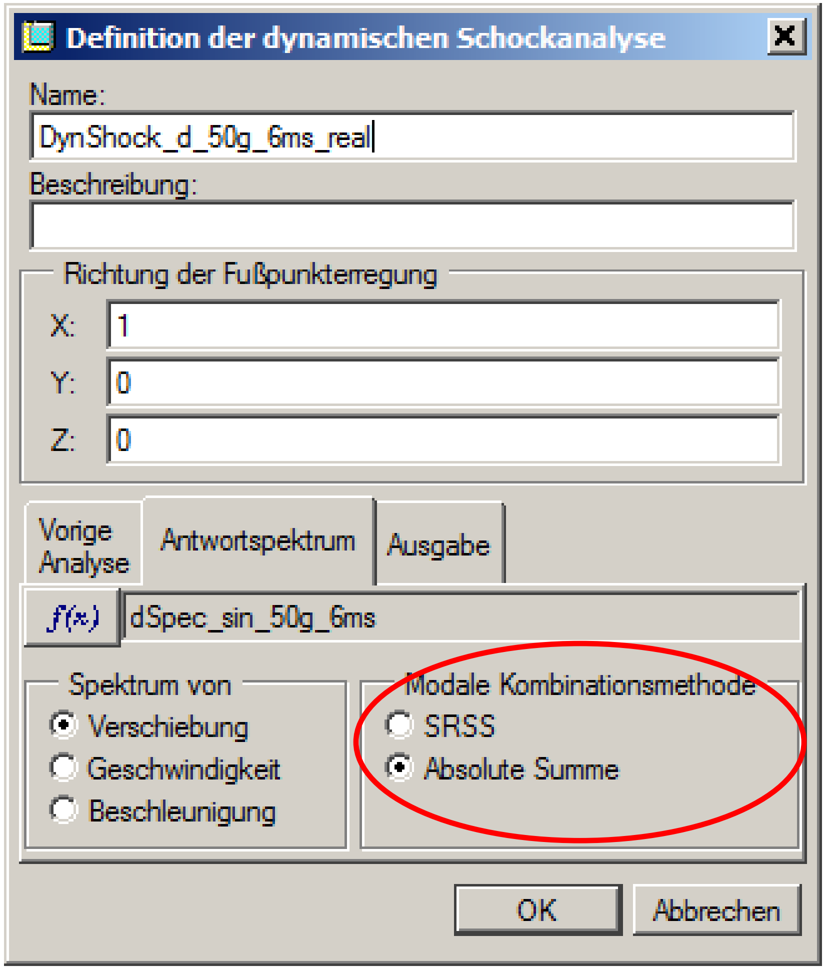
- Die dynamischen Antworten eines elastischen Systems lassen sich als Linearkombinationen ihrer Eigenschwingungsformen (Eigenmoden) darstellen
- Diese Linearkombinationen werden nun bei der dynamischen Stoßanalyse, da bei der Erzeugung des Antwortspektrums die Zeit des Antwortmaximums verlorengegangen ist, sehr „pragmatisch" erzeugt:
  - Man liest dazu die zur jeweiligen Eigenfrequenz f_i gehörende maximale Schockantwort auf die gegebene Erregung aus dem Antwortspektrum ab und errechnet damit (sowie dem Massenpartizipationsfaktor) den Beitrag des zugehörigen Modes i auf die Gesamtantwort der Struktur



Modale Superpositionsmethode (3)

- Anschließend werden die so gewichteten Eigenmoden nach verschiedenen Verfahren überlagert (siehe auch [1]), z.B.:
  - Absolute Summe
    (wird allgemein als konservativ angesehen)
  - Geometrisches Mittel (Wurzel aus der Summe der Quadrate – „SRSS“)
    (wird oft als realistischer betrachtet, da die Maxima meist nicht zur gleichen Zeit auftreten)
  - Ersten Mode absolut, die anderen geometrisch; sowie weitere Verfahren
- Mechanica unterstützt die ersten beiden Verfahren

– Wegen dieser willkürlichen Annahmen kann das Ergebnis bei Mehrmassenschwingern immer nur eine Näherung sein!



Modale Superposition am Zweimassenschwinger (1)

- **Aufbau:**
  - Der gezeigte Zweimassenschwinger besteht aus zwei in Reihe geschalteten Einmassenschwingern mit je einem Gewicht von 1 kg und einer masselosen Stahlfeder mit K=304,3791 N/mm
  - Analytisch berechnen sich die beiden Eigenfrequenzen zu:

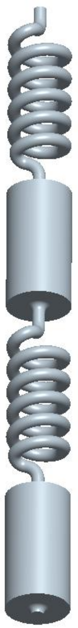
$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{k_1+k_2}{m_1}+\frac{k_2}{m_2}\right) \pm \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{k_1+k_2}{m_1}+\frac{k_2}{m_2}\right)^2 - \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2}}$$

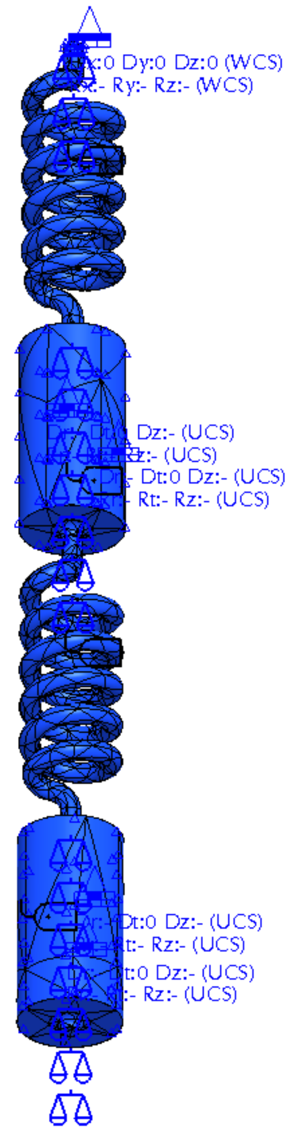
$$\omega_{1,2}^2 = \frac{3k}{2m} \pm \sqrt{\frac{5k^2}{4m^2}} = 456568{,}65 \pm 340306{,}18$$

$$\omega_1 = \sqrt{116262{,}47} = 340{,}973\ rad/s \Rightarrow f_1 = 54{,}27\,Hz$$

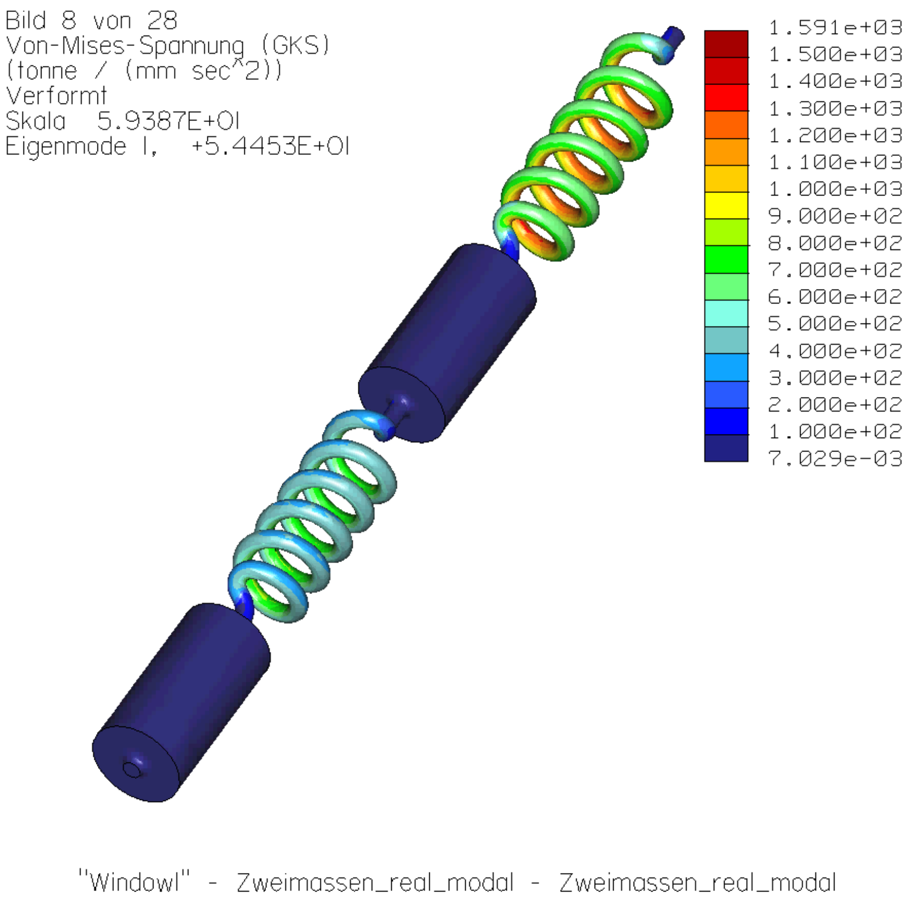
$$\omega_2 = \sqrt{796874{,}83} = 892{,}678\ rad/s \Rightarrow f_2 = 142{,}07\,Hz$$

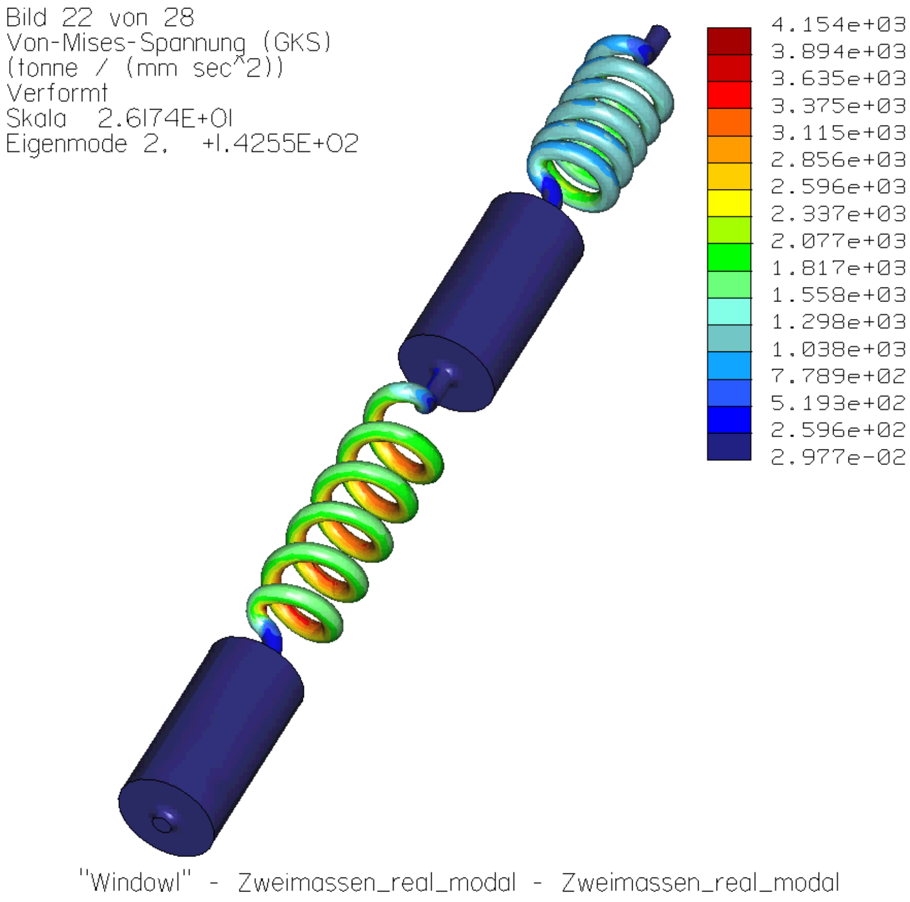
  - Wir wollen nachfolgend zunächst die exakte Halbsinus-Schockantwort im Zeitbereich bestimmen
  - Dann werden wir eine dynamische Stoßanalyse durchführen:
    Einmal mit absoluter und einmal mit geometrischer Aufsummierung der Eigenmodenantworten





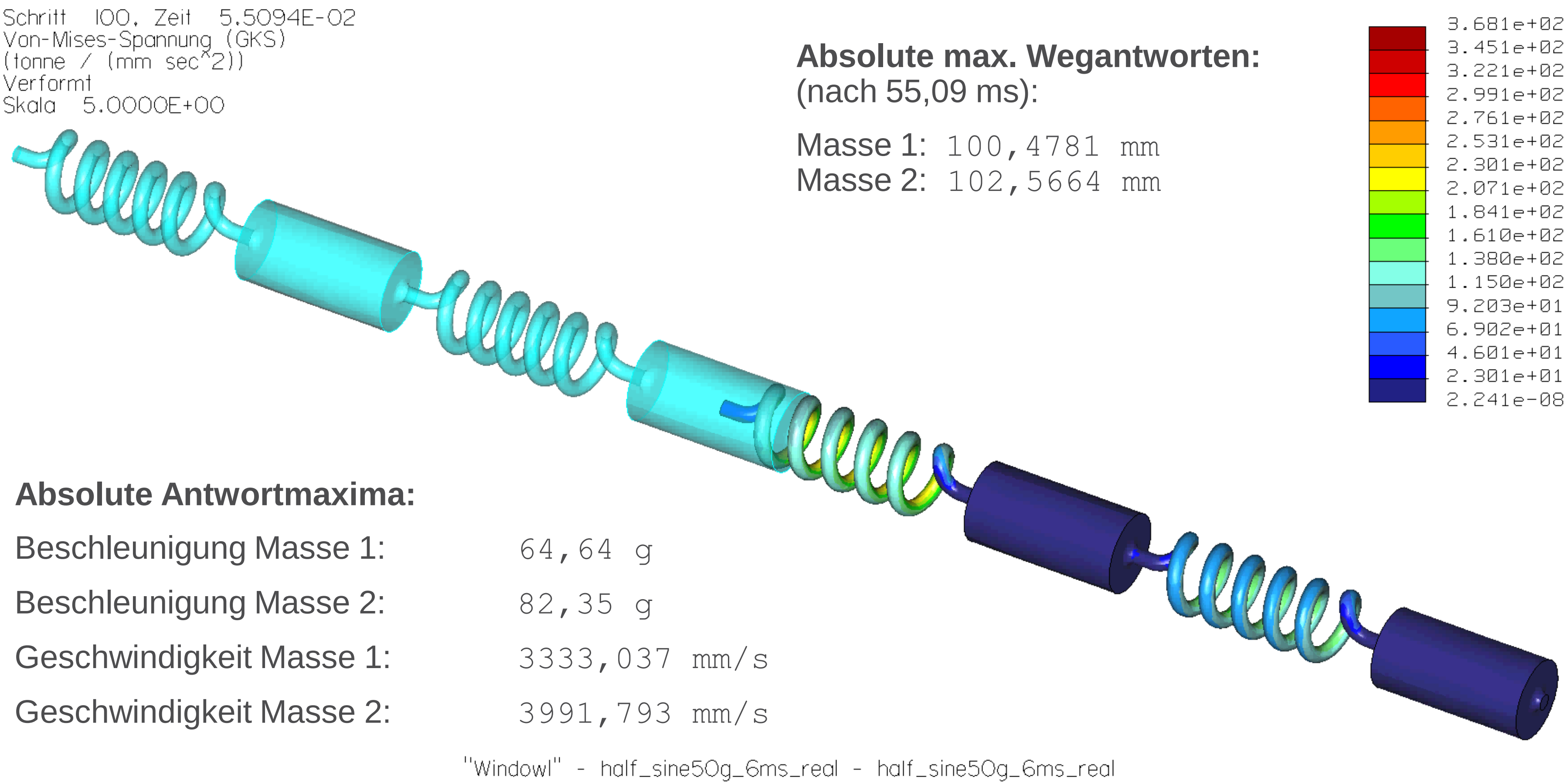
- Ergebnis der Modalanalyse im Single Pass: $f_1 = 54{,}45$ Hz, $f_2 = 142{,}55$ Hz
  - Dargestellt: Modale Spannungen beider Eigenformen





PTC®

- Ergebnis der dynamischen Zeitanalyse (Halbsinus 50 g, 6 ms)
  - Von Mises Spannung, Verschiebung absolut, 5 x überhöht (3 x T_1 = 55,09 ms)



Absolute max. Wegantworten:
(nach 55,09 ms):

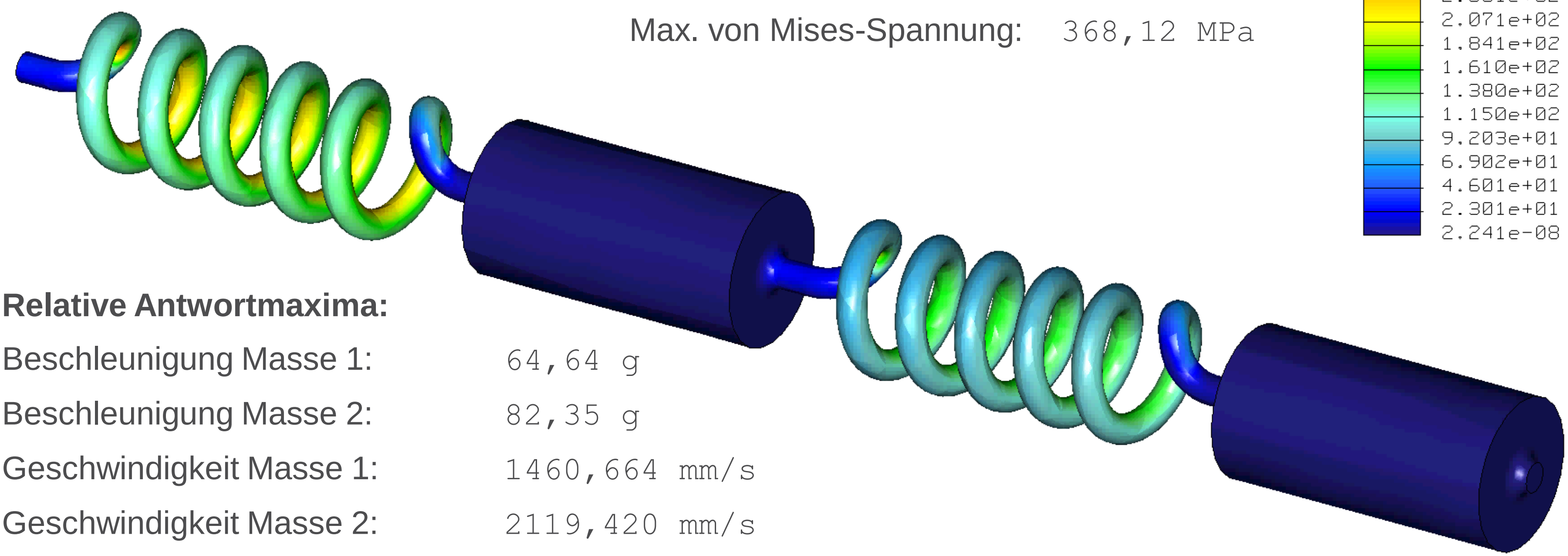
Masse 1: 100,4781 mm
Masse 2: 102,5664 mm

Absolute Antwortmaxima:

Beschleunigung Masse 1:	64,64 g
Beschleunigung Masse 2:	82,35 g
Geschwindigkeit Masse 1:	3333,037 mm/s
Geschwindigkeit Masse 2:	3991,793 mm/s

Modale Superposition am Zweimassenschwinger (4)

- **Ergebnis der dynamischen Zeitanalyse (Halbsinus 50 g, 6 ms)**
  - Von Mises Spannung, Verschiebung relativ zum Fußpunkt, 5 x überhöht



Relative max. Wegantworten::

Masse 1:	3,845505 mm
Masse 2:	5,948192 mm
Max. von Mises-Spannung:	368,12 MPa

Relative Antwortmaxima:

Beschleunigung Masse 1:	64,64 g
Beschleunigung Masse 2:	82,35 g
Geschwindigkeit Masse 1:	1460,664 mm/s
Geschwindigkeit Masse 2:	2119,420 mm/s

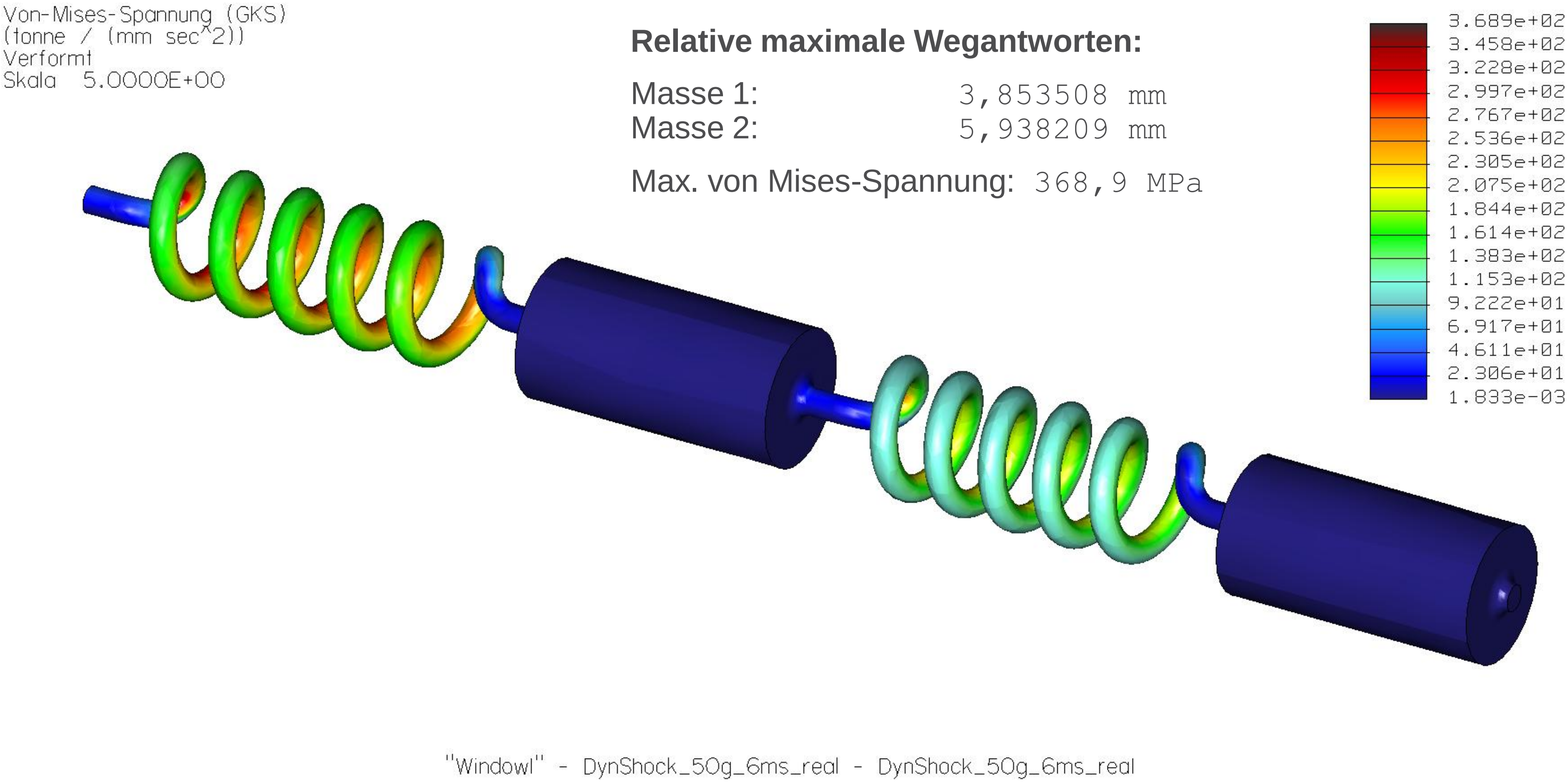
Modale Superposition am Zweimassenschwinger (5)

- Ergebnis der dynamischen Stoßanalyse (Halbsinus 50 g, 6 ms)
  - Von Mises Spannung, absolute Modensumme, 5 x überhöht

Relative maximale Wegantworten:

Masse 1: 3,853508 mm
Masse 2: 5,938209 mm

Max. von Mises-Spannung: 368,9 MPa



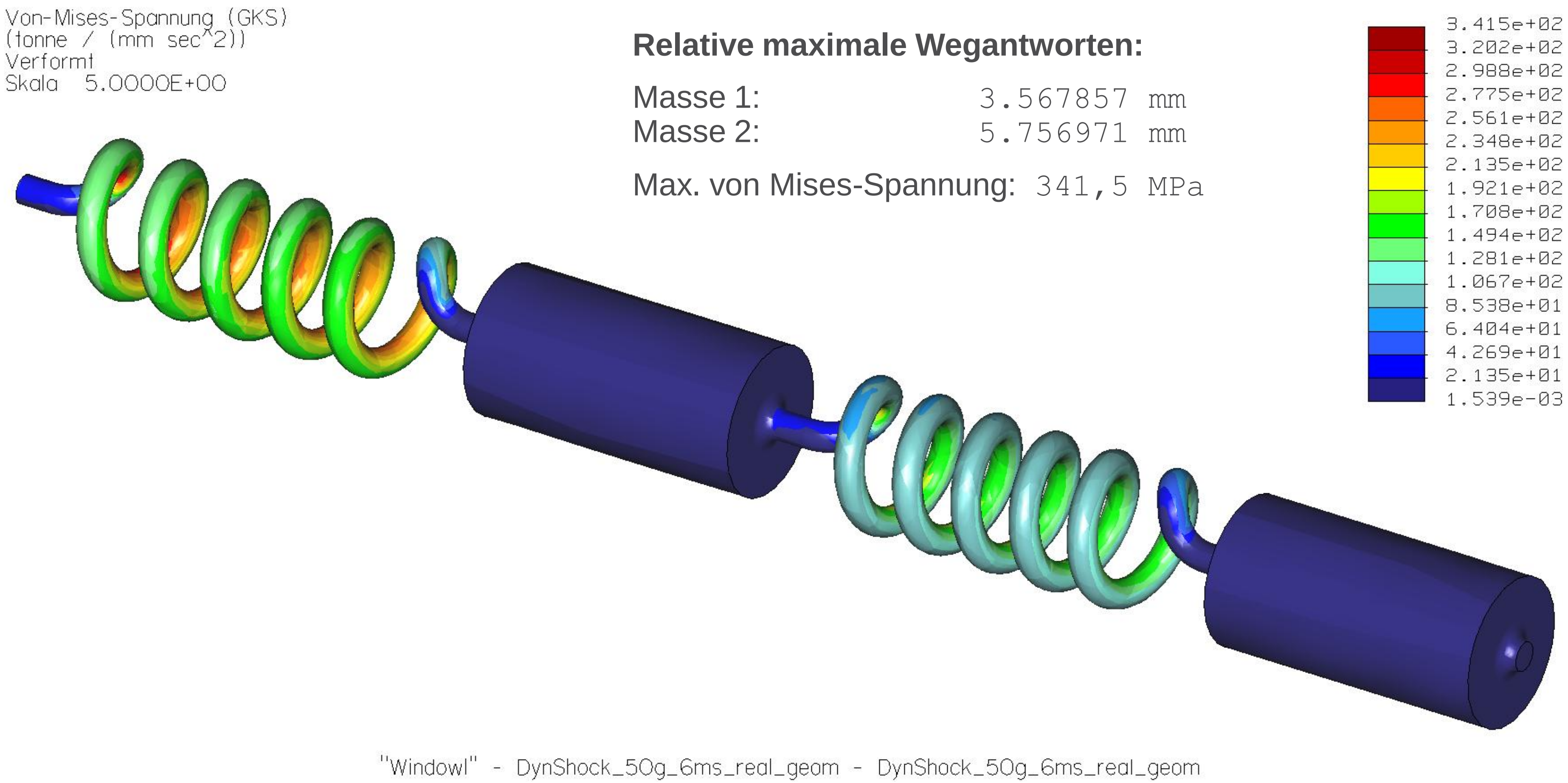
Modale Superposition am Zweimassenschwinger (6)

- Ergebnis der dynamischen Stoßanalyse (Halbsinus 50 g, 6 ms)
  - Von Mises Spannung, SRSS, 5 x überhöht

Relative maximale Wegantworten:

Masse 1: 3.567857 mm
Masse 2: 5.756971 mm

Max. von Mises-Spannung: 341,5 MPa



Modale Superposition am Zweimassenschwinger (7)

- Ressourcenvergleich:
  - Dynamische Stoßanalyse:

```
Gesamtrechendauer    (Sekunden): 12.71
Gesamt-CPU-Zeit      (Sekunden): 12.21
Ergebnisverzeichnisgröße (kilobytes): 22271 (22 MB)
```

  - Dynamische Zeitanalyse:
    (100 Einzelbilder, 3 Messgrößenintervalle, Plotting Grid 4):

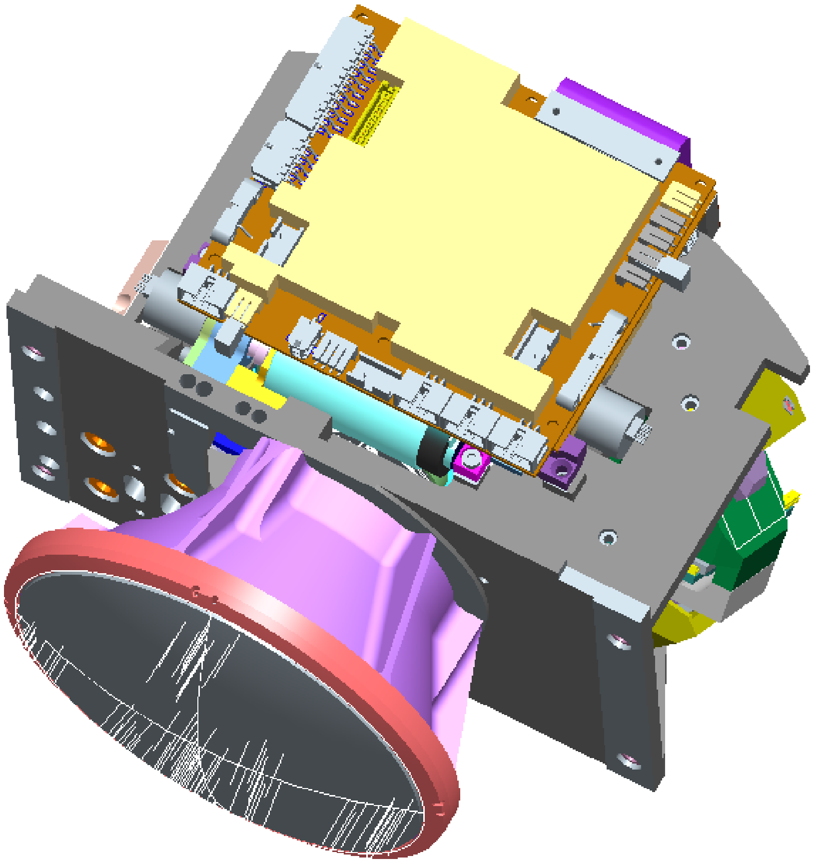
```
Gesamtrechendauer (Sekunden): 655.14
Gesamt-CPU-Zeit      (Sekunden): 604.35
Ergebnisverzeichnisgröße (kilobytes): 1191625 (1,2 GB)
```

  - D.h., die Stoßanalyse ist ca. 50 x schneller und benötigt über 50 x weniger Ergebnisverzeichnisspeicherplatz!

Anwendungsbeispiel: Zeiss Wärmebildgerät ATTICA (1)

- Entwurf einer neuen Variante für die Wärmebildgeräteserie ATTICA
  - Entwickler & Hersteller:
    Carl Zeiss Optronics GmbH, Oberkochen
  - Geeignet für grenzsichernde und militärische Anwendungen (Luft-, Land- oder seegestützt)
  - Sehr kompakt, eigenständig einsetzbar oder in Systeme integrierbar (z.B. im Periskop des Bundeswehr-Schützenpanzers Puma)
  - Auflösung von bis zu 1280 x 1024 Bildpunkten (SXGA) mit gekühlten Flächendetektoren
  - Bereits zahlreiche Varianten verfügbar (→www.zeiss.de)

We make it visible.




ATTICA K

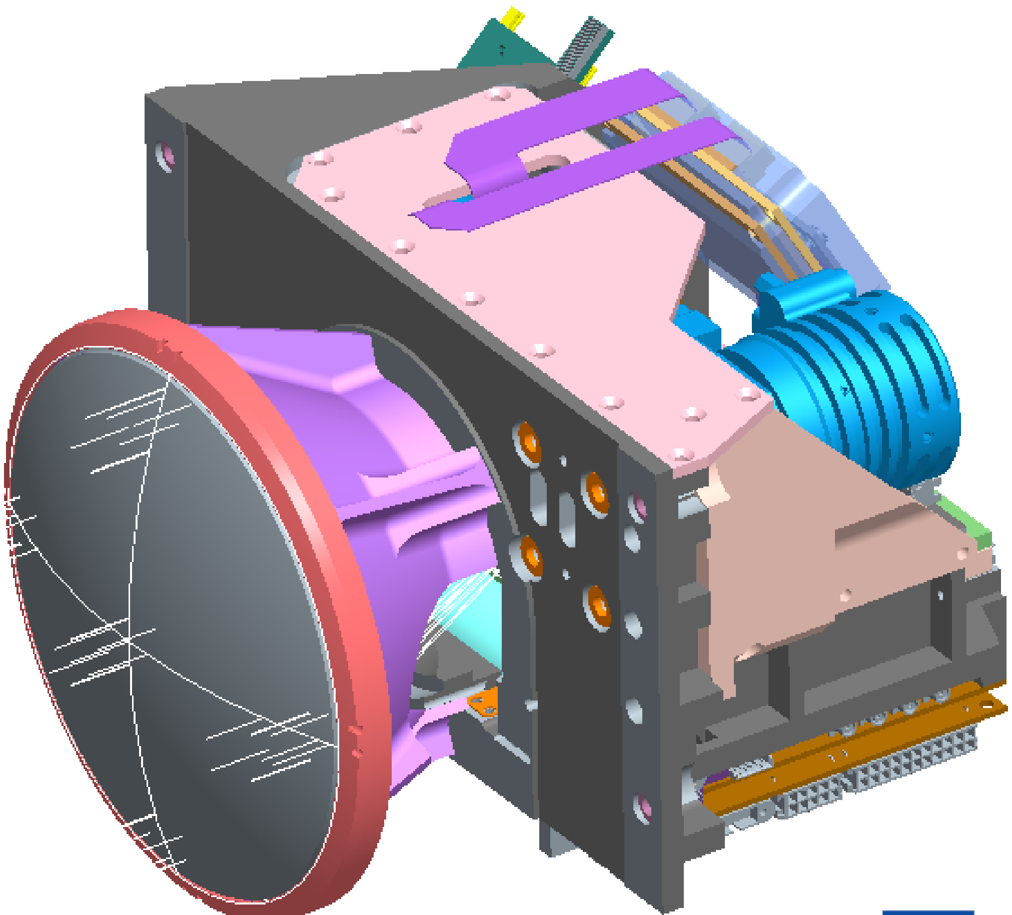

ATTICA P


ATTICA Z

Anwendungsbeispiel: Zeiss Wärmebildgerät ATTICA (2)

PTC®

- Zu untersuchendes Problem:
  - Für solche Geräte sind sehr breite Anwendungstemperatur-Einsatzbereiche gefordert ($\Delta T>100$ °C)
  - Der Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe kann dann zu thermischen Verzügen führen, die über geeignete mechanische Ausgleichselemente kompensiert werden müssen
  - Es muss daher die Schockfestigkeit für verschiedene Anwendungen mit zahlreichen unterschiedlichen Halbsinus-Schockdauern und Amplituden nachgewiesen werden

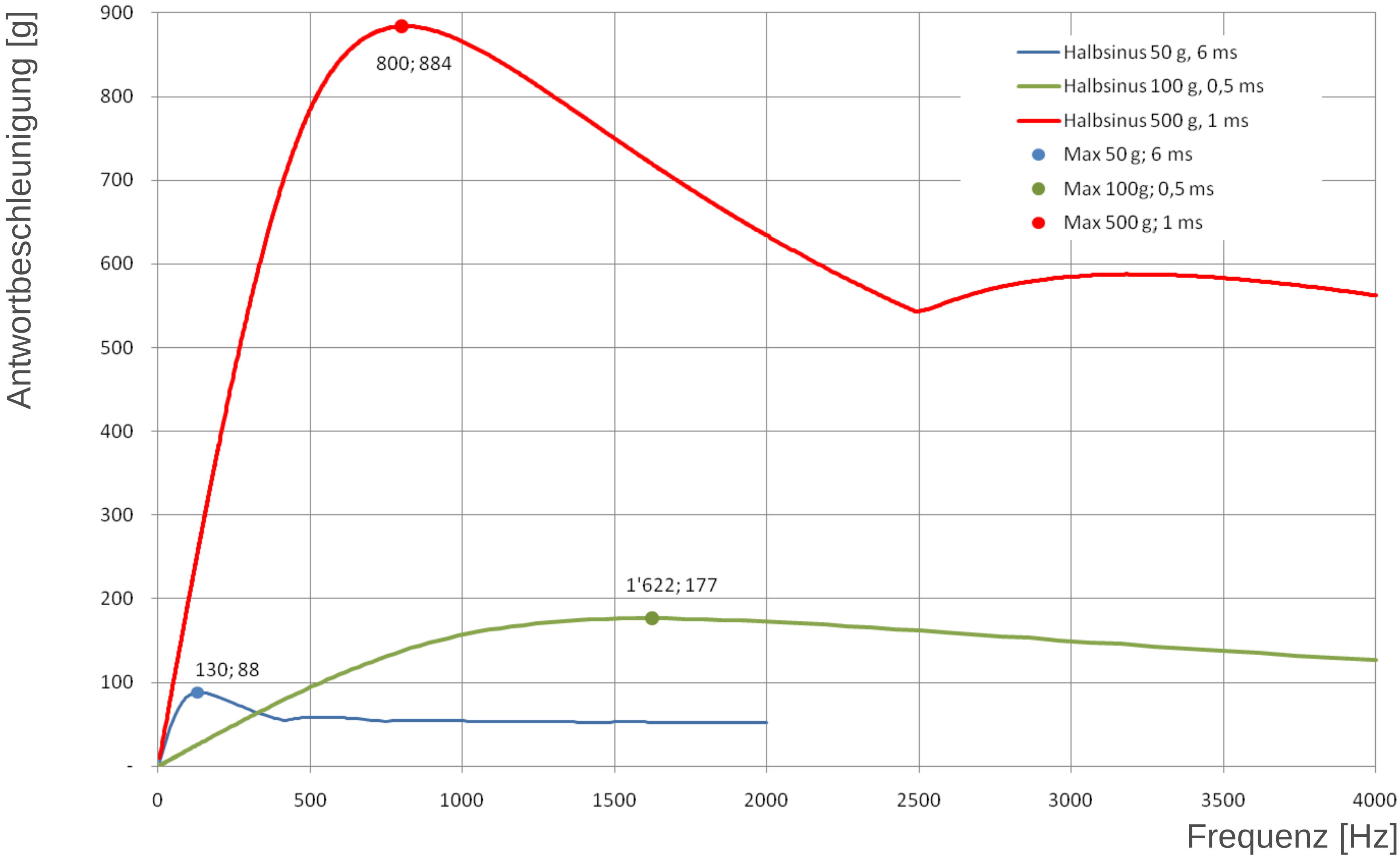


ZEISS

Geforderte Schockfestigkeiten

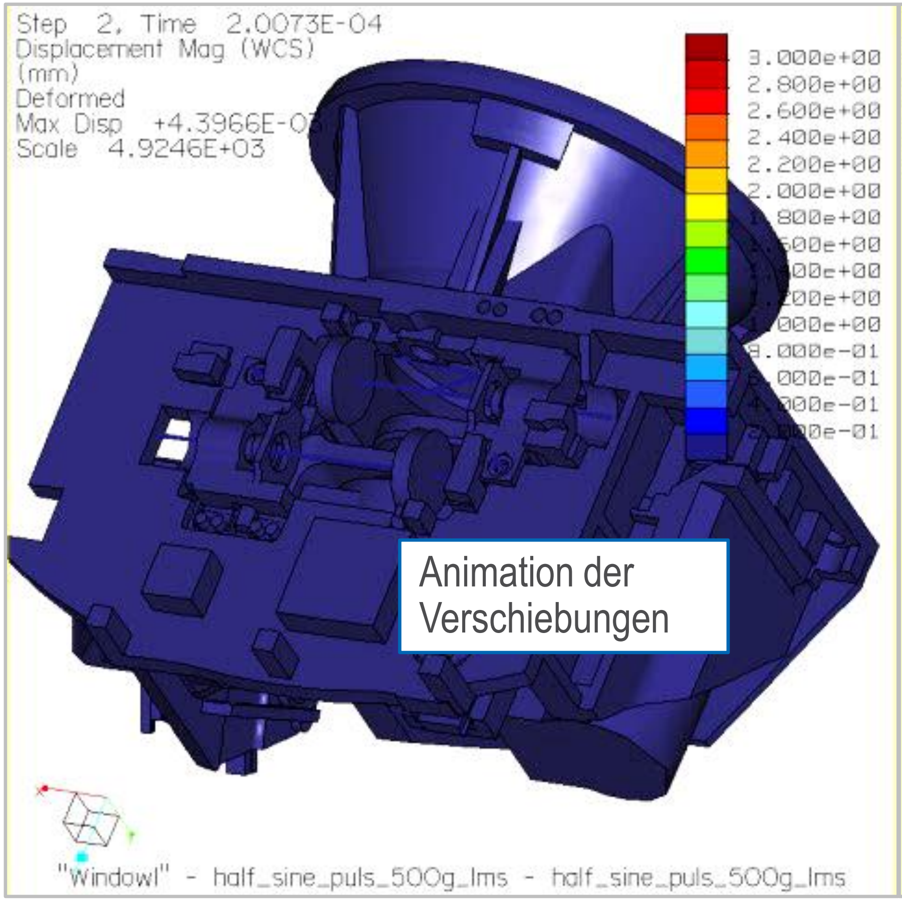
- Drei unterschiedliche Halbsinus-Schockvorgaben:
  - 50 g, 6 ms | 100 g, 0,5 ms | 500 g, 1 ms (je nach Anwendung)
- Nachweis:
  - In jeder Hauptachse (X-, Y-, Z) in positiver und negativer Richtung
  - Für jeweils 4 verschiedene Positionen des optischen Systems durchzuführen (Variator, Kompensator, Vergrößerungswechsler)
  - Ergibt theoretisch 3x3x2x4=72 Tests bzw. dynamische Zeitanalysen
  - Daher zusätzliche Überlegungen zur Reduktion des Aufwandes notwendig
- Vorgehen in der Simulation:
  - Ableiten der Schockspektren für alle drei Halbsinusschocks (konservativ ohne Dämpfung) und Identifizierung des kritischen Spektrums
  - Exemplarische Berechnung im Zeitbereich zur Abschätzung der geeigneten modalen Superpositionsmethode
  - Dann schnelle Schockanalysen nur für kritische Konfigurationen durchführen

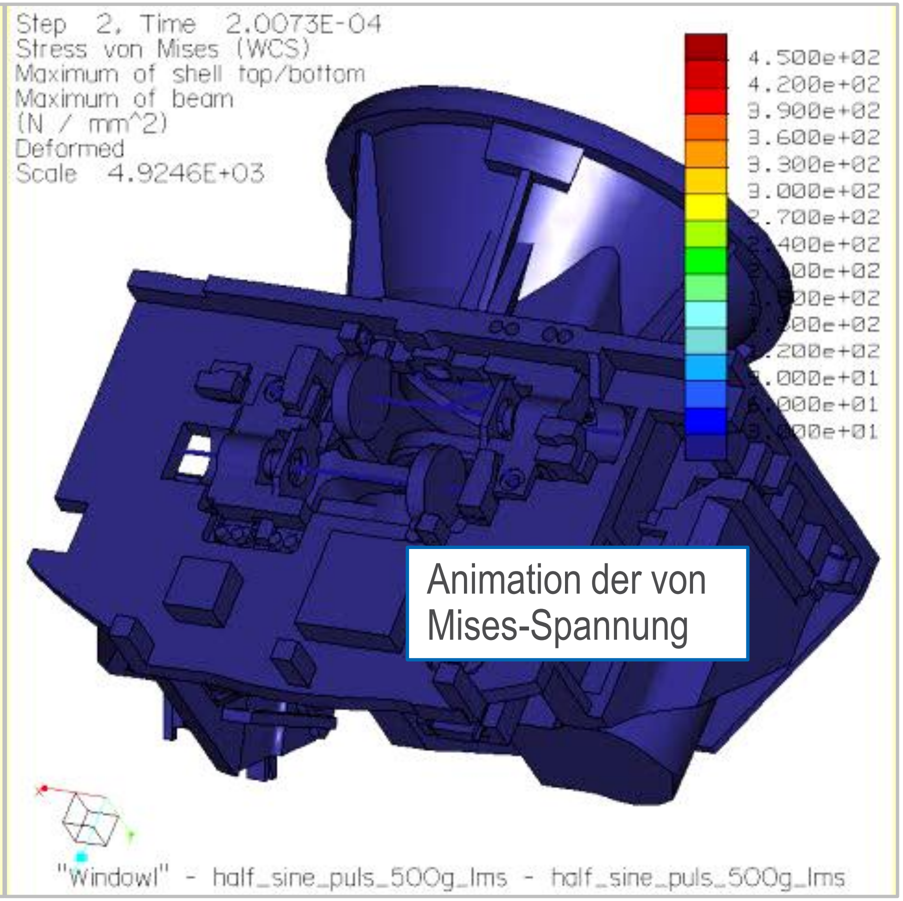
Abgeleitete Schockspektren



Dynamische Zeitanalyse zur exakten Antwortbestimmung

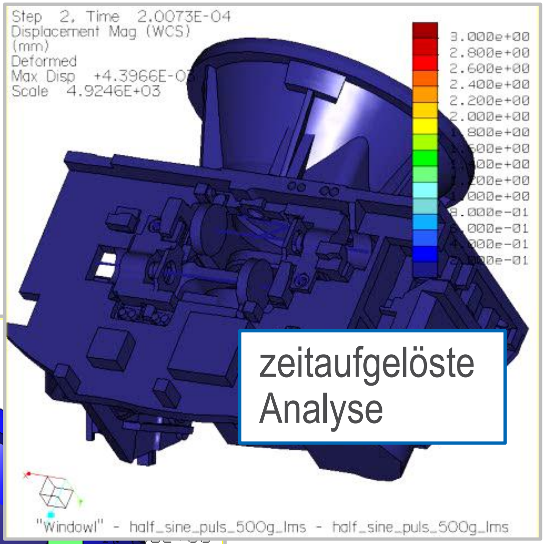
- Anregung: Halbsinusschock 500 g / 1 ms in Y-Richtung, 10 ms Filmdauer

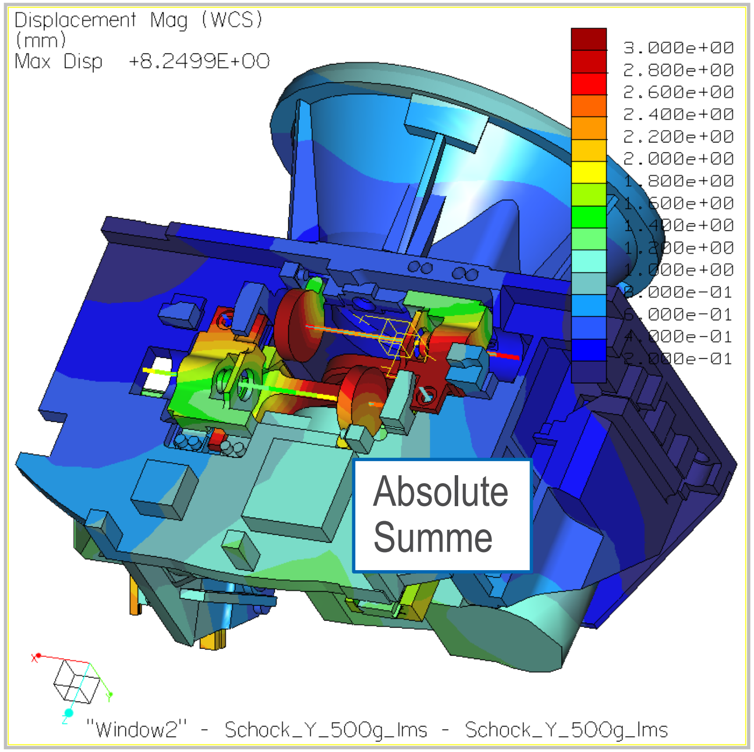


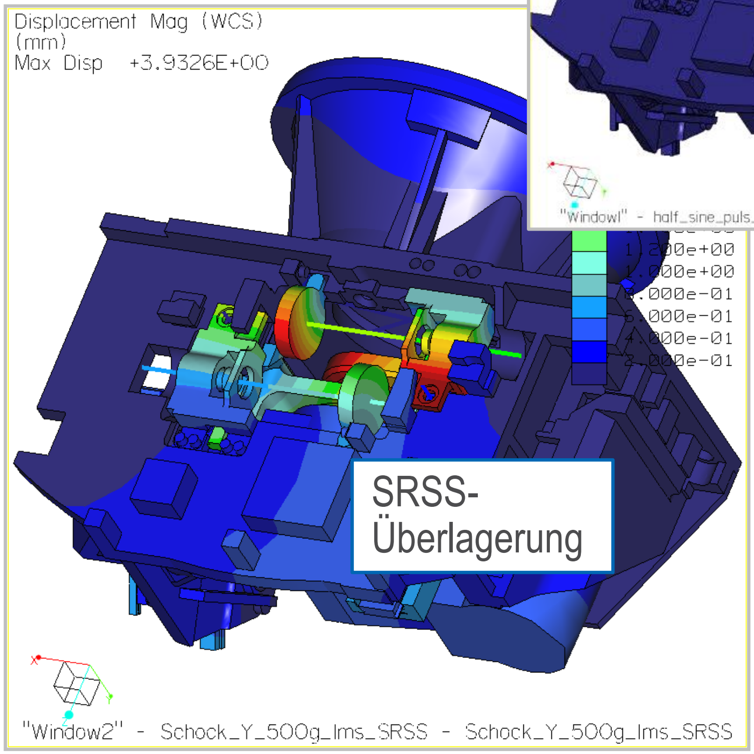


Verschiebungen – zeitaufgelöst sowie SRSS/absolute Summe

- Vergleich der maximalen Verschiebungen
  - Zeitaufgelöst: 4,53 mm
  - Absolute Summe: 8,25 mm / SRSS: 3,93 mm



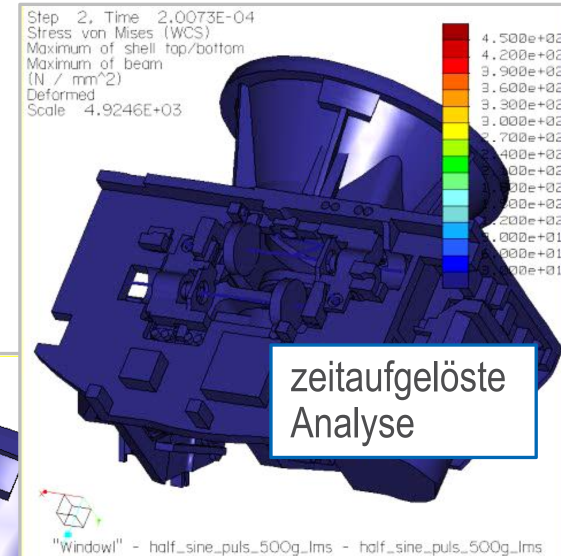


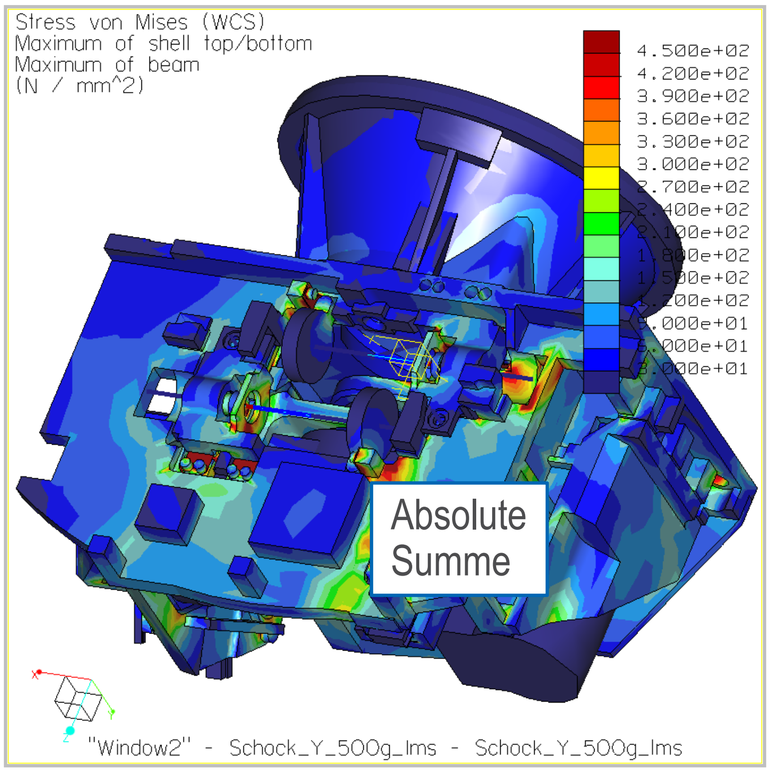


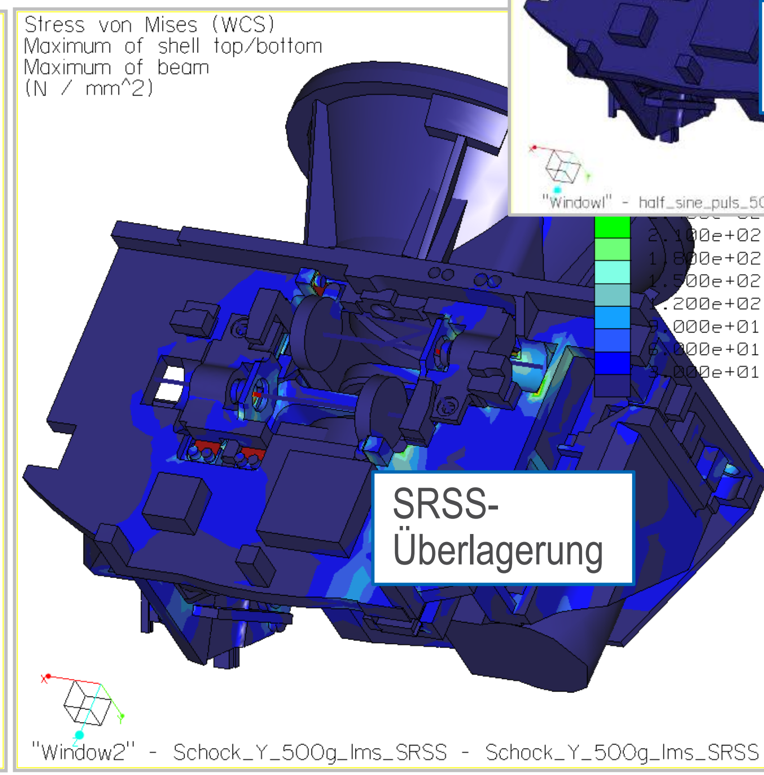
Von Mises Spannung – zeitaufgelöst sowie SRSS/absolute Summe

PTC®

- Vergleich der maximalen von Mises Spannungen
  - Zeitaufgelöstes Spannungsmaximum: 10,16 GPa
  - Absolute Summe: 19,08 GPa / SRSS: 7,43 GPa







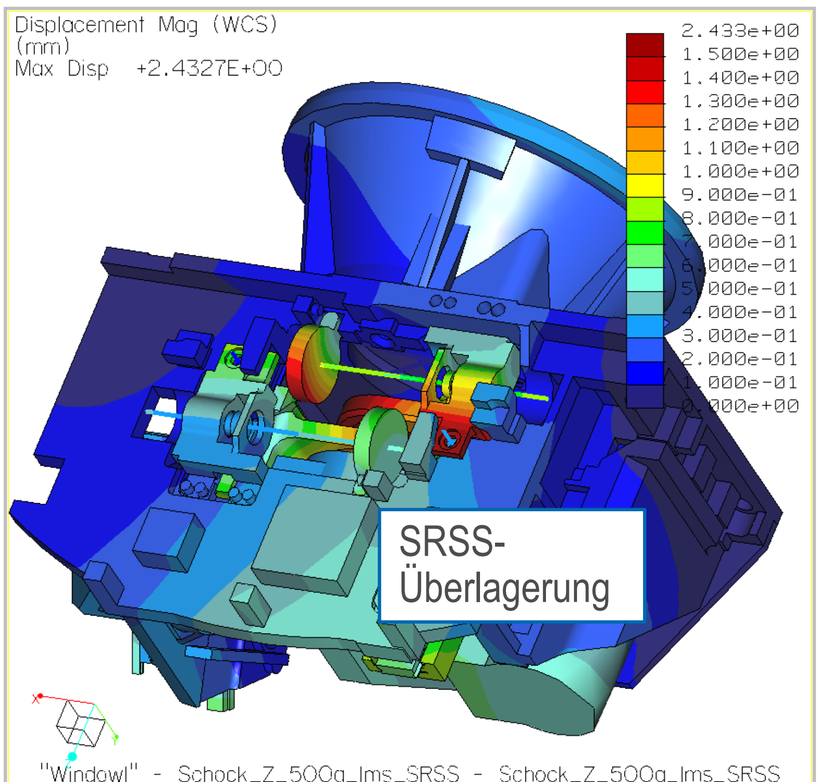
Hinweis: Werte/Orte der Maxima singulär!

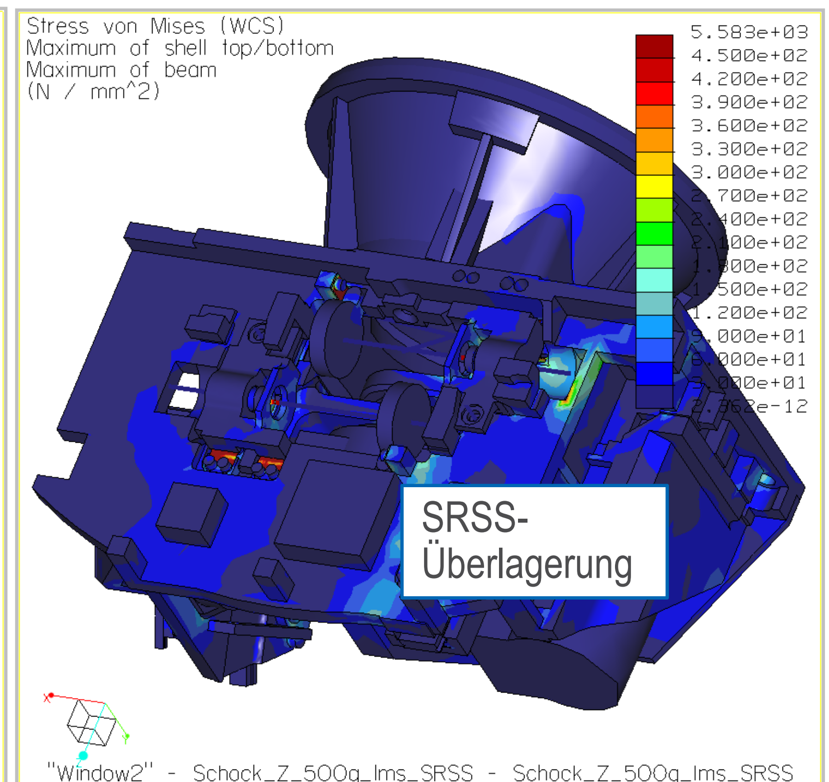
Ergebnisvergleich Schockanalyse – dynamische Zeitanalyse

- Schlussfolgerungen:
  - Für diese Anwendung liefert die dynamische Stoßanalyse bei SRSS-Modenüberlagerung eine brauchbare Annäherung an das tatsächliche Verhalten im Zeitbereich (lediglich geringfügig nicht-konservativ)
  - Die absolute Summe liefert erwartungsgemäß sehr stark konservative Ergebnisse
  - Weitere Nachweise wurden daher nach dem SRSS-Verfahren durchgeführt

- Ressourcenbedarf:
  - Dynamische Zeitanalyse:
    Ergebnis-Datenmenge 4,44 GB, Rechendauer 1,5 h, Arbeitsspeicherbedarf 4,1 GB
  - Stoßanalyse:
    Ergebnis-Datenmenge 159 MB, Rechendauer <11 min, Arbeitsspeicherbedarf 6,0 GB
  - Hinweis:
    Durch Beschränkung des Plotrasters auf 2, zahlreiche Idealisierungen und eine einfache Modalanalyse im Single Pass wurde die Rechendauer bei Reduktion der Rechengenauigkeit minimiert. Die gegebenen Zeiten/Ressourcenangaben stellen daher für eine solche Struktur Mimimalwerte dar!

- Z-Schockanregung: 500 g, 1 ms
  - Auch hier werden Teilbereiche der Struktur stark beansprucht, aber geringer als beim Y-Schock
  - Diese Erkenntnisse führten zu einem Redesign der bzgl. Schockbeanspruchung kritischen Orte gleich im Entwurfsstadium, ohne einen Prototypen bauen zu müssen

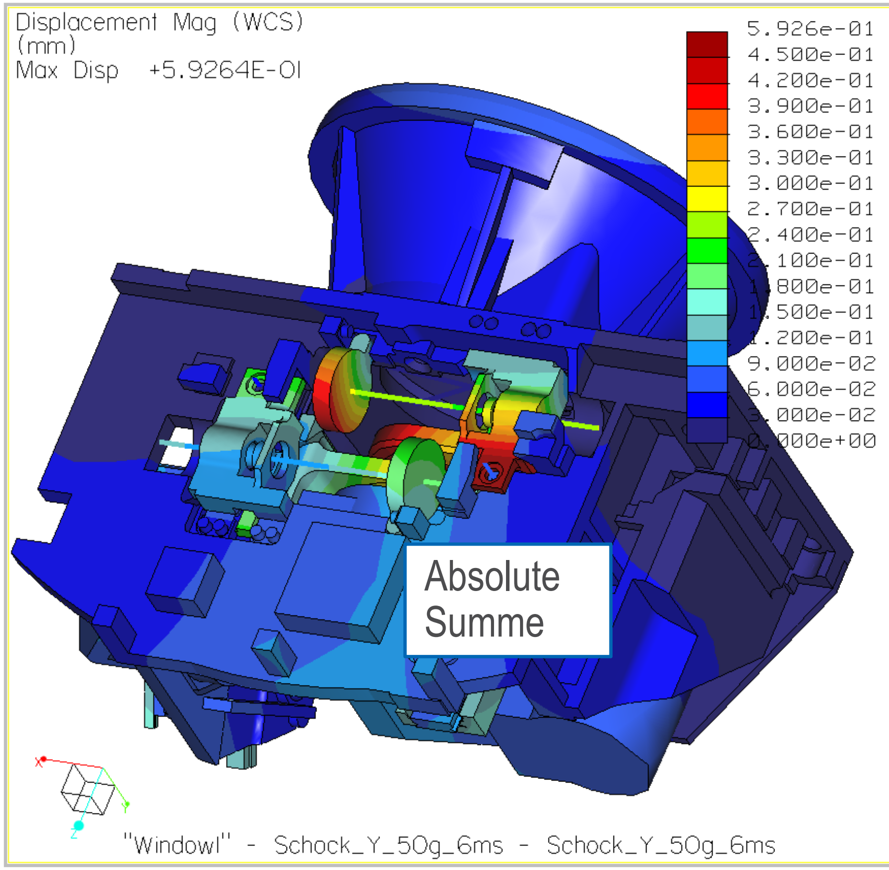




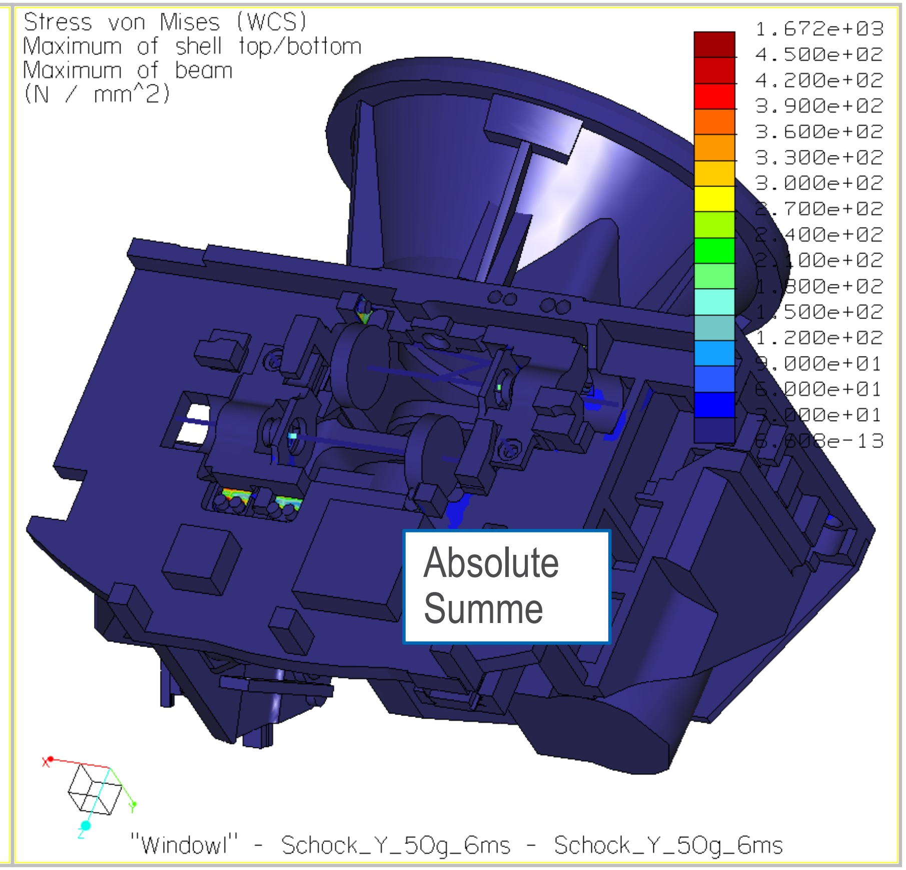
PTC

- Y-Schockanregung: 50 g, 6 ms
  - Völlig unkritisch (siehe Folie 45!), selbst bei absoluter Modenüberlagerung:

Verschiebung



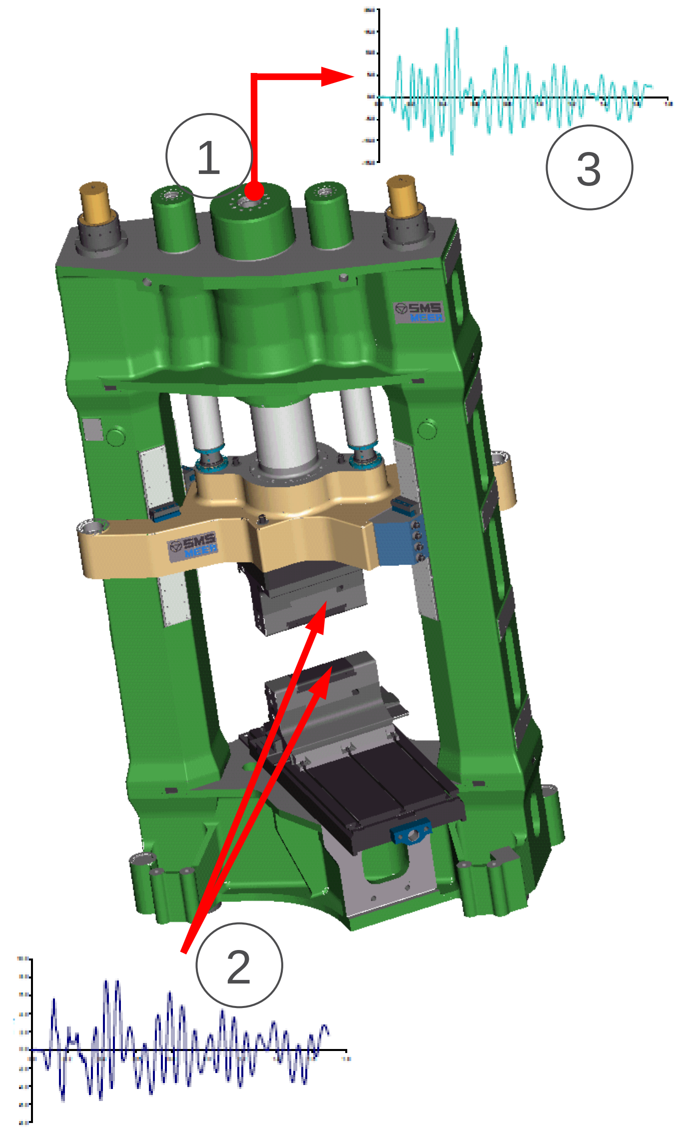
Von Mises Spannung



Erzeugung von Antwortspektren für die Substrukturauslegung (1)

- Weitere Anwendung:
  - Es sollen Substrukturen, z.B. von Unter-auftragnehmern, dynamisch ausgelegt werden, die an verschiedenen Orten einer Hauptstruktur mit einer bekannten Anregung angebracht werden sollen
  - Vorgehen:

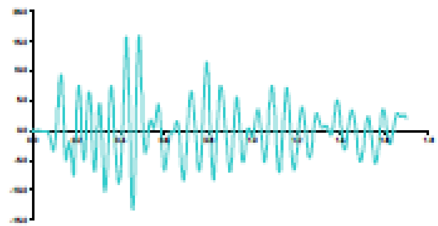
1. Hauptstruktur als Simulationsmodell aufbauen und Antwortmessgröße an der Stelle erzeugen, an der die Substruktur befestigt werden soll
2. In dynamischer Zeitanalyse Hauptstruktur so anregen, wie es später im Betrieb stattfinden soll (mittels Kraft- oder Fusspunkterregung)
3. Schrieb der Antwortmessgröße (i.A. wird das die Absolutbeschleunigung sein) aus dem Postprocessor als Funktion der Zeit herausschreiben (z.B. als EXCEL-Datei)



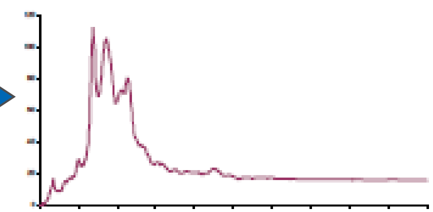
Erzeugung von Antwortspektren für die Substrukturauslegung (2)

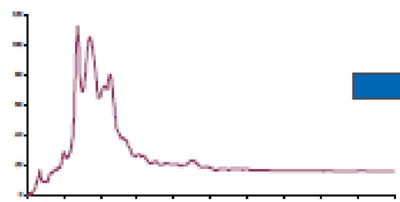
- Weitere Anwendung (cont‘d)
  - Vorgehen:

4. Nach den vorgestellten Verfahren aus diesem Zeitschrieb ein Schockspektrum generieren (Mathcad [4] oder Mechanica)
5. Substruktur diesem Schockspektrum in einer dynamischen Stoßanalyse aussetzen

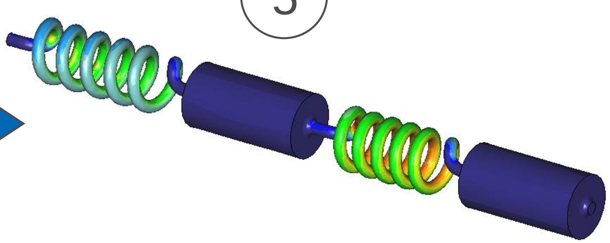


4





5

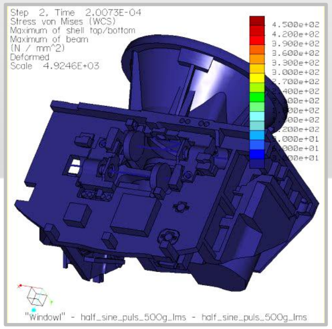


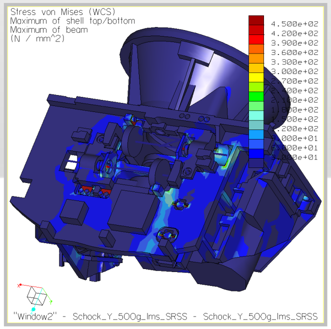
Erzeugung von Antwortspektren für die Substrukturauslegung (3)

- Einschränkung
  - Die Schockanalyse wird umso ungenauer, je größer die Rückwirkung des schwingenden Subsystems auf die erregende Basis ist
  - Beim Erdbeben wird i.A. Rückwirkungsfreiheit angenommen: Der Boden ist „unendlich schwer“ und kümmert sich nicht um das darauf stehende Hochhaus; ähnliches gilt z.B. für ein Motorsteuergerät, was am schweren, schwingenden Gussblock des Motors befestigt ist
  - Bei anderen technischen Anwendungen (z.B. Raketenoberstufe befestigt auf der Zentralstufe) ist diese Annahme dagegen sicher nicht mehr gut erfüllt
    (gem. [1] ist die Annahme der Rückwirkungsfreiheit aber immerhin konservativ)

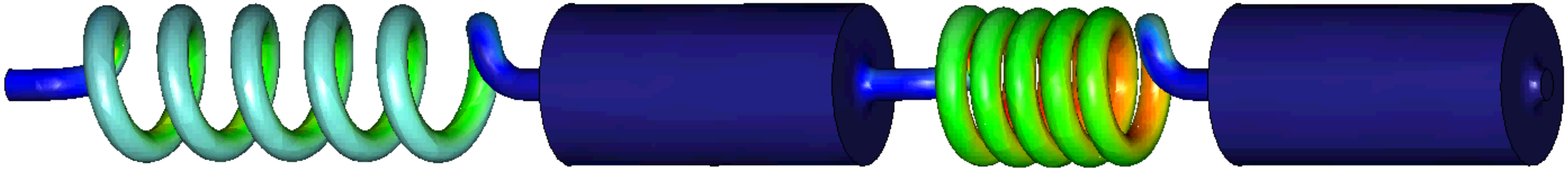
- Abschließende Anmerkungen
  - Das Verfahren wird gelegentlich als überholt betrachtet, eine genauere zeitaufgelöste Analyse sei in Betracht der heutigen Rechnerleistungen vorzuziehen
  - Unbestritten sind jedoch immer noch die großen Vorteile des Verfahrens in Bezug auf Ressourcenbedarf und Rechengeschwindigkeit, also um sich schnell einen Überblick zu verschaffen!

the product development company





Thank You



Anhang

Modale effektive Masse

- ## Ein Tipp zum Schluss:
  - In Mechanica lässt sich mit der dyn. Stoßanalyse die sog. modale effektive Masse eines Eigenmodes besonders schnell bestimmen, beispielsweise für den gezeigten Zweimassenschwinger:

Mode	frequency	part. factor	eff. mass	tot. mass
1	5.445276e+01	4.351645e-02	94.7%	94.7%
2	1.425516e+02	1.027535e-02	5.3%	100.0%

Die Summe der Quadrate aller Partizipationsfaktoren ergibt die absolute Gesamtmasse der Struktur (hier 0,002 t = 2 kg)

- ## Hintergrundinfo:
  - Die modale effektive Masse $m_{i,eff}$ ergibt, multipliziert mit der Fußpunktbeschleunigung a, den Anteil des i-ten Modes an der Fußpunktreaktionskraft; diese Masse ist abhängig von der Richtung, nicht aber der Höhe dieser Beschleunigung
  - Sie ist nur im Zusammenhang mit der Fußpunkterregung eines Systems von Bedeutung. Bei Krafterregungen gibt es denn auch keine solche Ausgabe in Mechanica!

Generalisierte und reduzierte Masse

PTC®

- Unterschied zw. effektiver und generalisierter/reduzierter Masse:
  - Die sog. „generalisierte Masse“ wird durch Gleichsetzen der kinetischen Energien (sowie gleicher max. Auslenkungen und Frequenzen) des realen und des idealisierten (generalisierten) Einmassensystems abgeleitet, nicht durch Gleichsetzen der Fußpunktreaktion wie bei der effektiven (modalen) Masse
  - Die generalisierte Masse ist ein Sonderfall der „reduzierten Masse“, bei der allgemein die Energiemethode angewand wird, um Mehrmassensysteme und systeme mit kontinuierlich verteilter Masse auf ein System mit nur einem Freiheitsgrad zurückzuführen. Voraussetzung ist, dass sich die Bewegung des Systems durch die Bewegung eines einzigen Punktes Beschreiben lässt
  - Beispielsweise ist die reduzierte Masse einer längsbeanspruchten Schraubenfeder ein Drittel ihrer Gesamtmasse. Ein Einmassenschwinger mit einer massebehafteten Schraubenfeder hat also eine Eigenfrequenz von:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{m_{Masse} + \frac{m_{Feder}}{3}}}$$

Diesen Anteil haben wir in den Beispielen immer vernachlässigt!

Literaturanregungen

PTC®

[1] **Shock Response Spectrum – A Primer**
J. Edward Alexander, BAE Systems, US Combat Systems Minneapolis, Minneapolis, Minnesota;
J. Sound & Vibration, June 2009
http://www.sandv.com/downloads/0906alex.pdf

[2] **An Introduction to the Shock Response Spectrum**
Tom Irvine; Rev. R, July 29, 2010; www.vibrationdata.com

[3] **Berechnung von Schockantwortspektren in Mathcad**
Dr. Wigand Rathman; Universität Erlangen-Nürnberg; 18. November 2010;
Vortrag zum 10. Simulationsanwendertreffen im Rahmen der PlanetPTC live; www.saxsim.de

[4] **Berechnung von Schockspektren für gemessene Anregungen**
Dr. Wigand Rathman; Universität Erlangen-Nürnberg; 18. April 2011;
Vortrag zum Mathcad-Workshop im Rahmen des 3. SAXSIM; www.saxsim.de

Informationen zum Vortragenden

PTC®

- Roland Jakel
  - Dipl.-Ing. allgemeiner Maschinenbau (TU Clausthal)
  - Dr.-Ing. über Gestaltung und Berechnung von Ingenieurkeramik (FEM-Berechnung mit Marc/Mentat)
  - 1996-2001 Tätigkeit als Entwicklungsingenieur bei der Dasa (Daimler-Benz Aerospace, Produktbereich Raumfahrt-Infrastruktur; heute EADS Astrium):
    - Struktursimulation (FEM-Berechnungen mit NASTRAN/PATRAN und Mechanica)
    - Projektmanagement-Funktionen für Teilsysteme der Ariane 5-Oberstufe ESC-A
  - Bei der DENC AG von 2001-2005 verantwortlich für Struktursimulation mit den PTC-Simulationsprodukten (Mechanica Structure & Motion, MDX, MDO, BMX)
  - Seit dem Kauf der DENC AG durch PTC im Jahr 2005 tätig als Principal Consultant für das Simulations-Dienstleistungsgeschäft in der Global Services Organization (GSO) von PTC