CES GRAUER GmbH
Creative Engineering Services

Lebensdauervorhersage für Shaker-Tests

Thomas Grauer

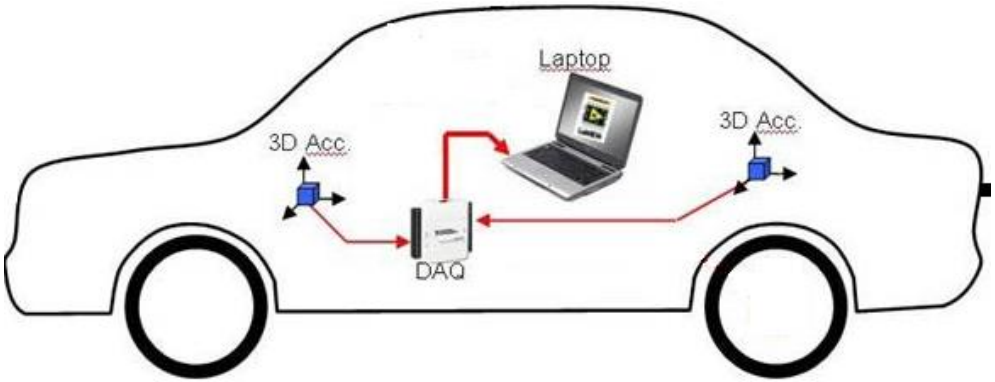
Inhalt

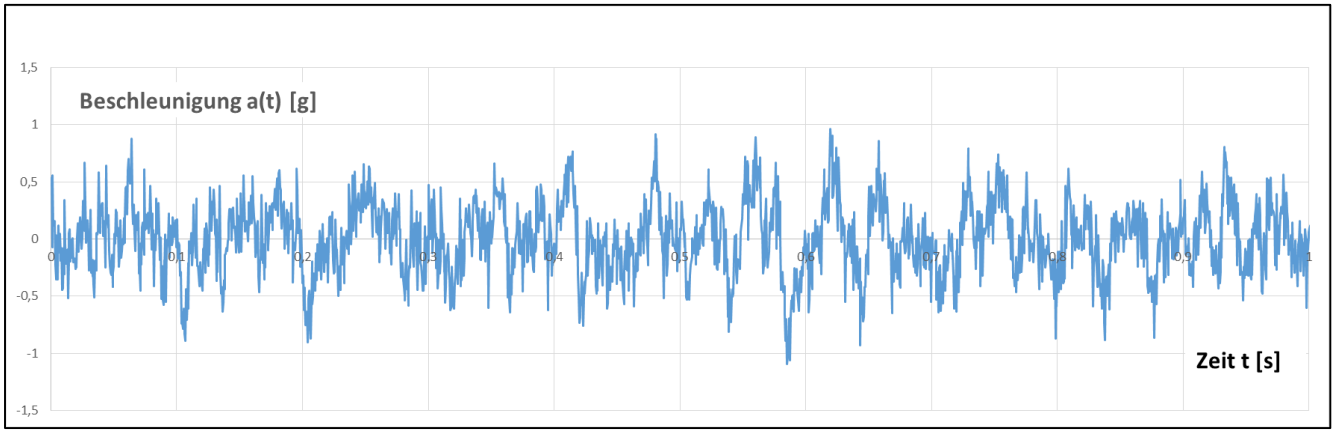
Materialermüdung und Betriebsfestigkeit	3
Betriebsfestigkeit schwingungsfähiger Systems	12
Shaker-Tests und Vorhersage mit Random Response-Analysen	17
Zusammenfassung und Ausblick	25

Materialermüdung und Betriebsfestigkeit

Rüttelfestigkeit und Materialermüdung

Beispiel Beschleunigungssignal bei Fahrversuch





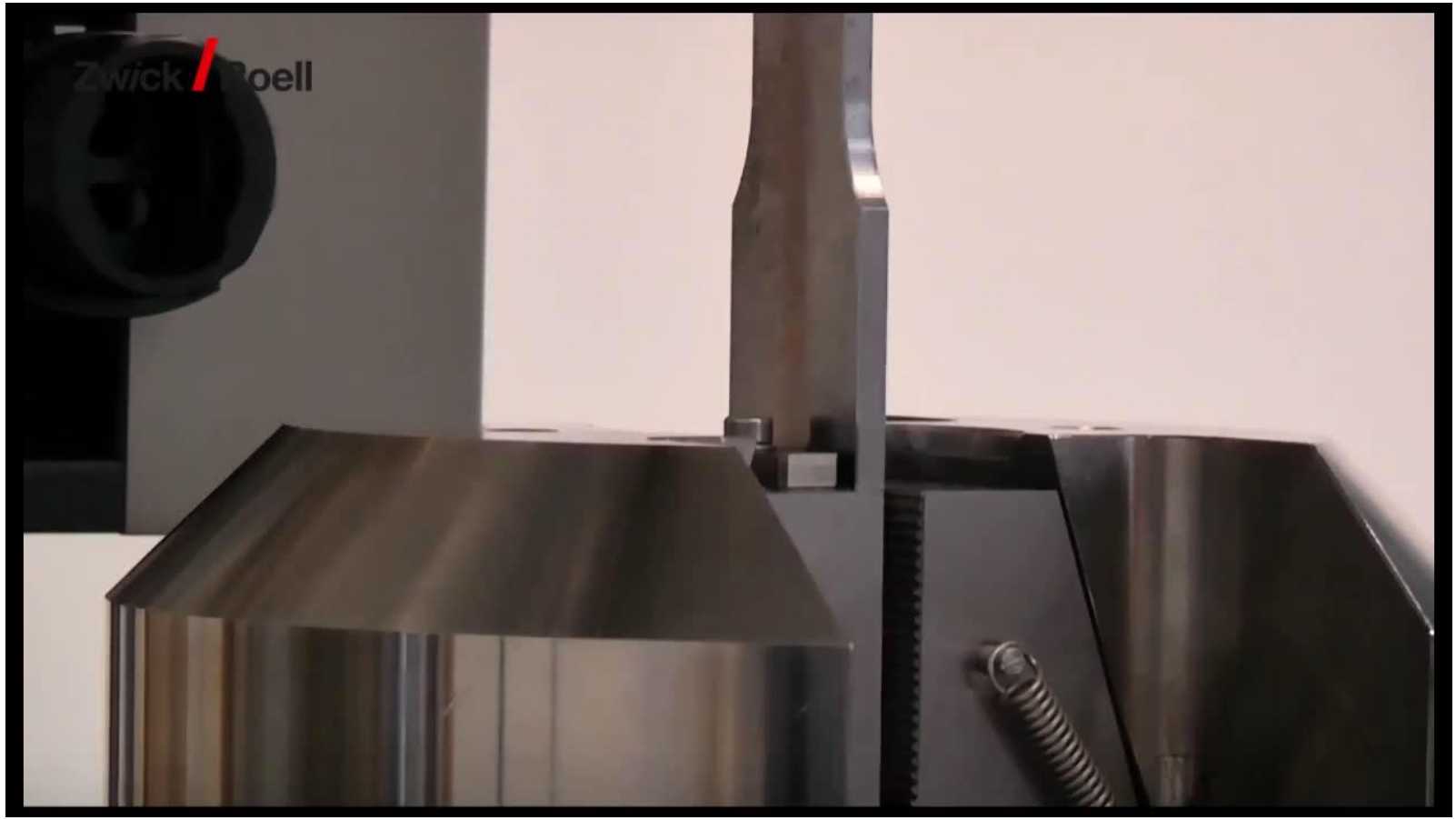
Materialermüdung und Lebensdauer

- Last einmalig aufgebracht: Bauteil hält.
- Dieselbe Last eine Million mal aufgebracht: Bauteil bricht.

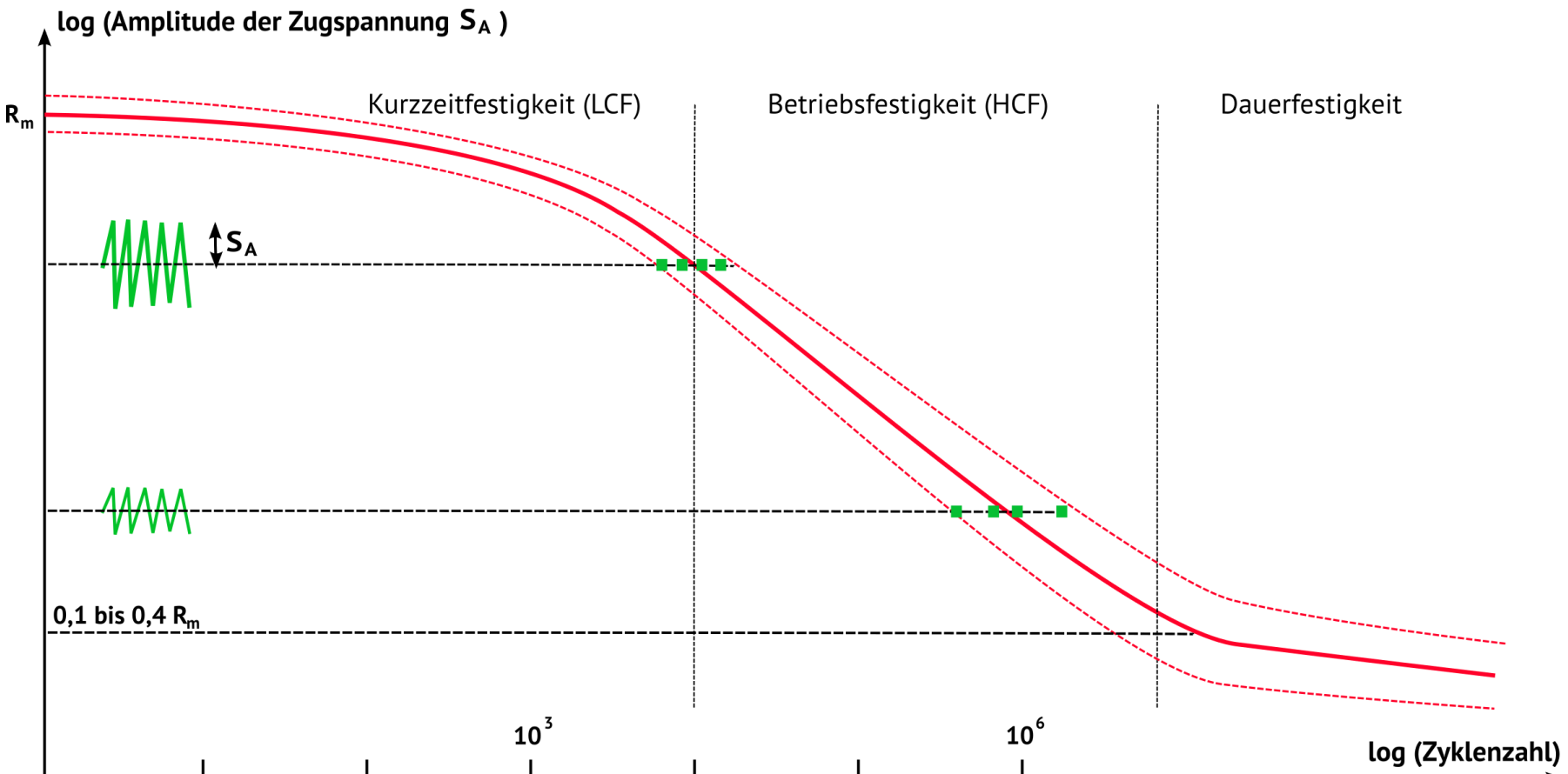
- Das Material **ermüdet** bei wechselnden Lasten durch mikroskopische Prozesse: **Fatigue**.
- Das Bauteil hat (trotz ständig gleich wiederholter Belastung) eine endliche **Lebensdauer**.

- Messung der Ermüdungsfestigkeit im **Wöhler-Versuch**.

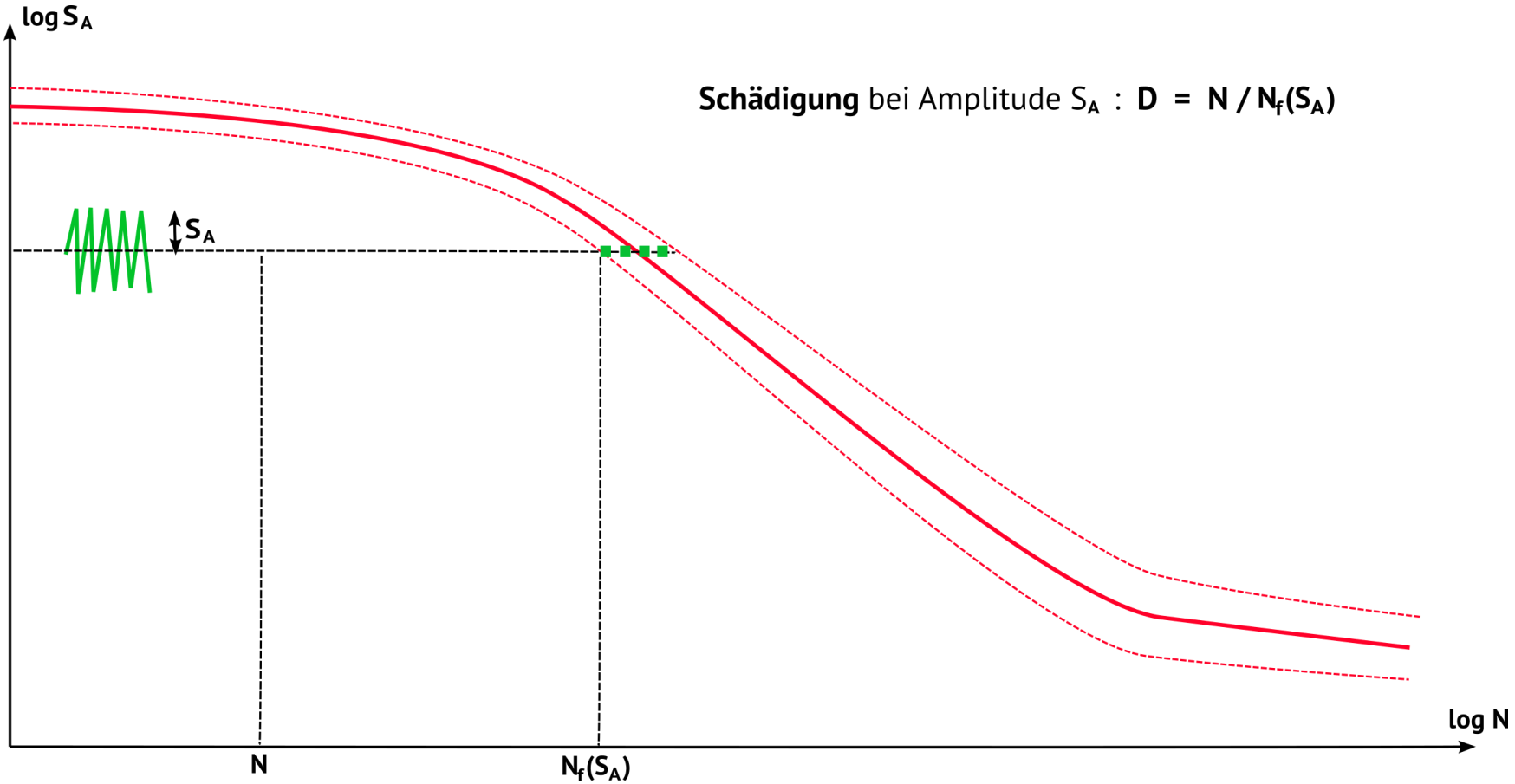
Wöhler-Versuch



Wöhler-Kurve

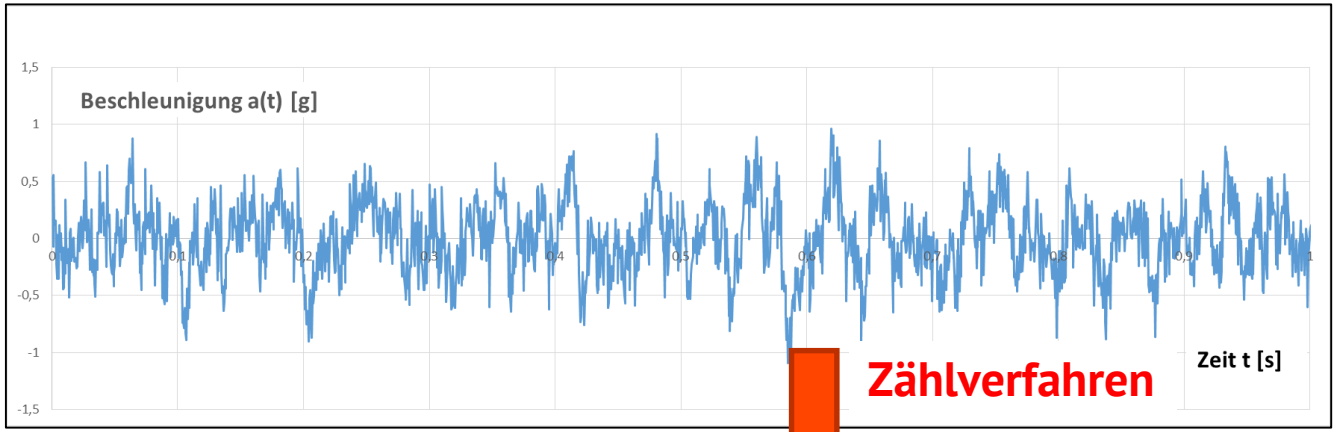


Schädigung



Schädigung bei Amplitude S_A : $D = N / N_f(S_A)$

Üblicher Wechselfestigkeitsnachweis : Statistische Verteilung der Ausschläge



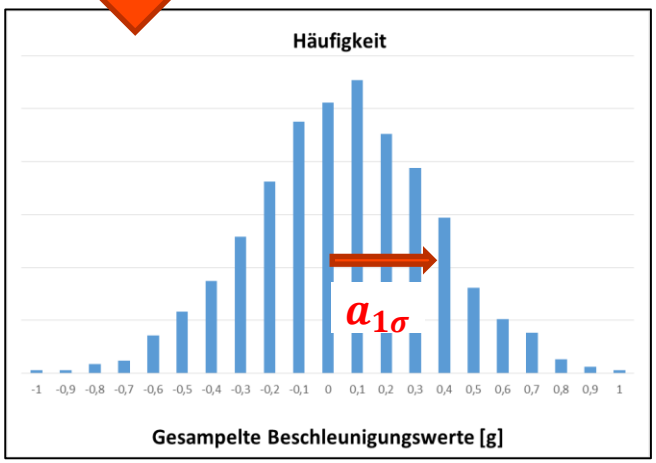
Zählverfahren

Normalverteilung:

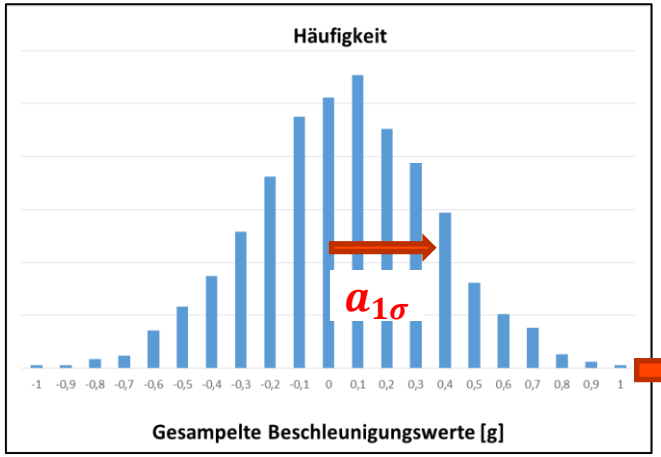
1-Sigma-Bereich [$-a_{1\sigma}, a_{1\sigma}$]
- enthält 68,3% aller Amplituden

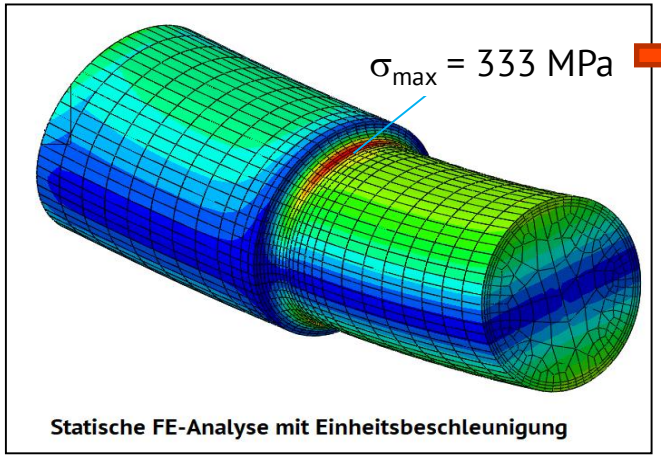
2-Sigma-Bereich [$-2\ a_{1\sigma}, 2\ a_{1\sigma}$]
- enthält 95,5% aller Amplituden

3-Sigma-Bereich [$-3\ a_{1\sigma}, 3\ a_{1\sigma}$]
- enthält 99,7% aller Amplituden

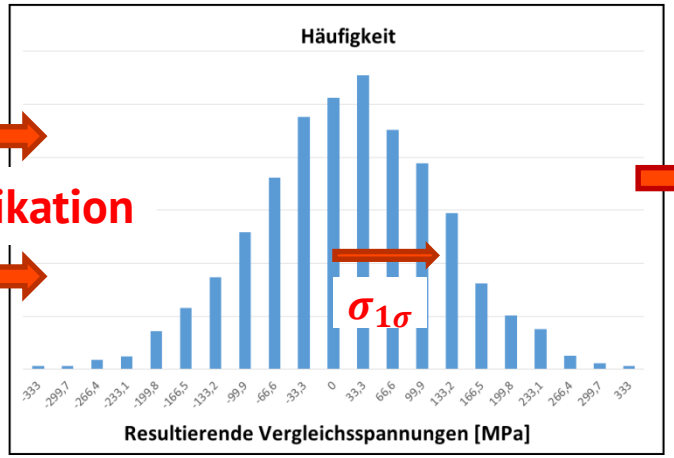


Üblicher Vorgehensweise Wechselfestigkeitsnachweis : Zählverfahren und Statische FE





Multiplikation



Wöhler-Kurve

Schädigung an kritischer Stelle

Betriebsfestigkeit schwingungsfähiger Systeme

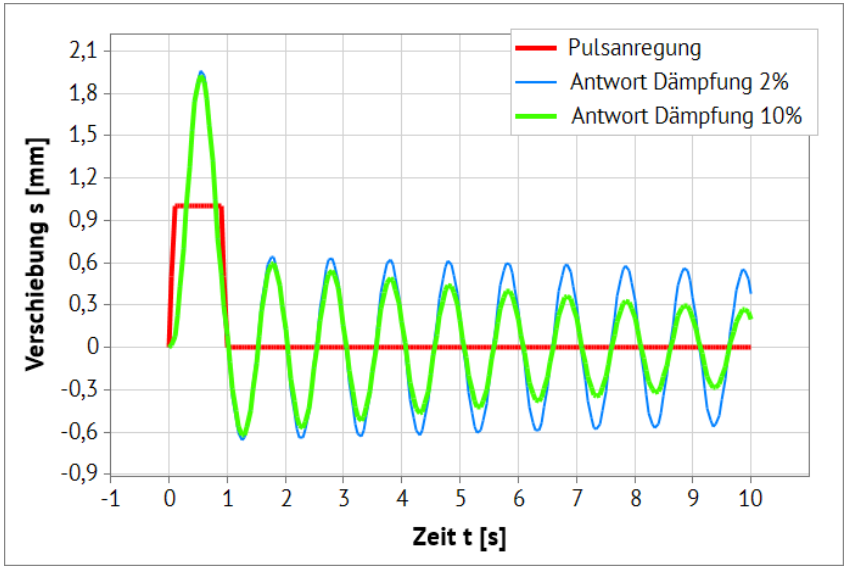
Schwingungsfähiges System: zusätzliche Effekte

Nachschwingen:

Anregung 1 Zyklus ⇒ Systembelastung viele Zyklen

Dämpfung:

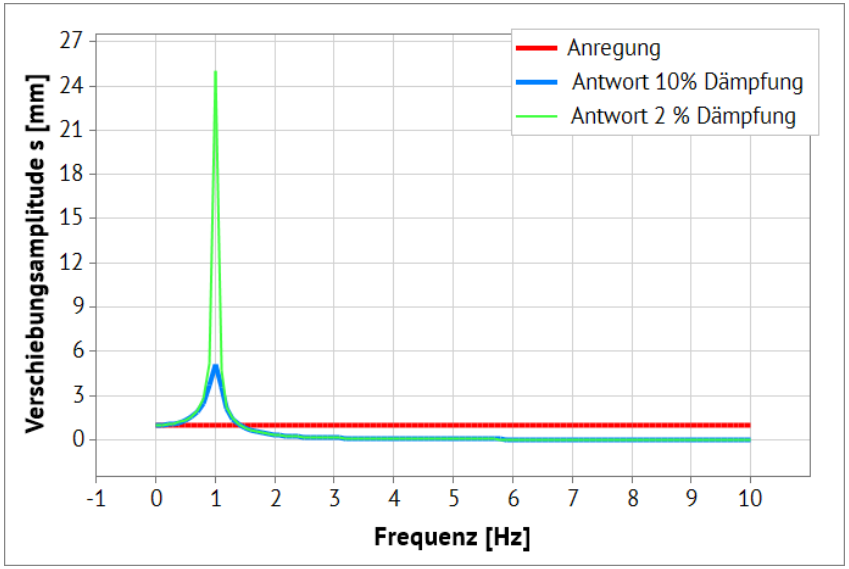
je kleiner umso mehr Nachschwinger



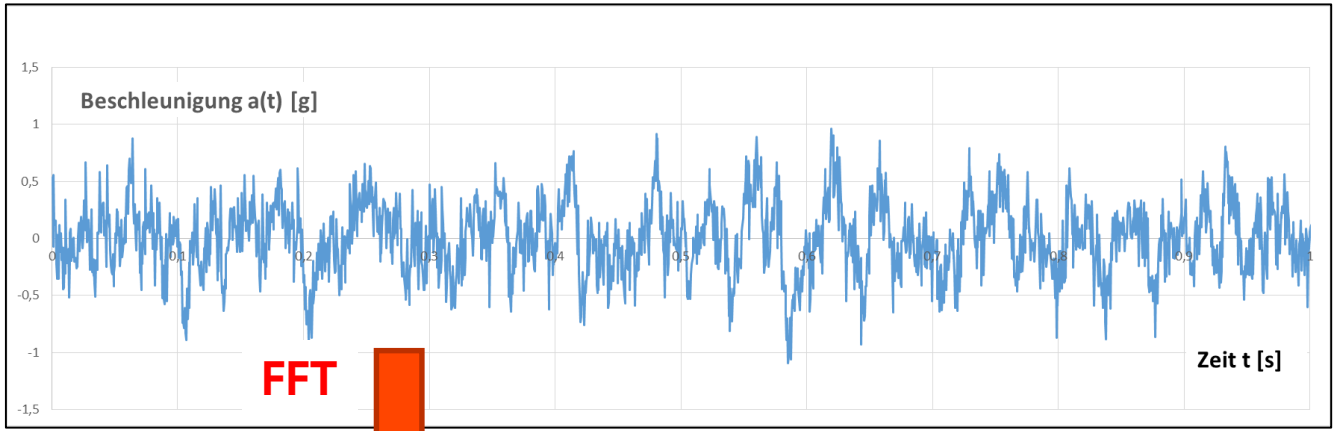
Resonanz:

Antwortamplitude vielfach größer als Anregungsamplitude

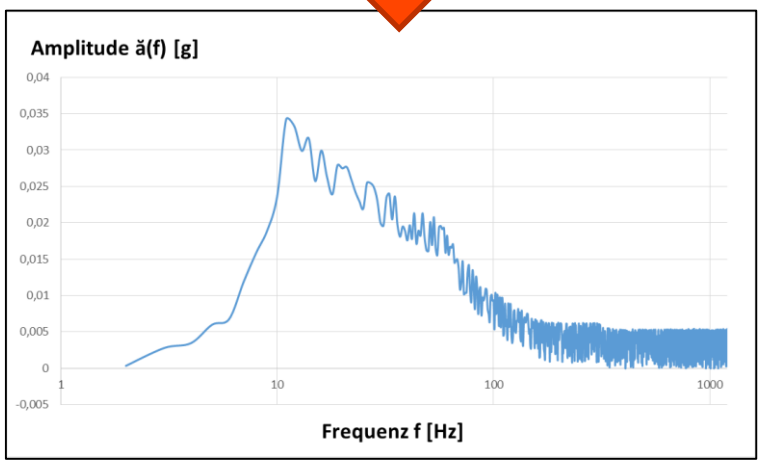
Je kleiner die Dämpfung umso größer die Systemantwort



Anregungen und Systemantwort im Frequenzbereich: Fourier-Transformation



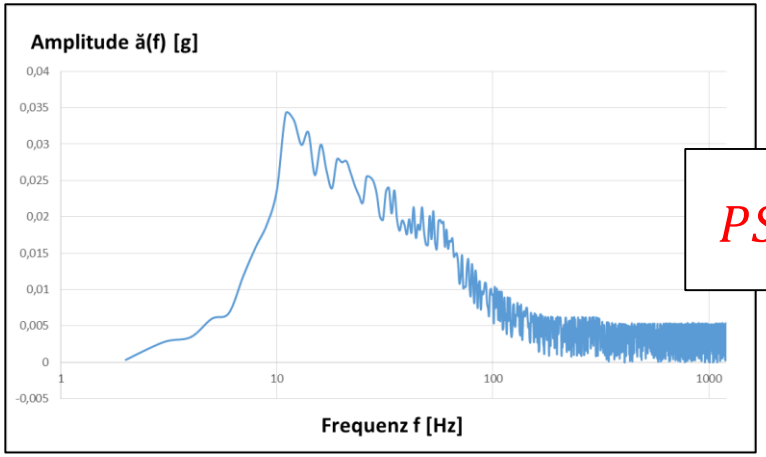
FFT



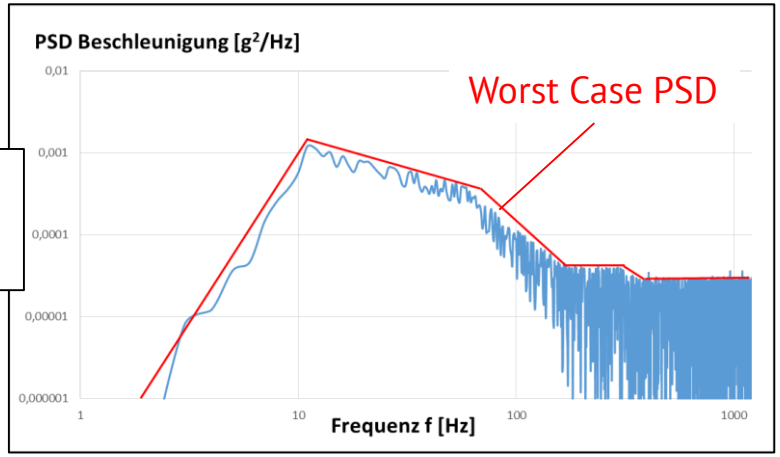
Komplexe Fourier-Amplitude:

Enthält die Information über *Größe und Phasenlage* der Ausschläge

Anregungen und Systemantwort im Frequenzbereich: Spektrale Leistungsdichte (Power Spectral Density)



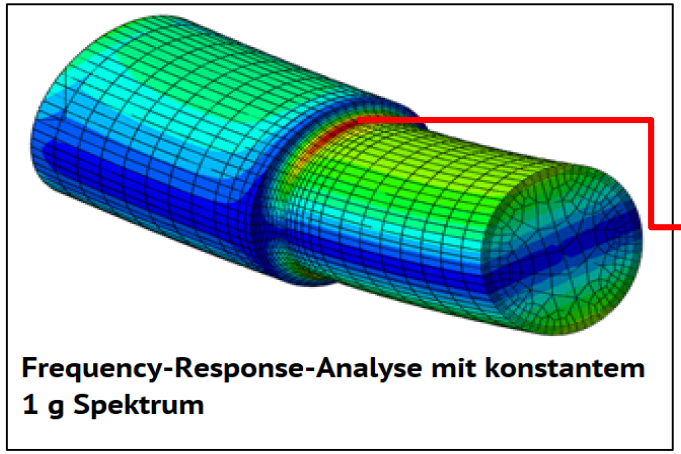
$$PSD = \frac{|\breve{a}|^2}{\Delta f}$$

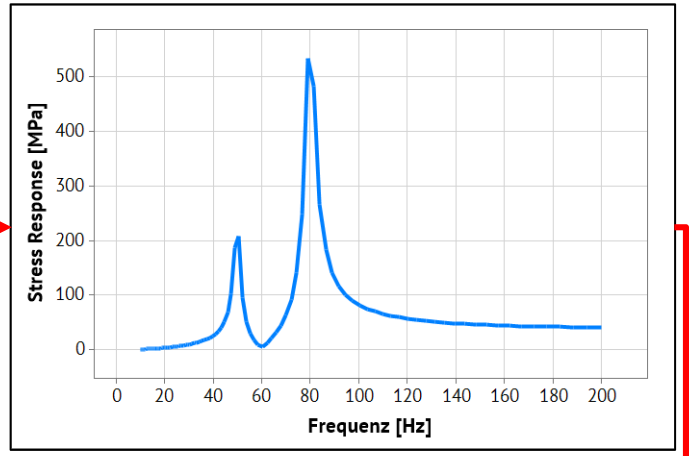


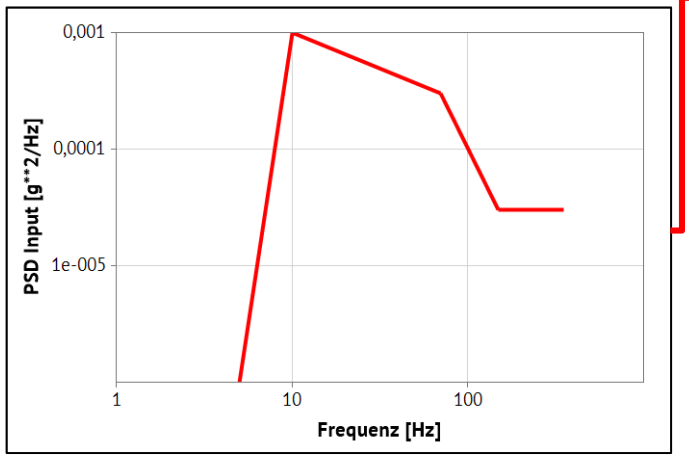
$$\boldsymbol{a_{RMS}} = \sqrt{\int PSD(f)df}$$

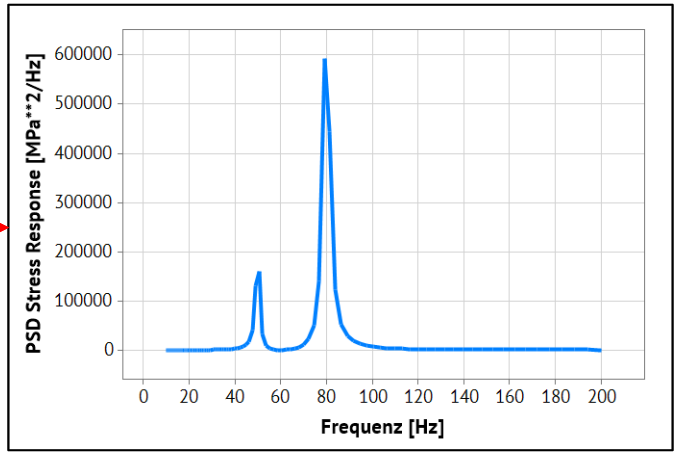
$$\approx \boldsymbol{a_{1\sigma}}$$

Vorgehensweise Random Response-Analyse







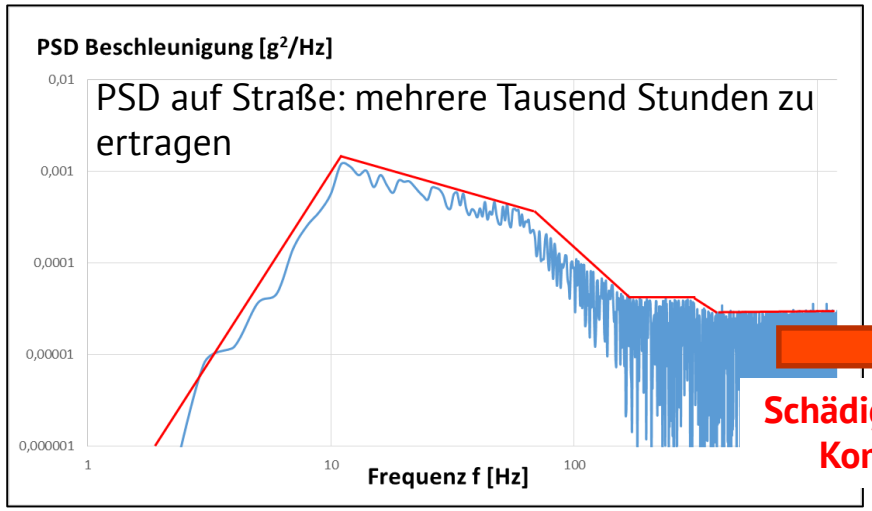


$$\sigma_{RMS} = \sqrt{\int PSD(f)df}$$

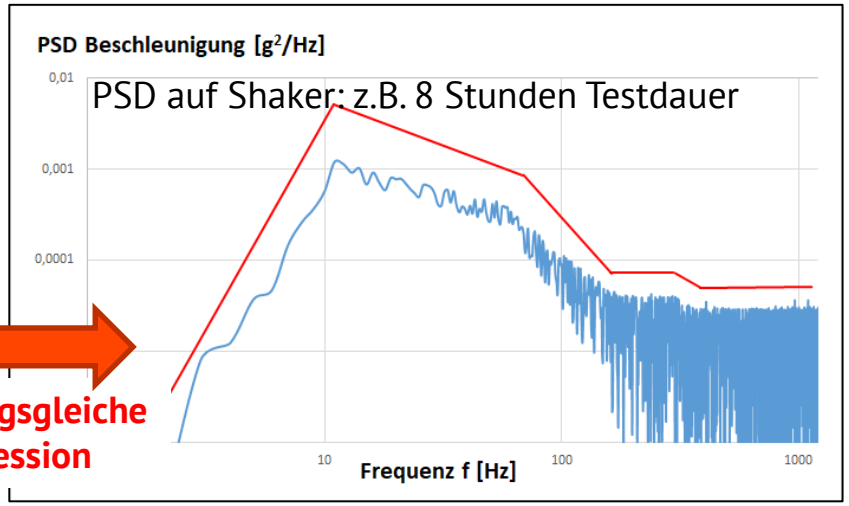
Shaker-Tests und Vorhersage mit Random Response-Analysen

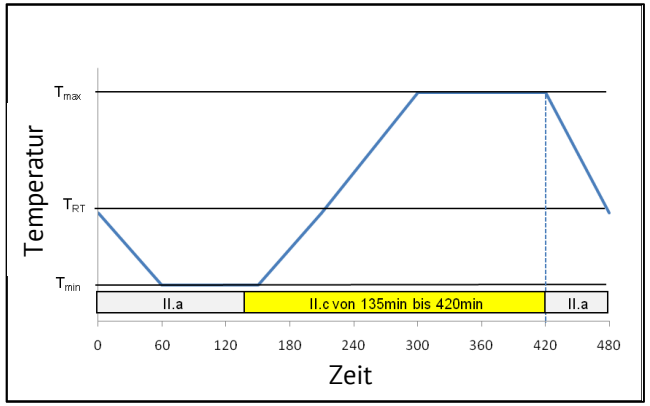
Marlok Automotive GmbH: J 260 CE- IMV Schwingprüfanlage

Vom Fahrversuch zur Schwingungsprüfung: Rauschprofile für Shaker



Schädigungsgleiche Kompression

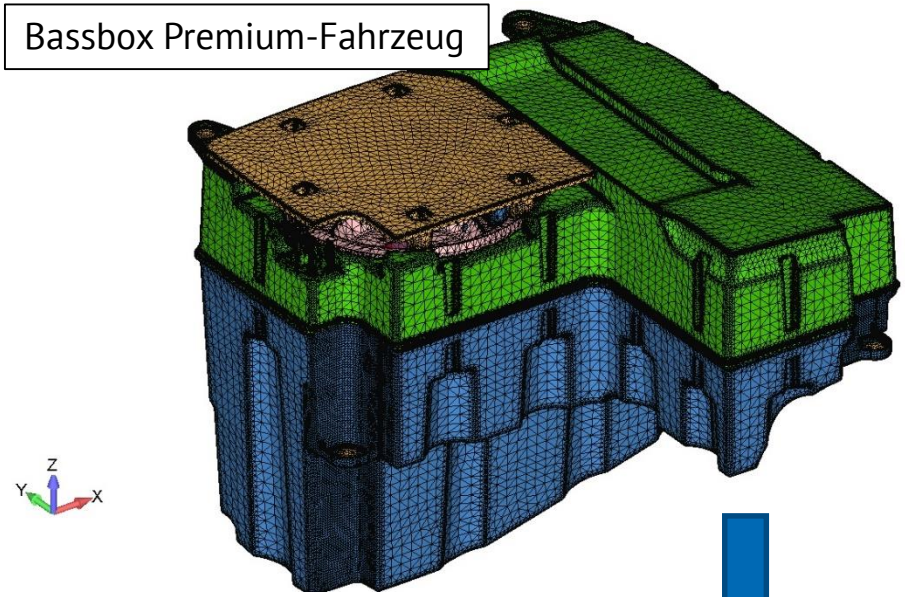




Temperaturüberlagerung

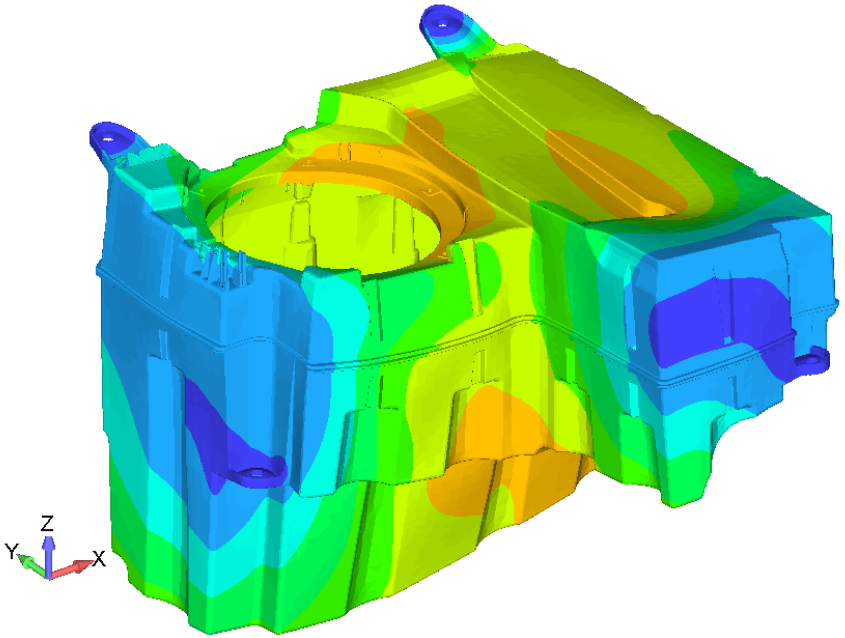
Random Response Analysen als Virtuelle Shaker-Tests: Vom FE-Modell zur Modalanalyse

Bassbox Premium-Fahrzeug



FE-Modell 3,5 Mio Knoten

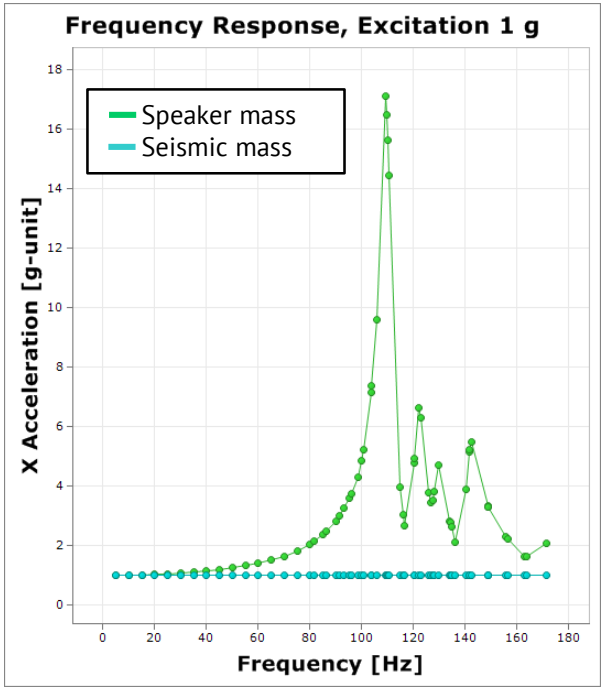
Identifikation der wesentlichen Eigenschwingungen

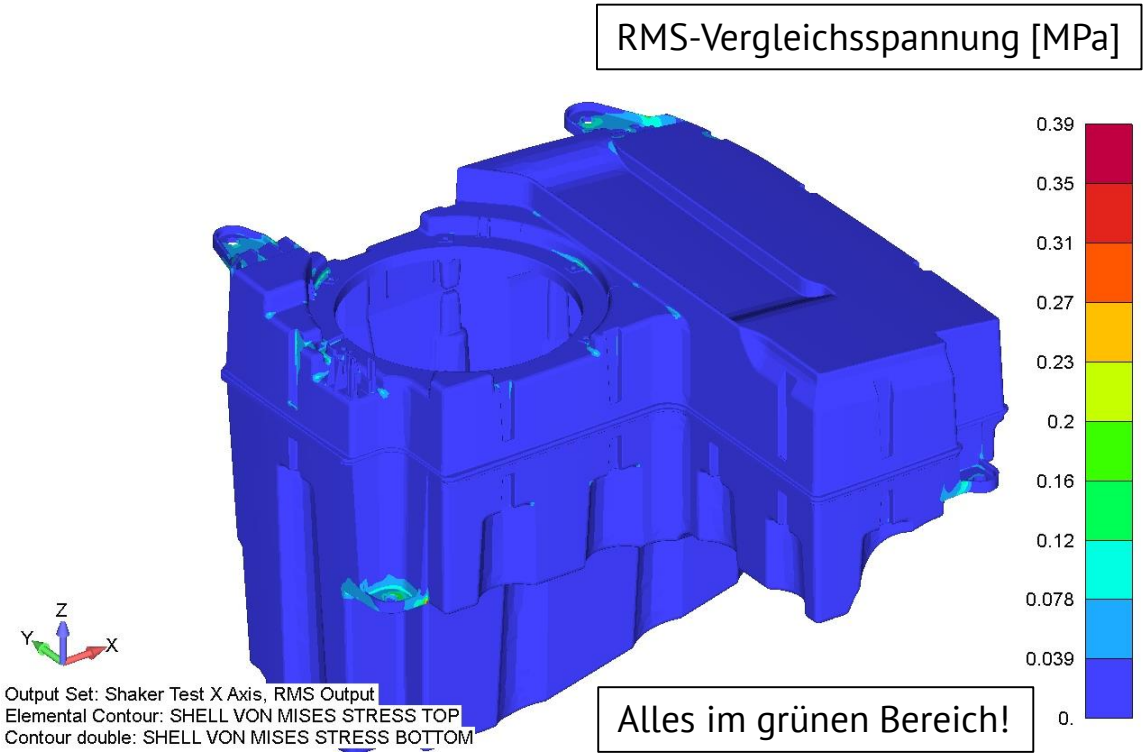


Random Response Analysen als Virtuelle Shaker-Tests: Frequency Response und Random Response

- **Frequency Response** = Sinus Response:
  - Anregung der zu testenden Baugruppe mit Sinusschwingung
  - Konstante Amplitude der Anregung über den ganzen Frequenzbereich (z.B. 1 g)
  - Als Resultat erhält man den Frequenzgang der Baugruppe bei Einheitslast: **Transferfunktion**
- **Random Response**:
  - Postprocessing-Schritt nach Frequency-Response-Analyse
  - Multiplikation des Quadrats der Transferfunktion mit Shakerprofil-PSD-Funktion
  - Als Resultat erhält man die PSD-Antwort der Baugruppe auf die Shaker-Anregung
  - Merke: die PSD-Antwort ist ein **statistisches** Maß für die frequenzabhängige Schwingungsleistung
- **RMS**:
  - Integration der PSD-Antwort über die Frequenz und Wurzelbildung ergibt (ungefähr) **1σ-Werte** an jeder Stelle der Baugruppe
- Mittelwert für die **Zahl der Nulldurchgänge**:
  - Aus Momenten der PSD-Antwort an jeder Stelle der Baugruppe

Random Response Analysen als Virtuelle Shaker-Tests: Frequency Response und Random Response

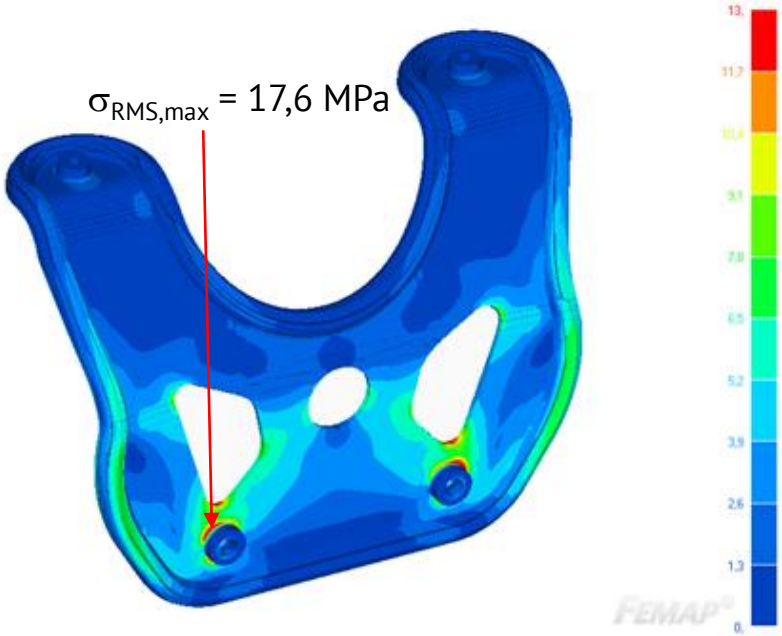




Virtueller Shaker-Test Kunststoffhalter

PA66 GF30:
Wechselfestigkeit 24 MPa

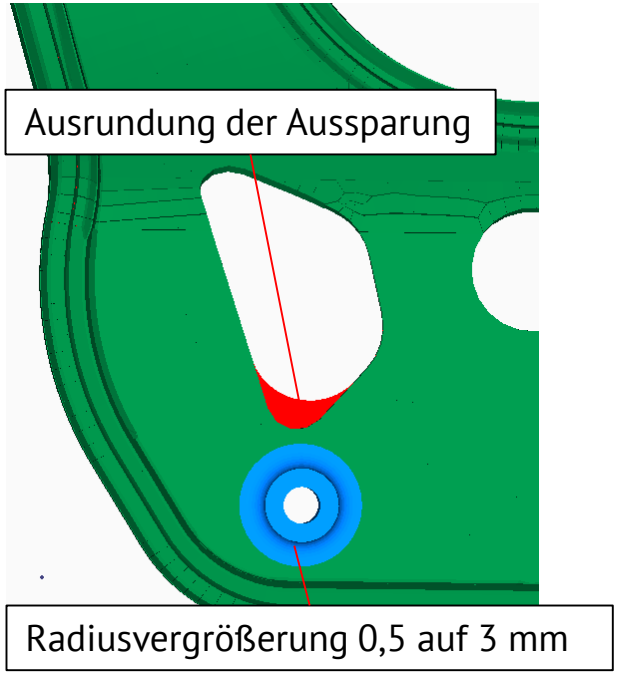
Maximale RMS-Vergleichsspannung:	17,6 MPa
Schädigung bei gesamter Shakerzeit:	15
Lebensdauer auf Shaker:	0,2 h

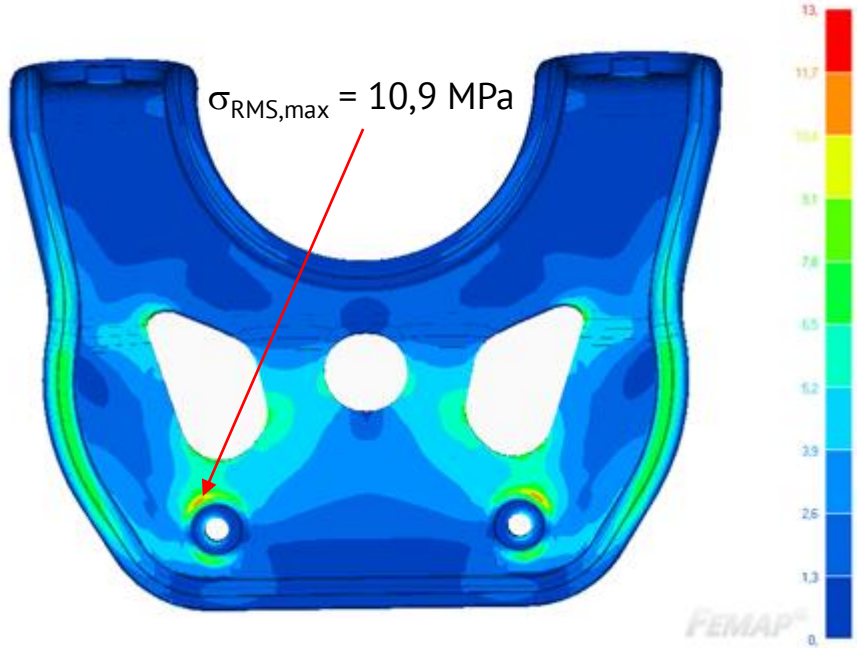


Virtueller Shaker-Test Kunststoffhalter

Optimierungen

Maximale RMS-Vergleichsspannung:	10,9 MPa
Schädigung bei gesamter Shakerzeit:	0,2
Lebensdauer auf Shaker:	18 h



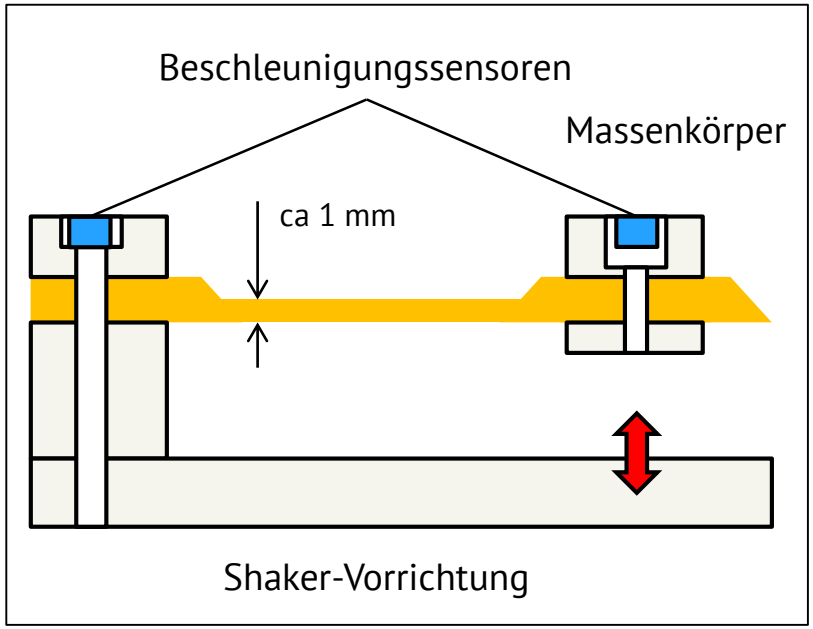


Zusammenfassung

- Schon kleine lokale Optimierungen erhöhen die Lebensdauer auf dem Shaker drastisch!
- Damit die Belastungen sicher im Shaker-Test ertragen werden, sollte die maximale RMS-Vergleichsspannung im Bereich von einem Drittel der Material-Dauerfestigkeit sein.
- Für eine präzise Vorhersage der Shaker-Festigkeit ist die Kenntnis der Material-Wöhlerkurve und vor allem der Dämpfung notwendig.
- Bei Kunststoffen sind diese Eigenschaften in der Regel nicht verfügbar und es muss auf „Erfahrungswerte“ zurückgegriffen werden.

Ausblick: Kooperation Marlok – CES Materialprüfung auf dem Shaker

- Problemstellung:
  - Werkstoffdaten aus der klassischen Materialprüfung bedingt brauchbar
  - Zeitaufwand für Wöhler-Versuche sehr hoch
- Wunsch:
  - Praxisnähere Werkstoffdaten für Shaker-Tests
  - Daten im Frequenzbereich 10 bis 300 Hz
  - Daten im Temperaturbereich -40 bis 120 °C
  - Berücksichtigung der Faserorientierung
  - Verwendung von anwendungsähnlichen Prüfkörpern aus Spritzguss
  - Wenig Zeitaufwand und geringere Kosten
- Lösung:
  - **Materialprüfung im Schwingungsversuch**

Ausblick: Materialprüfung auf dem Shaker: Schema

- Sinus-Sweep bei verschiedenen Temperaturen für komplexe Moduln
- Shakern in verschiedenen Resonanzen bis zum Bauteilversagen: Quasi-Wöhler-Kurve
- Geeigneter Prüfkörper: Anisotropie
- Benutzung unterschiedlicher Massenkörper für unterschiedliche Materialklassen