



Virtuelle Entwurfsmethoden und Simulationsstrategien für vibroakustische Metamaterialien



Foto mit freundlicher Genehmigung: © Mercedes-Benz Group, 2022



Agenda



Motivation

Parametrische Modellordnungsreduktion

MADAM

Anwendungsbeispiel: Optimierung eATS Deckel

Energiebasierte Finite Element Methode (EFEM)

EFEM für Metamaterialien

Anwendungsbeispiel: Simulation des Gesamtfahrzeugs



Motivation



Für Optimierungen müssen viele Auswertungen der Zielfunktion durchgeführt werden

In unserem Fall bedeutet eine Auswertung die Berechnung von FEM-Modellen für viele Frequenzen

Um die Funktionsauswertungen „billiger“ zu machen, werden Simulationenmethoden verbessert



Parametrische Modellordnungsreduktion

Moritz Hülsebrock, Fraunhofer Institut LBF, Darmstadt

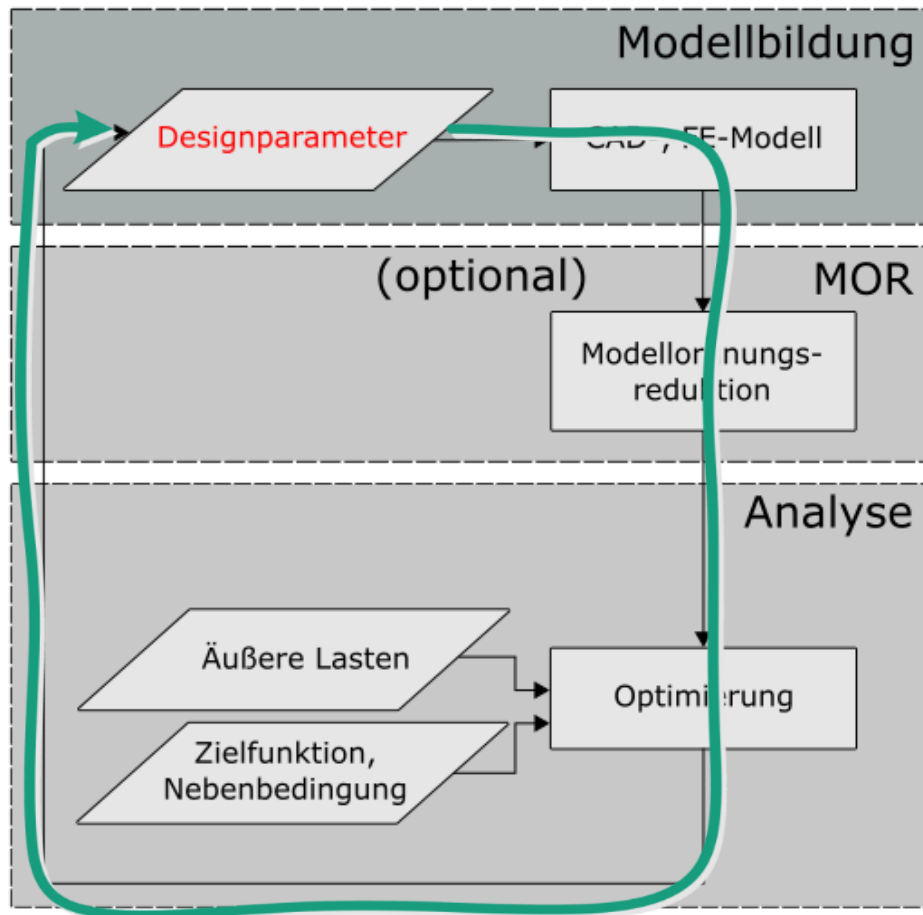


Parametrische Modellordnungsreduktion

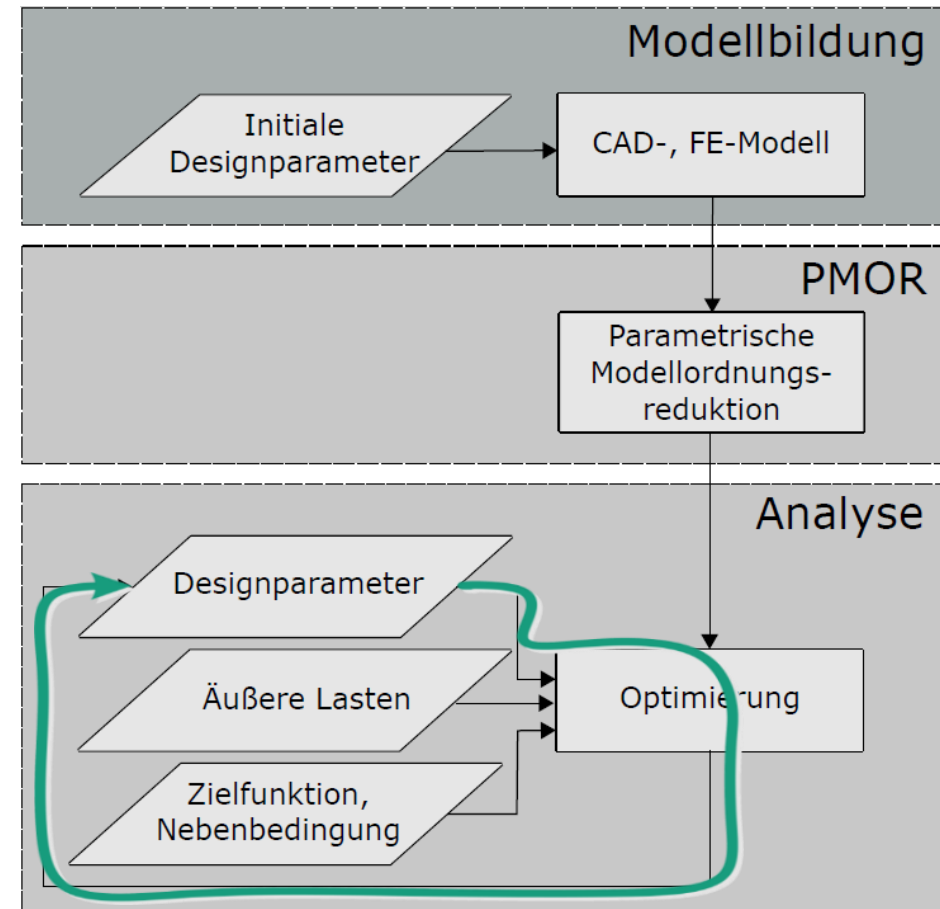
Motivation



Klassisches Vorgehen



PMOR



Parametrische Modellordnungsreduktion

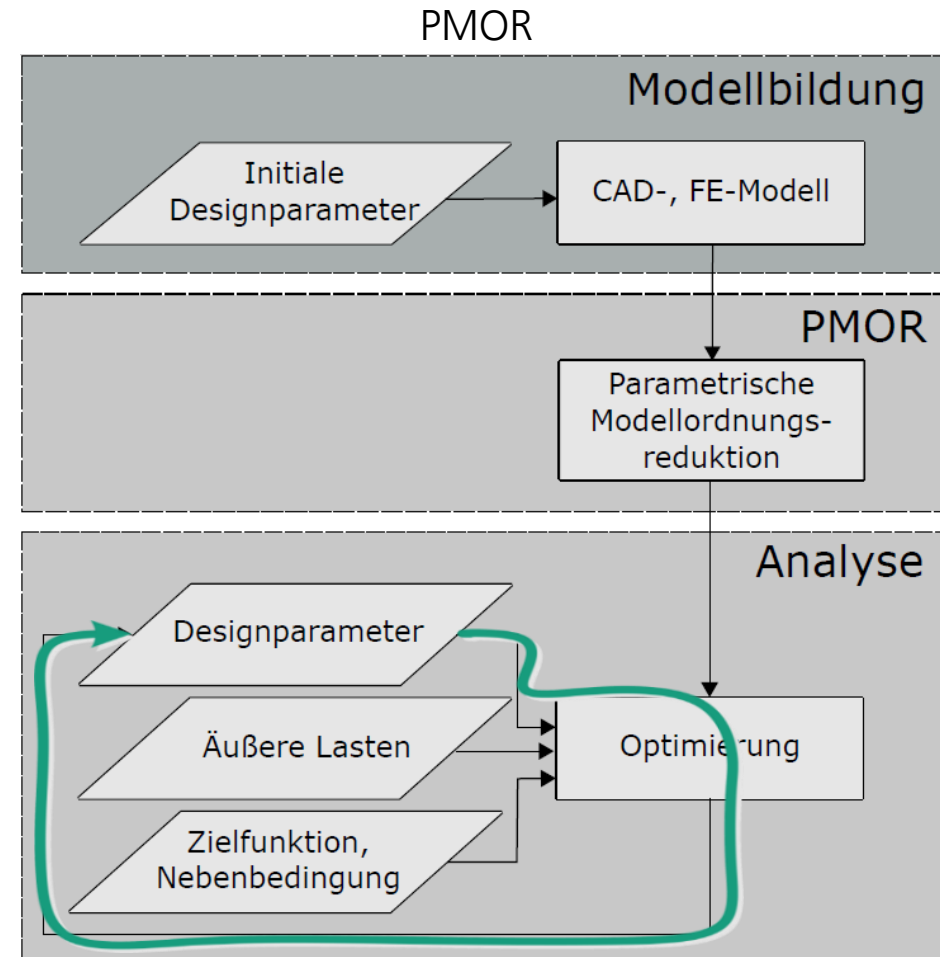
Motivation

Methoden:

- Component Mode Synthesis (CMS)
 - Craig Bampton
 - Enhance Craig Bampton
- Characteristic Constraint Mode Reduction
- Parametrische Globale Modellreduktion
- MADAM
- Surrogate Modelle (MLP, GP, etc.)
- Krylov-Unterraum-Verfahren

Vorteile:

- Effiziente Optimierung
- Machbarkeits- und Sensitivitätsanalysen
- Entwurfsraumbewertung
- Strukturüberwachung



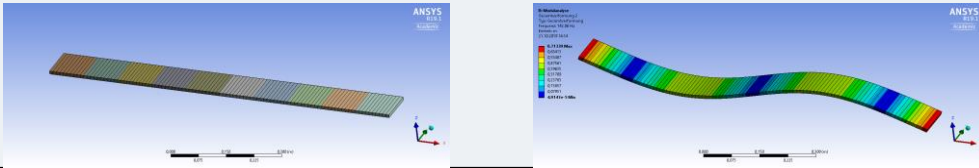
Parametrische Modellordnungsreduktion

Workflow am LBF



Aufbau FE-Modell in ANSYS Workbench

- Gewünschte Substrukturierung hinzufügen
- Methoden:
 - Modale Superposition & CMS



Einlesen der Systemmatrizen
& Transformationsmatrizen
aus ANSYS



Parametrische Modellreduktion in MATLAB

- Messpunkte suchen
- Transformationsmatrix berechnen
- Systemmatrizen zusammensetzen
- Parameteränderung für jede Substruktur
 - Steifigkeiten, Dichte, Schalendicke, Geometrie

Übergabe parametrisch
reduzierte Systemmatrizen

Effiziente Untersuchung von struk.- dyn. Verhalten in MATLAB

- Parameterverteilungen vorgeben
- Analyse Einfluss Systemverhalten

MADAM



Parametrische Modellordnungsreduktion

MADAM für VAMM



Allgemein:

- MADAM: **M**ethod for **A**ccelerating **D**ynamic **A**nalysis under **M**odifications
- Grundidee: Effiziente Modifikation modal reduzierter Modelle (z.B. Anbindung von Tilger)
- Berechnung der modalen Matrix **T** und reduzierter Systemmatrizen **K_r**, ... des Grundsystems

Vorteile für VAMM:

- Modale Reduktion komplexer Systeme in Ansys
- Anbindung von Resonatoren an reduzierte Systeme in MATLAB
- Freie Wahl von Parametern, Anbindungspositionen und –richtungen

Nachteile:

- Benötigt das volle Modell + Transformationsmatrix in MATLAB



Beispiel – eATS Deckel

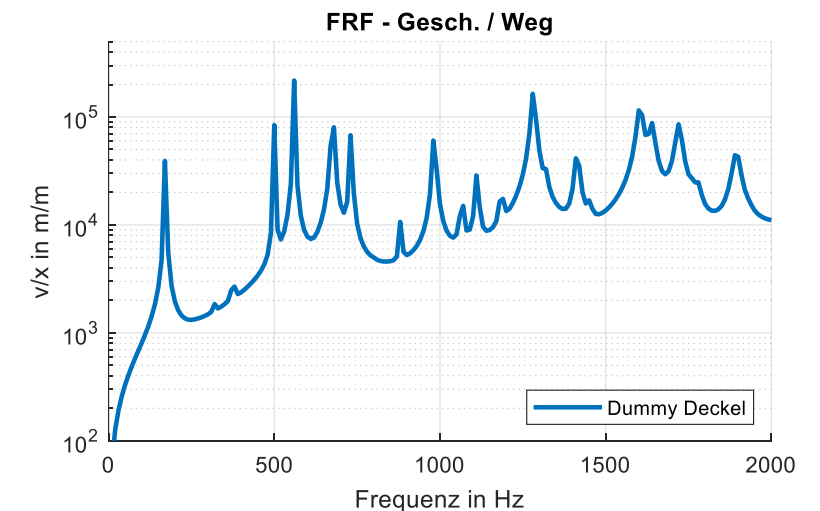
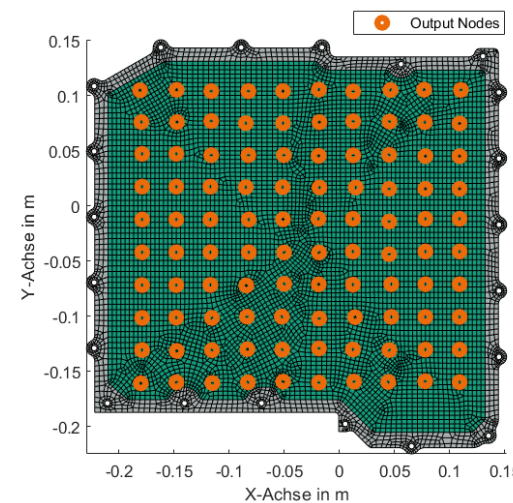
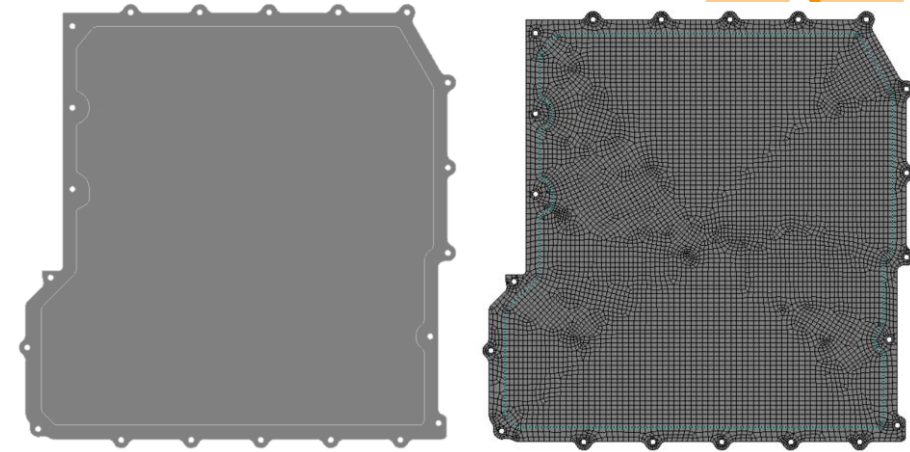


Parametrische Modellordnungsreduktion

Anwendungsbeispiel – eATS Deckel



- „Flacher“ eATS HA LE Deckel, Stahl, 2mm
- Netz: 60.000 Knoten, 180.000 DOF
- Modale Analyse mit Einspannung in ANSYS
- Fußpunktanregung in MATLAB
- Summenfrequenzgang: v/x



Parametrische Modellordnungsreduktion

Anwendungsbeispiel – eATS Deckel



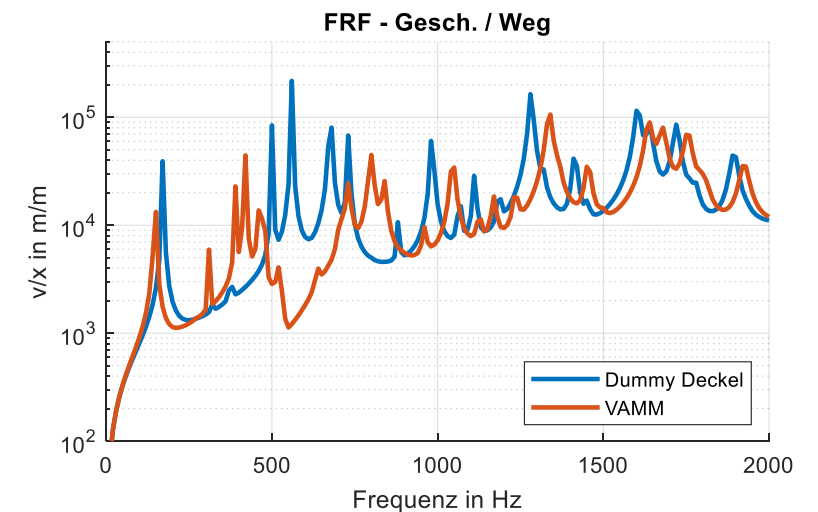
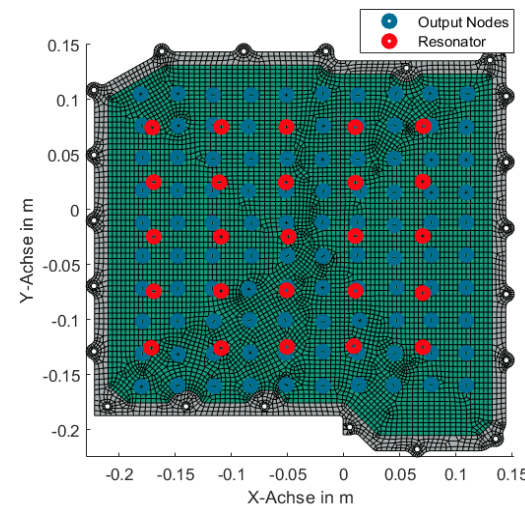
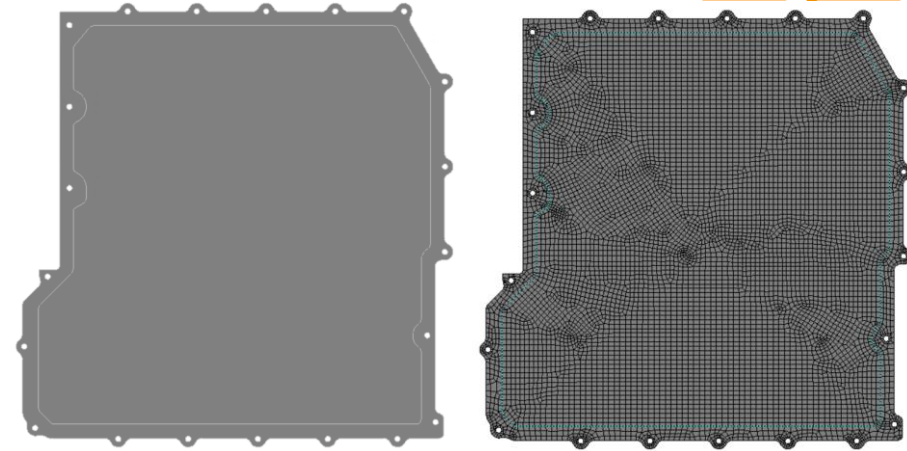
- VAMM mit diskreten Resonatoren

$$m_R m_0 = 20 \%$$

$$f_R = 550 \text{ Hz}$$

$$D_R = 1 \%$$

- Anbindung in MATLAB an volles System
- Berechnung der Eigenmoden in MATLAB
- MOR und Fußpunktanregung
- **Rechenzeit in MATLAB: 43,9 s**



Parametrische Modellordnungsreduktion

Anwendungsbeispiel – eATS Deckel



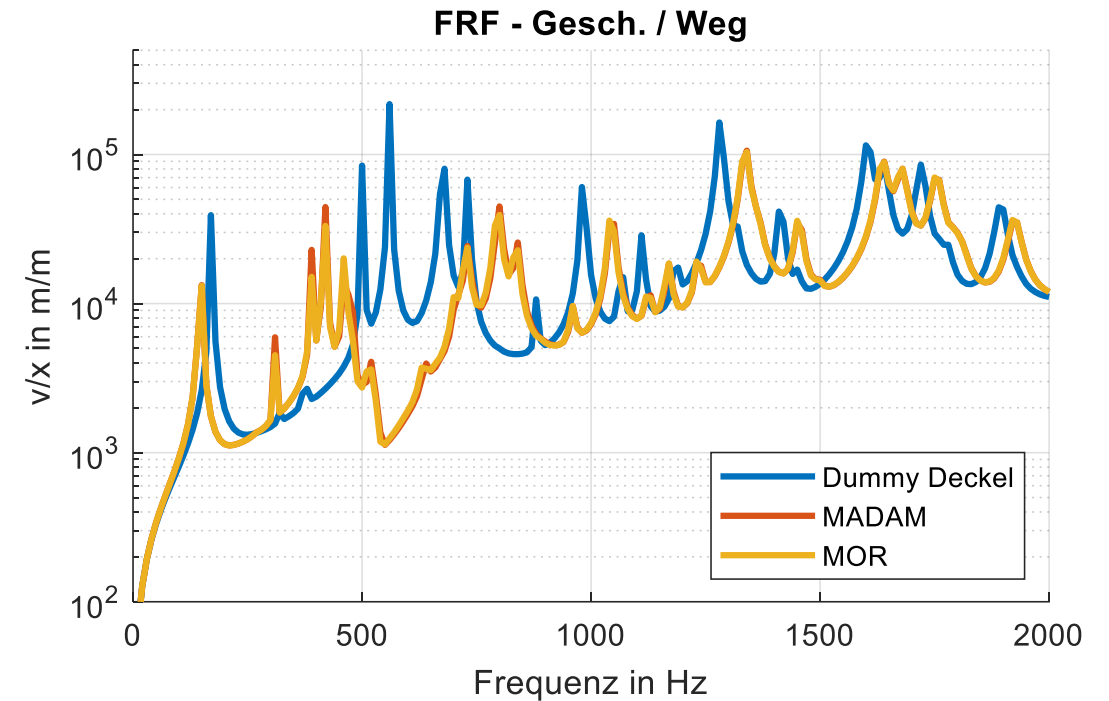
Sehr gute Übereinstimmung!

Rechenzeit:

- MOR: 43,9 s
- MADAM: 0,80 s → **- 98,2 %**

Noch bessere Performance zu erwarten bei:

Größeren Modellen (im Vergleich zu voll)



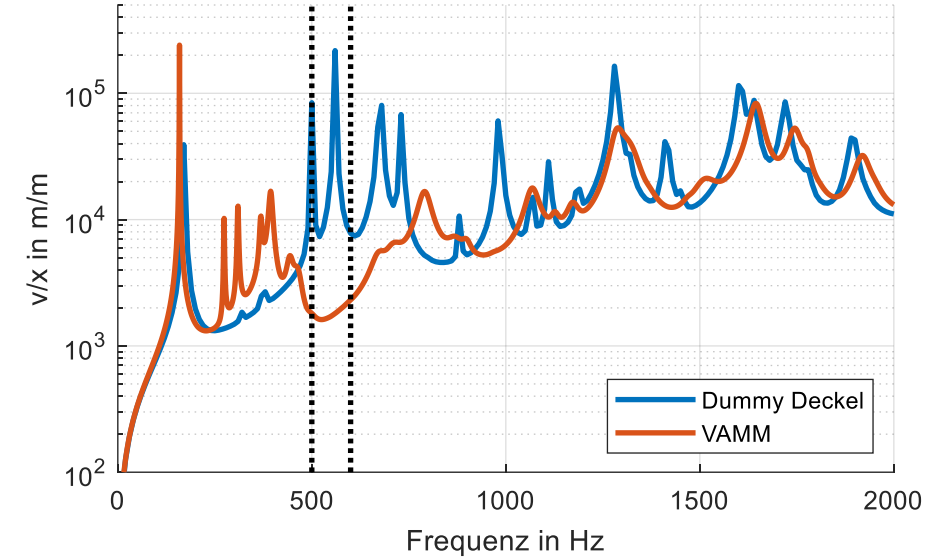
Parametrische Modellordnungsreduktion

Anwendungsbeispiel – eATS Deckel



$$f_1 = 500 \text{ Hz}, f_2 = 600 \text{ Hz}$$

FRF - Gesch. / Weg



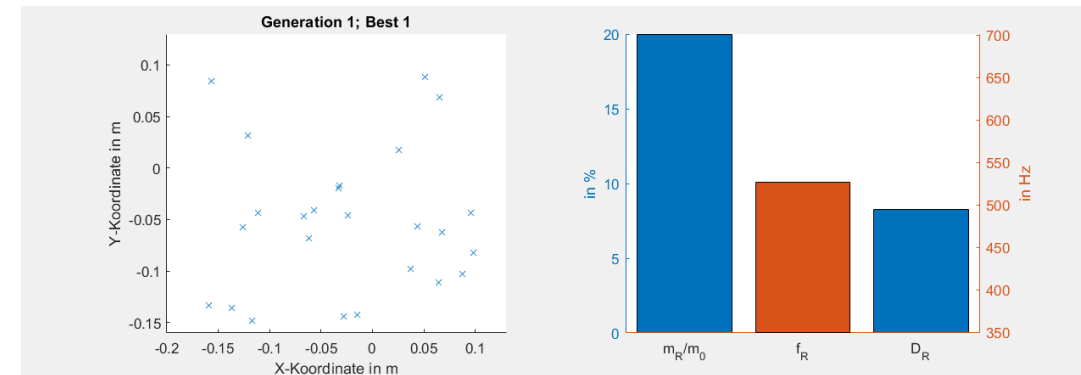
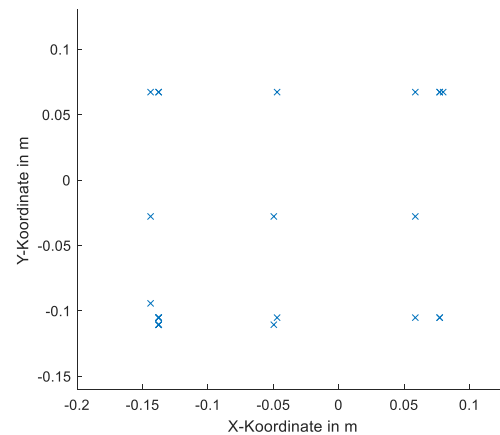
Zielfunktionen: $g_{vmean}(x) = \sum_{f_k=f_1:f_2} \sum_{i=1:N} \hat{v}(f_k)_i^2$

Parameterset 1: $x_{R,i}, y_{R,i}, f_R, D_R$

Algorithmus: Genetischer Algorithmus

- 52 Gene
- 20 Individuen
- Selektion: Roulette
- 40% Mutation

Finale Positionierung



Parametrische Modellordnungsreduktion

MADAM - Theorie



- MADAM: **M**ethod for **A**ccelerating **D**ynamic **A**nalysis under **M**odifications
- Grundidee: Effiziente Modifikation modal reduzierter Modelle (z.B. Anbindung von Tilger)
- Berechnung der modalen Matrix \mathbf{T} und reduzierter Systemmatrizen \mathbf{K}_r, \dots des Grundsystems

- Erweiterung der modalen Matrix über Einheitsmatrix $\mathbf{T}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^{n \times m} & \mathbf{0}^{n \times k} \\ \mathbf{0}^{k \times m} & \mathbf{I}^{k \times k} \end{bmatrix}$

- Bestimmung der Modifikation: $\mathbf{K}_a = \mathbf{K}^* - \begin{bmatrix} \mathbf{K}^{n \times n} & \mathbf{0}^{n \times k} \\ \mathbf{0}^{k \times n} & \mathbf{0}^{k \times k} \end{bmatrix}$

- Reduktion der Modifikation: $\mathbf{K}_{a,r} = \mathbf{T}^* \mathbf{K}_a \mathbf{T}^*, \dots$

- Anbinden der Modifikation: $\mathbf{K}_r^* = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_r & \mathbf{0}^{m \times k} \\ \mathbf{0}^{k \times m} & \mathbf{0}^{k \times k} \end{bmatrix} + \mathbf{K}_{a,r}, \dots$

\mathbf{K} ... Ausgangssystem
 \mathbf{K}^* ... modifiziertes System
 \mathbf{K}_a ... Modifikation
 n ... # DoF Ausgangssystem
 m ... # Moden
 k ... # DoF der Modifikation

Energiebasierte Finite Element Methode

Nicolai Rehbein, Novicos GmbH Hamburg



Energiebasierte Finite Element Methode (EFEM)

Theoretischer Hintergrund - Grundgleichungen



- **Simulation von großen Strukturen im Hochfrequenzbereich**
- Klassische Methoden (FEM, BEM) erreichen ihre Limits
- sehr feine Diskretisierung erforderlich, und dadurch sehr große lineare Gleichungssysteme
- **Energiebasierte Methoden**
- **EFEM**, EBEM, SEA
- **Energiedichte** als Unbekannte anstatt der Verschiebungen
- Keine oszillierende Lösung \Leftrightarrow Diskretisierung unabhängig vom Frequenzbereich
- Berechnung akustischer Größen möglich.

$$\frac{\lambda}{L} \ll 1$$

$$p = \sqrt{e\rho c^2}$$

Energiebasierte Finite Element Methode (EFEM)

Theoretischer Hintergrund - Grundgleichungen



- Energiefluss in Basiselementen: z.B. Platten, Balken, etc.
- Energiefluss-Gleichgewicht in einem Element

$$\pi_{in} = \nabla \cdot \vec{q} + \pi_{diss}$$

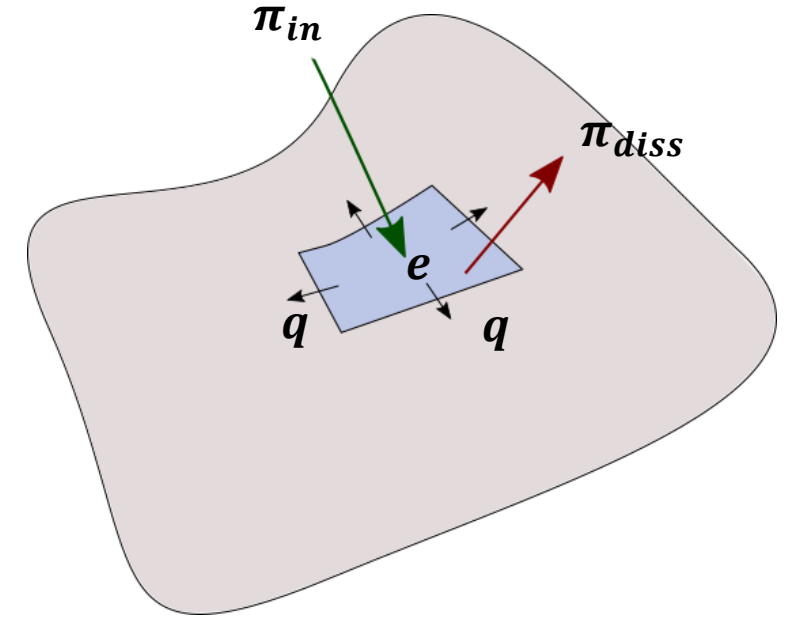


$$\pi_{diss} = \omega \eta e \quad (\text{Annahme: Kin. Energie} = \text{Pot. Energie})$$

$$\nabla \cdot \vec{q} = \nabla \cdot \left(-\frac{c_g^2}{\eta \omega} \nabla e \right) = -\frac{c_g^2}{\eta \omega} \Delta e$$



$$\pi_{in} = -\frac{c_g^2}{\eta \omega} \Delta e + \omega \eta e$$



π_{diss}	Dissipierte Energie
e	Energie Dichte
π_{in}	Eingangsleistung
η	Strukturdämpfung
ω	Kreisfrequenz
\vec{q}	Energiefluss
c_g	Gruppengeschwindigkeit

Energiebasierte Finite Element Methode (EFEM)

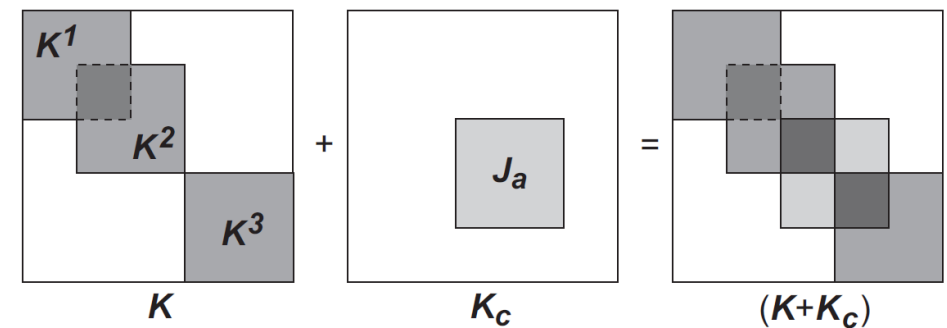
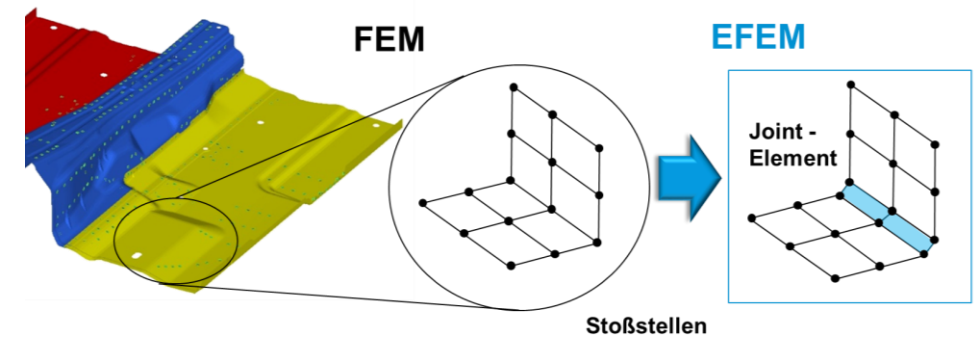
Theoretischer Hintergrund – Strukturkopplung für diskretisiertes System



- Joint-Elemente (Fläche = 0)
- Joint-Matrix K_c (basierend auf Transmissionskoeffizienten)
- Systemmatrix
- Gekoppeltes Gleichungssystem

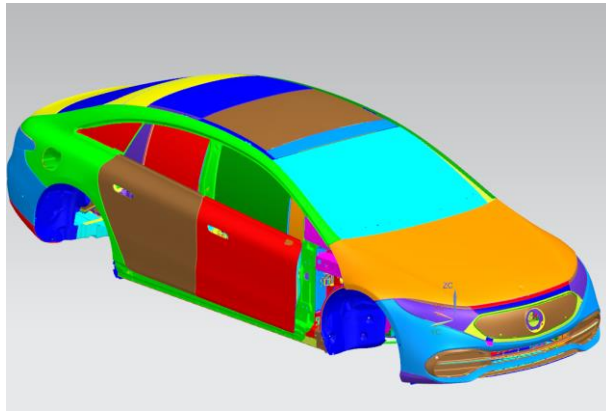
$$(K + K_c)e = F$$

- Rechte Seite F (Eingangsleistung)



Energiebasierte Finite Element Methode (EFEM)

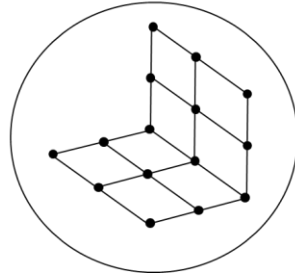
Workflow



1.

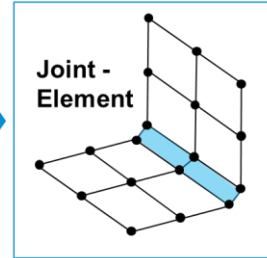
FEM-Modell (BDF)

FEM



2.

EFEM



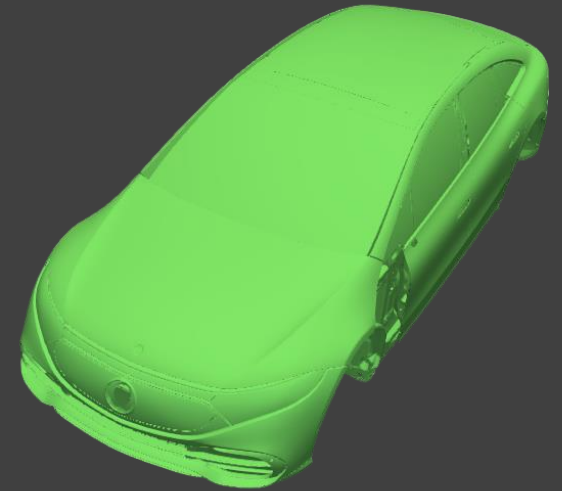
Netz-Aufbereitung – Programm welches automatisch Koppelstellen zwischen Strukturelementen erkennt, **keine manuelle Bearbeitung erforderlich**

3. EFEM-Solver

- Definition der Eingangsleistung
- Definition der Randbedingungen
- Berechnung der Geschwindigkeiten, Transmissionskoeffizienten ...
- Lösen des lin. Gleichungssystems

4. EFEM – Ergebnis

- Energiedichten für alle Wellentypen
- Geschwindigkeiten an den Oberflächen
- Schalldruck



Integration von Metamaterialien in die EFEM

Theoretischer Hintergrund

- Gruppengeschwindigkeit aus Wellenzahl bzw. effektiver Dichte

$$\rho_{eff} = \rho + \frac{nm_{res}}{h} \frac{1}{1 - (\omega^2/\omega_{res}^2)} \quad (1)$$

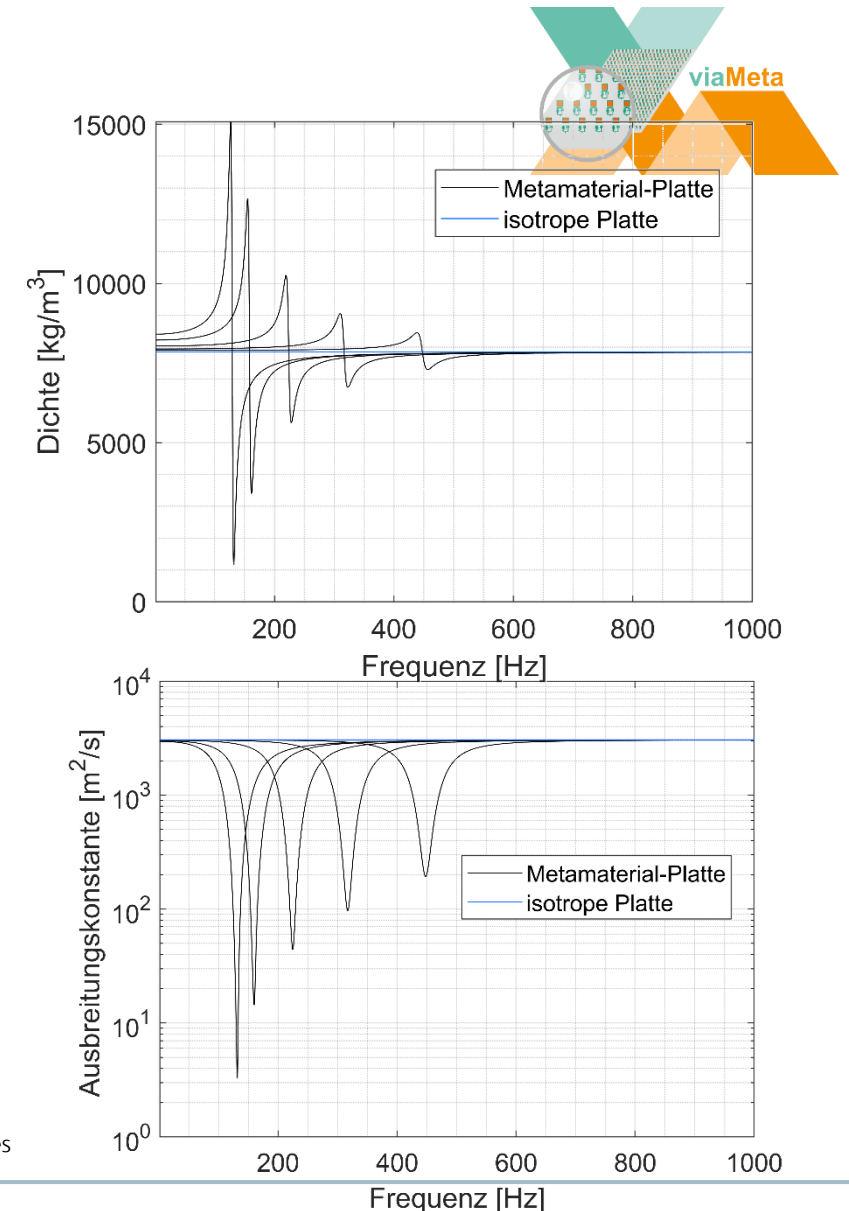
$$k = \left(\omega^2 \left(\frac{\rho_{eff} h}{D} \right) \right)^{\frac{1}{4}} \quad \xrightarrow{c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}} \quad c_g = 2 \cdot \left(\omega^2 \left(\frac{D}{\rho_{eff} h} \right) \right)^{\frac{1}{4}}$$

- Strukturdämpfungskoeffizient

$$\eta_{eff} = - \frac{Im(k_f^4)}{Re(k_f^4)} \quad (2)$$

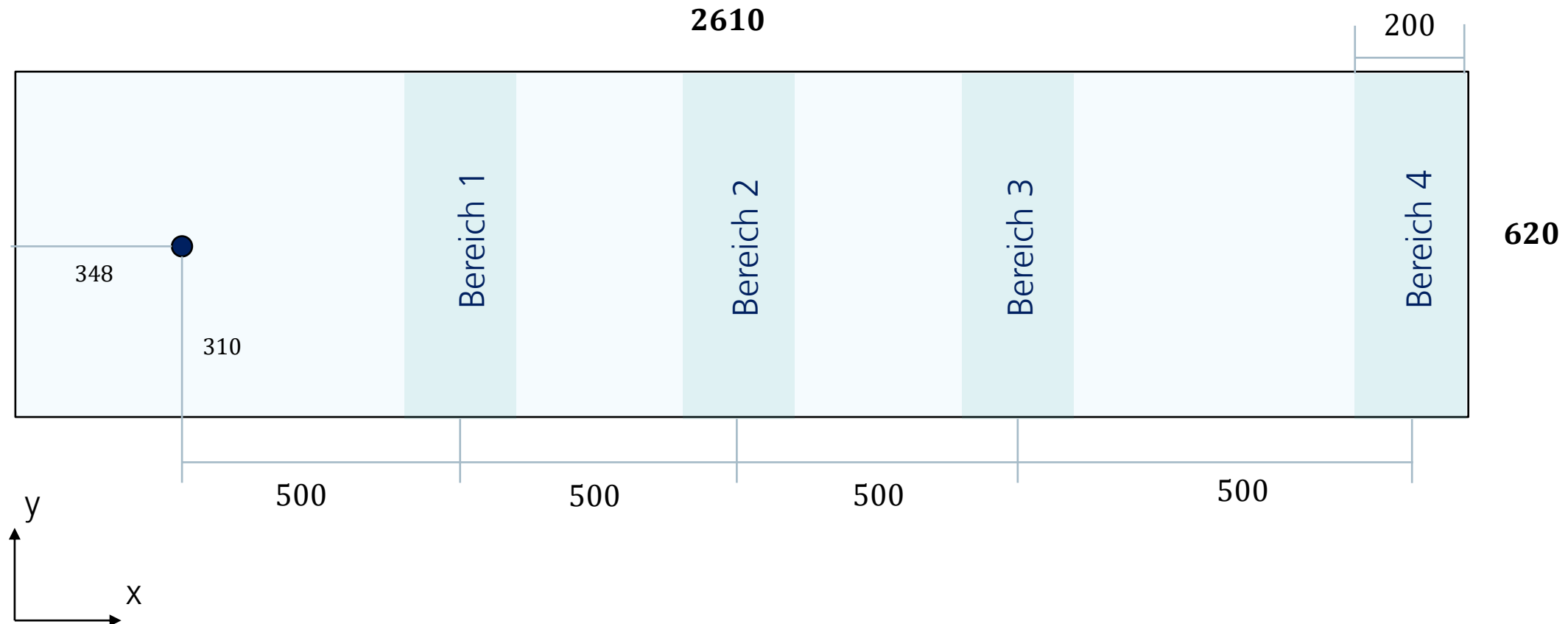
(1) V.E. Gusev and O.B. Wright, Double-negative flexural acoustic metamaterial

(2) F. Marchetti, K. Ege, et.al., Structural damping definitions of multilayered plates



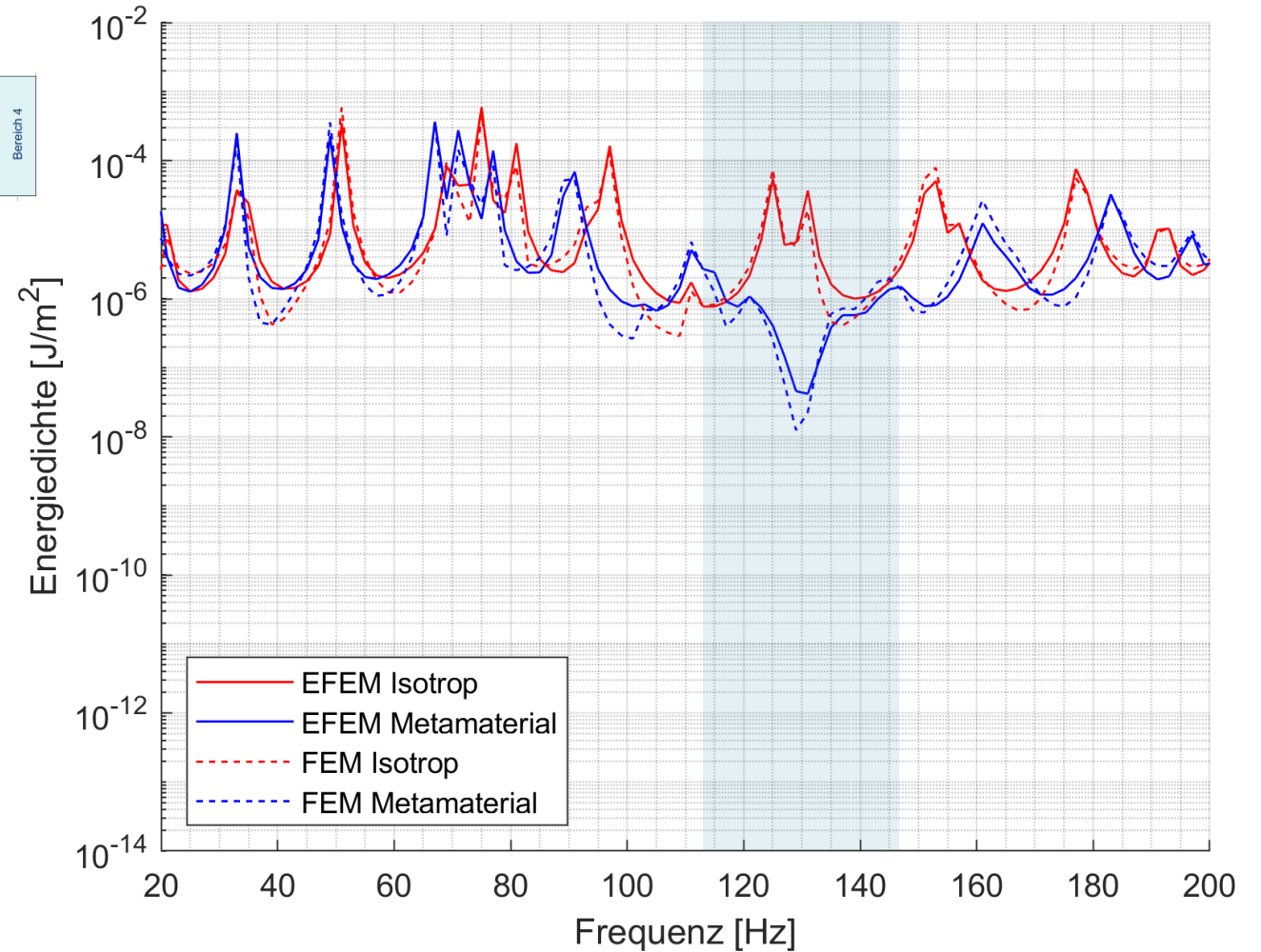
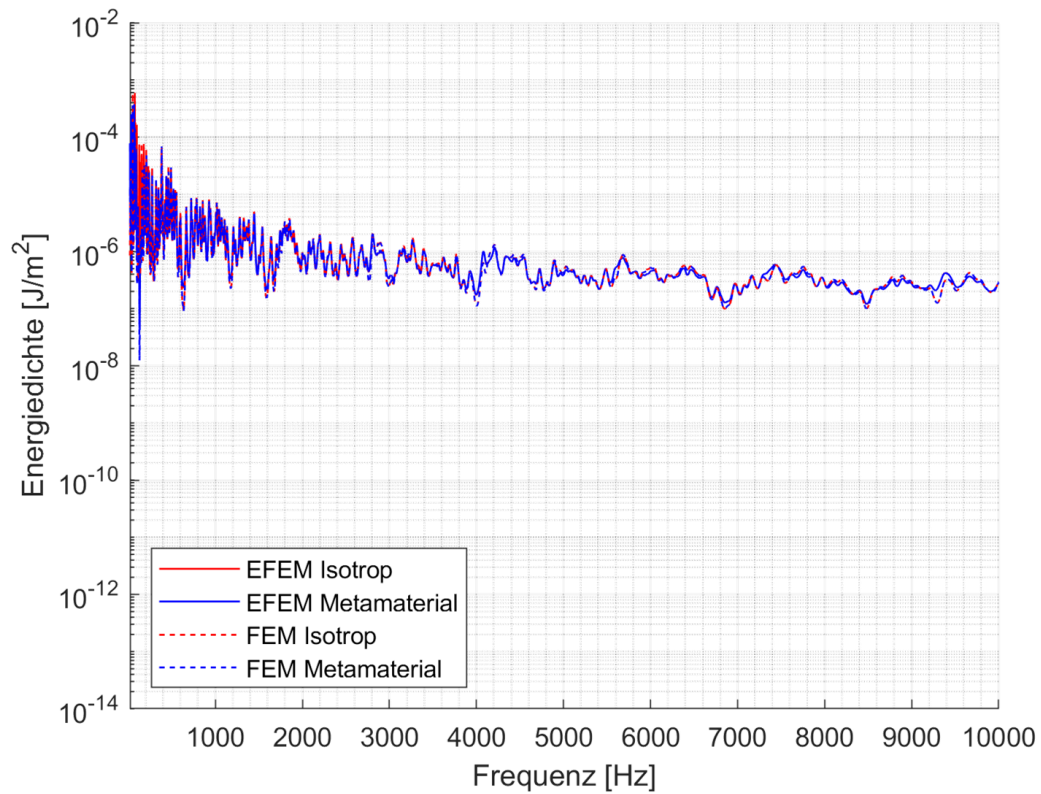
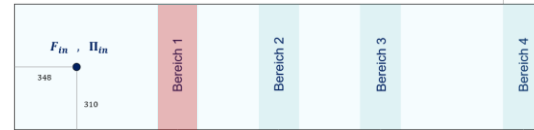
Integration von Metamaterialien in die EFEM

Numerisches Beispiel (Platte)



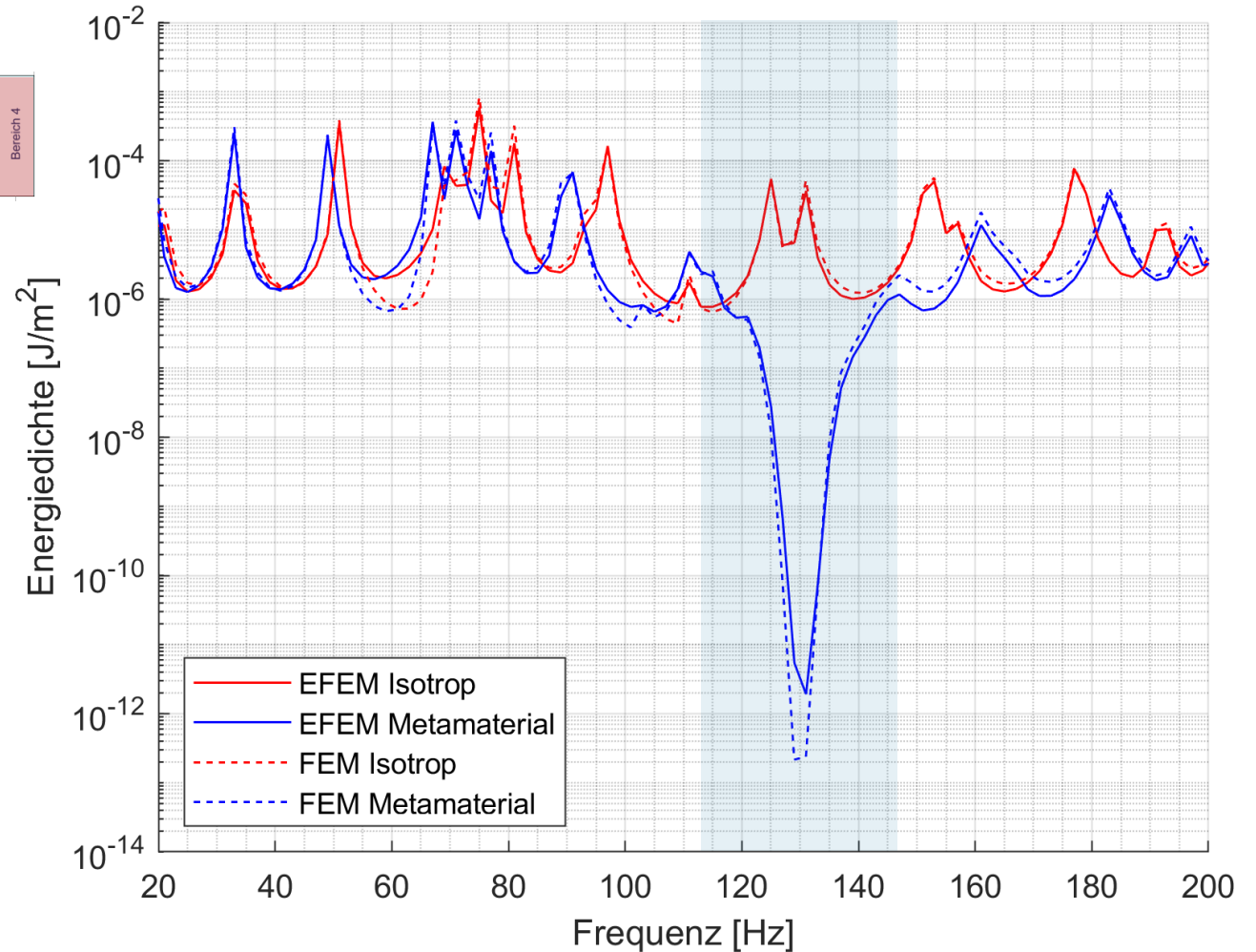
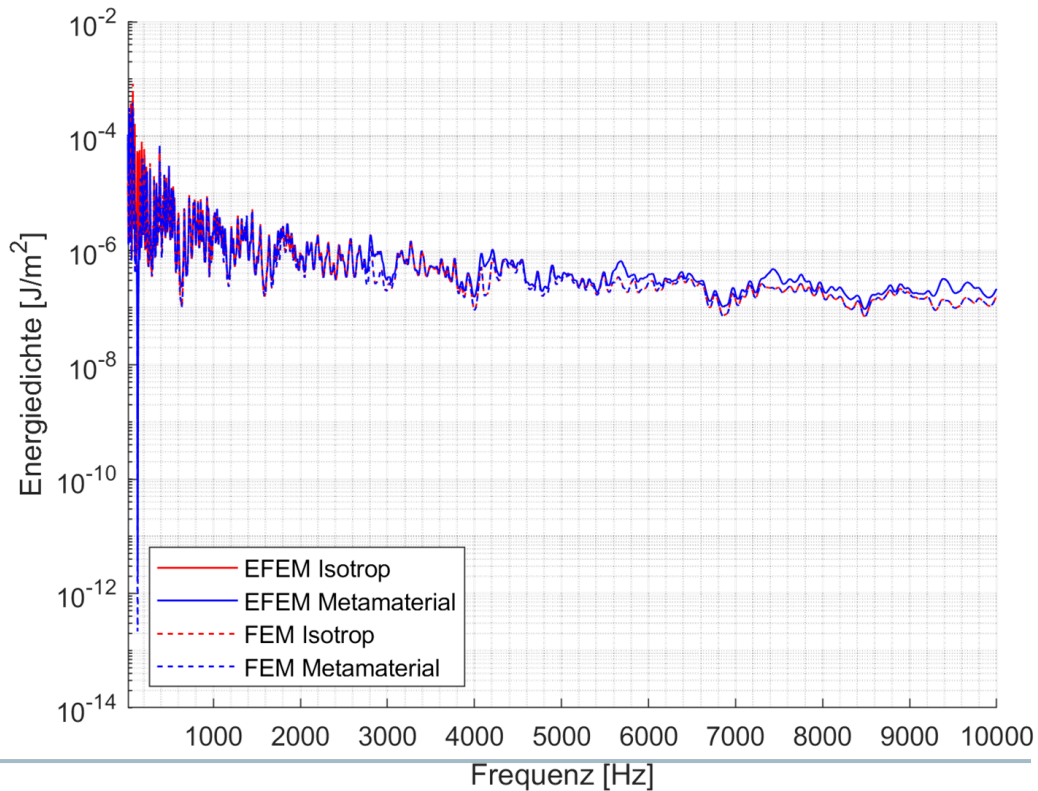
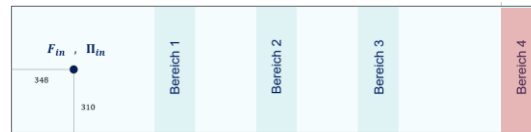
Integration von Metamaterialien in die EFEM

Numerisches Beispiel - Ergebnis Bereich 1



Integration von Metamaterialien in die EFEM

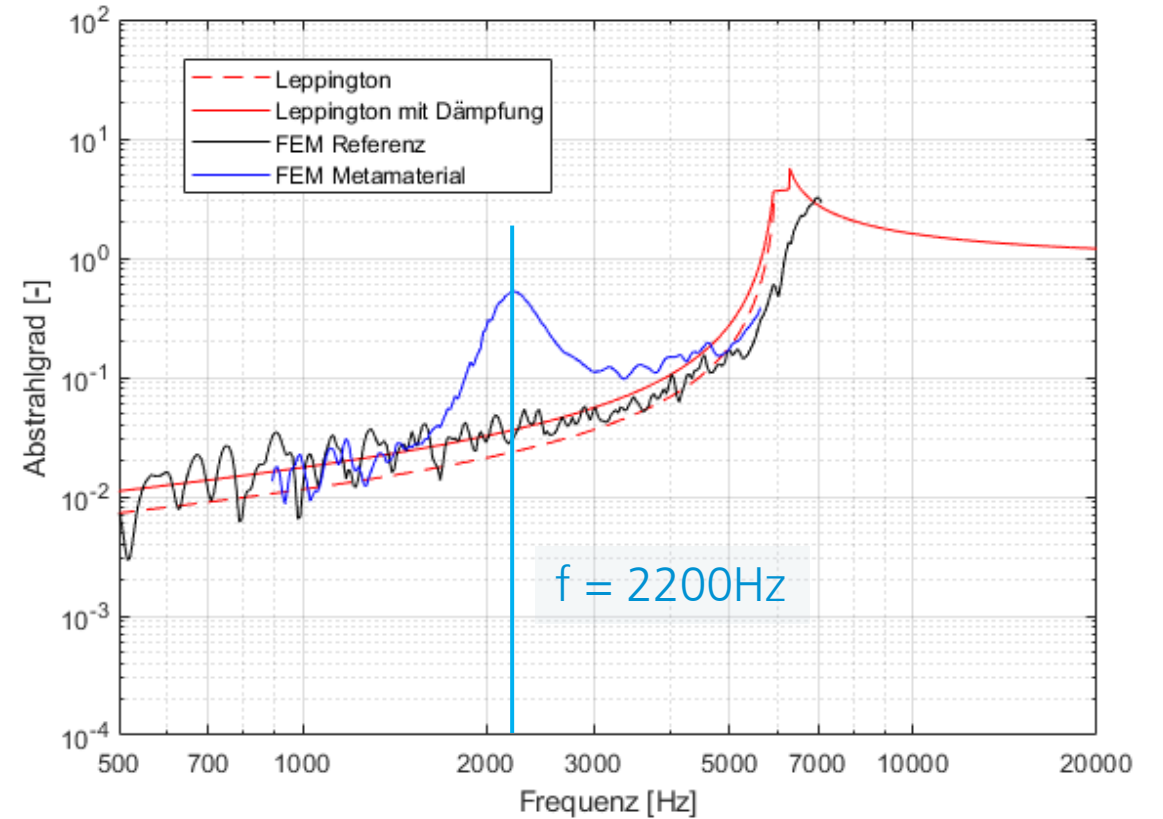
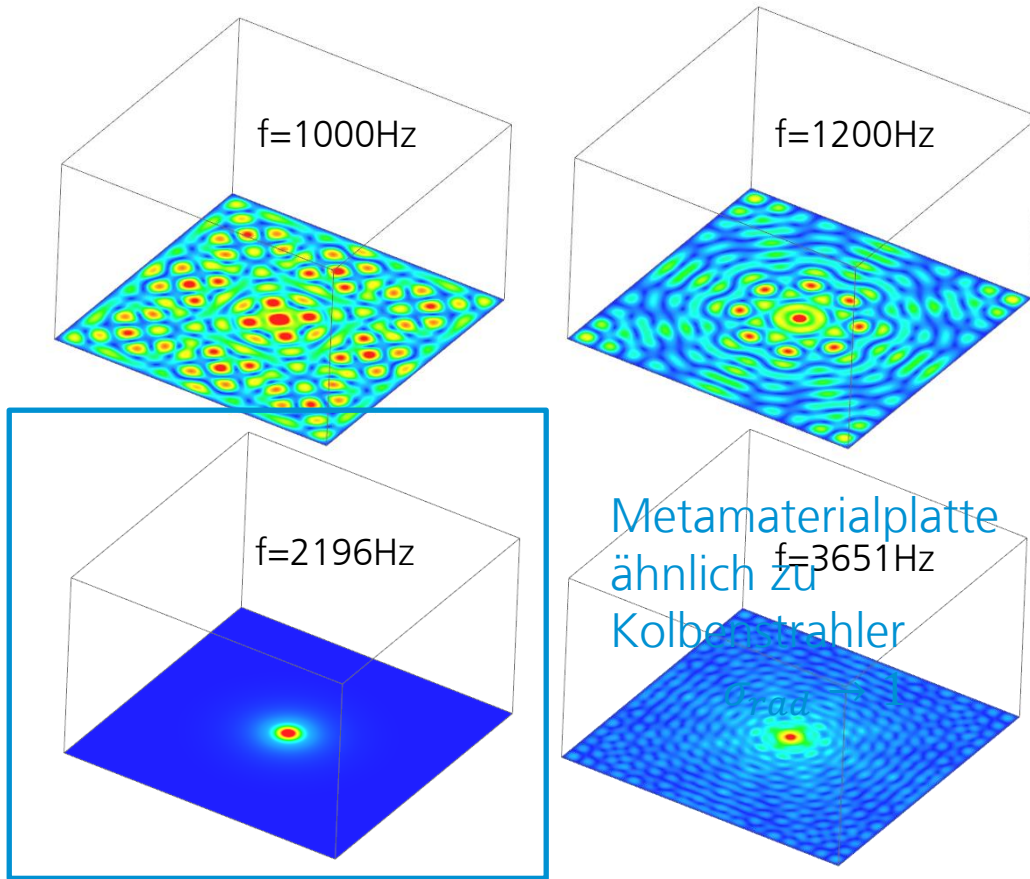
Numerisches Beispiel - Ergebnis Bereich 4



Abstrahlgrad von Metamaterialien



[mm/s]



EFEM-Metamaterialien – Anwendung Fahrzeug

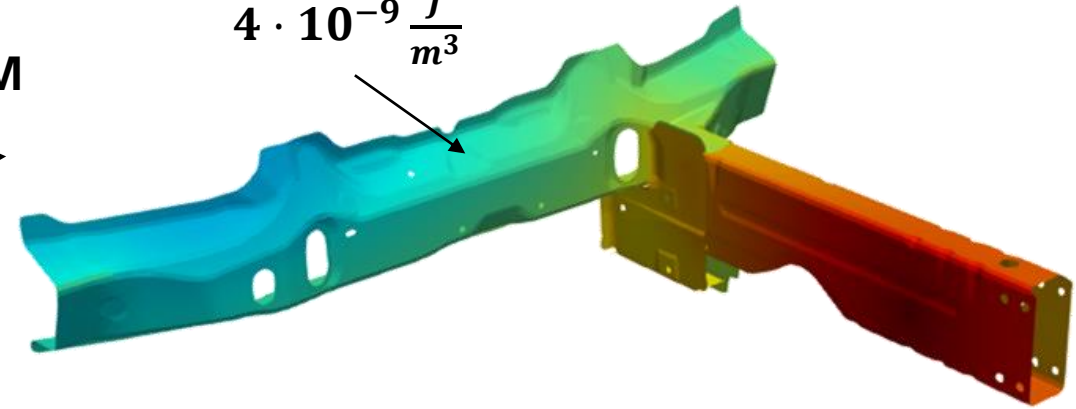
Energiedichte Biegewelle – $f = 5\text{kHz}$



Energiedichte Biegewelle
 $f = 5000\text{Hz}$

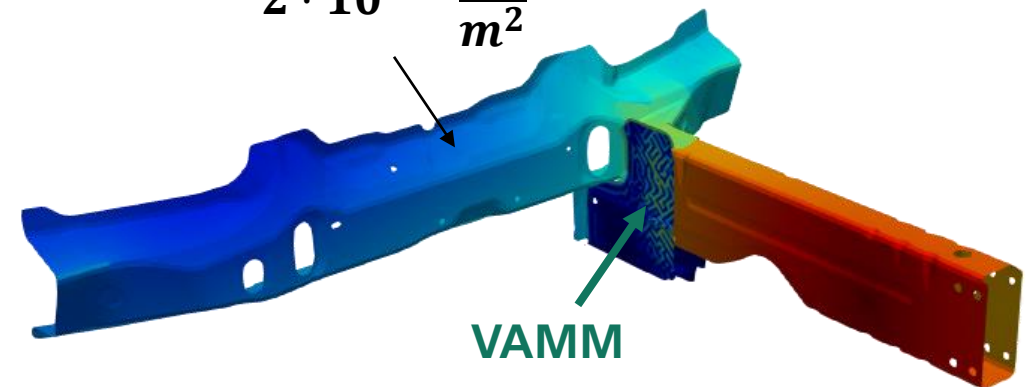
Ohne VAMM

$$4 \cdot 10^{-9} \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$



Mit VAMM

$$2 \cdot 10^{-11} \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$$

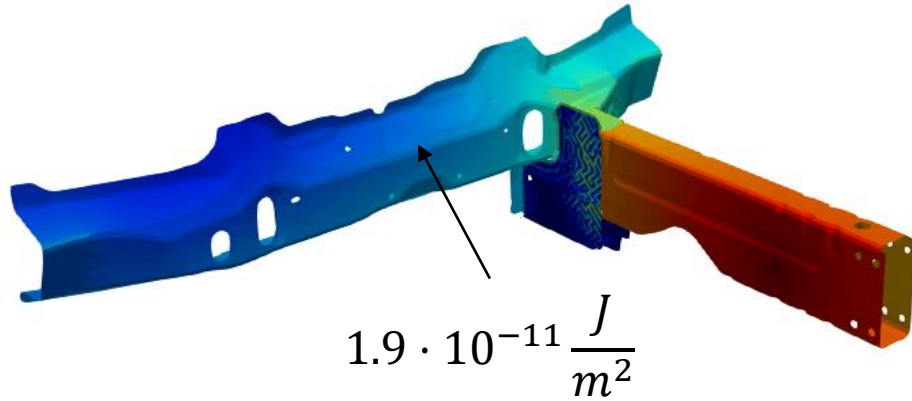


EFEM-Metamaterialien – Anwendung Fahrzeug

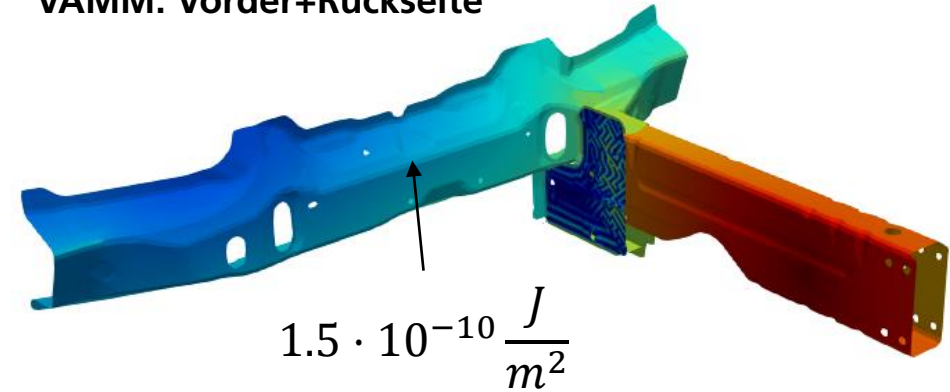
Energiedichte – $f = 5\text{kHz}$



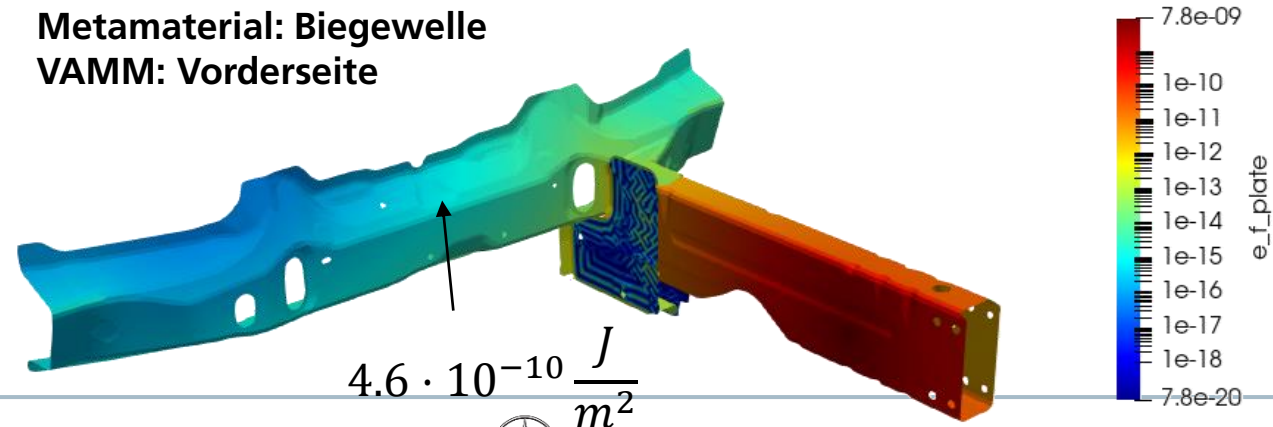
Metamaterial: Biege-, Scher-, Longitudinalwelle
VAMM: Vorder+Rückseite



Metamaterial: Biegewelle
VAMM: Vorder+Rückseite



Metamaterial: Biegewelle
VAMM: Vorderseite



EFEM - Gesamtfahrzeugsimulation

Serienfahrzeug-Simulation

- 7,7 Millionen Knoten
- 10,1 Millionen Elemente
- Rund 30 Millionen Freiheitsgrade
- Anregung mit 1 W am Tragrahmen

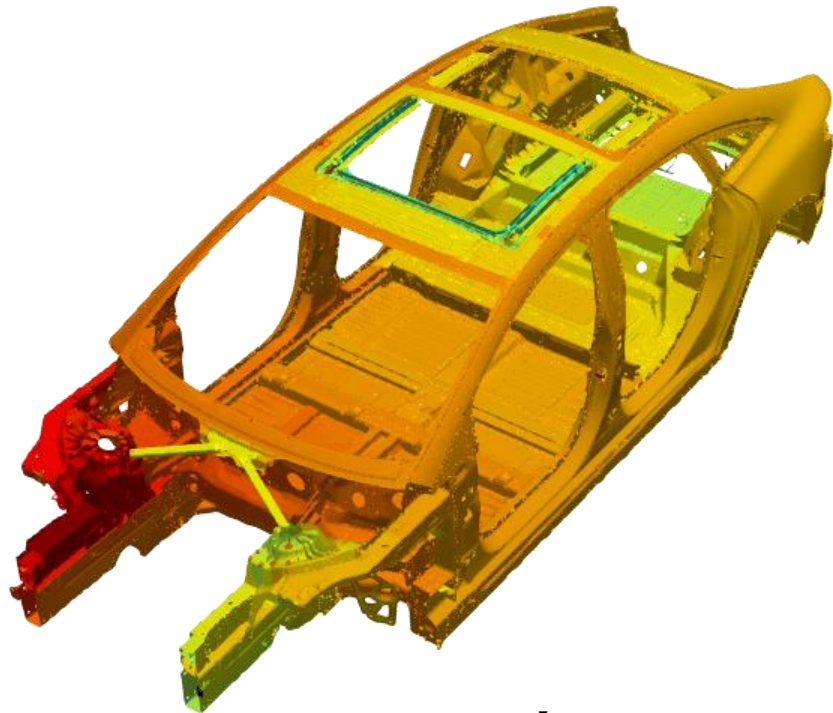


EFEM - Gesamtfahrzeugsimulation

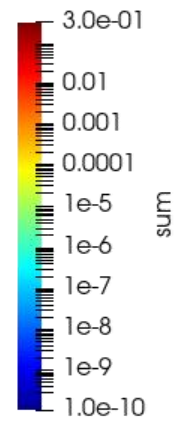
Vergleich zur FEM $f = 1400$ Hz



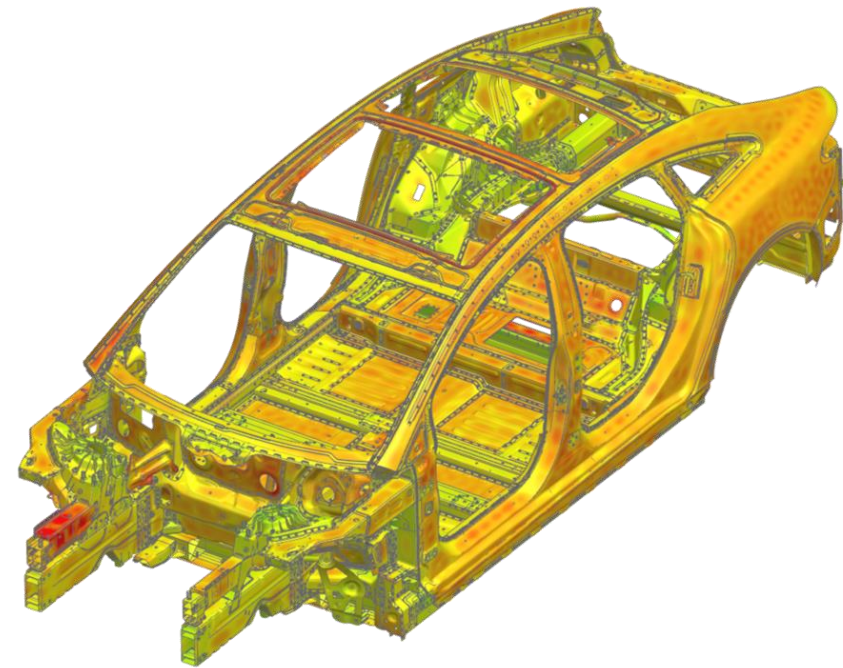
EFEM



Energiedichte $\frac{J}{m^3}$



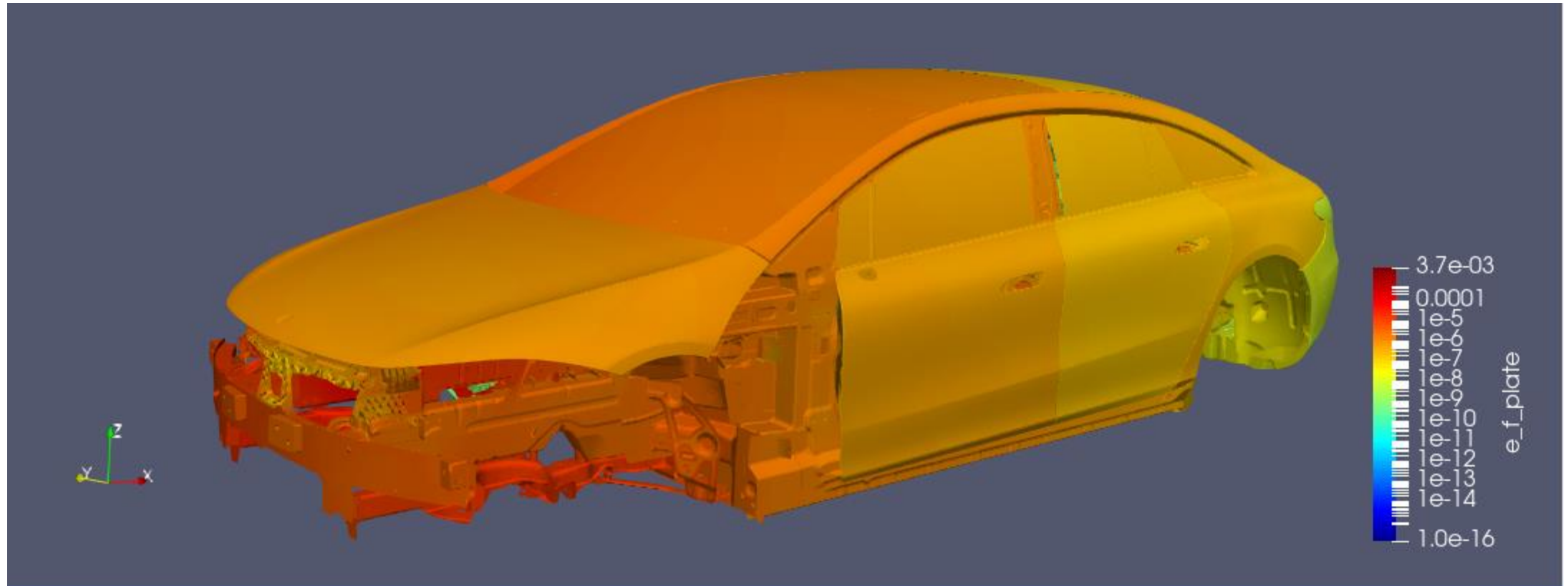
FEM



Energiedichte $\frac{J}{m^3}$

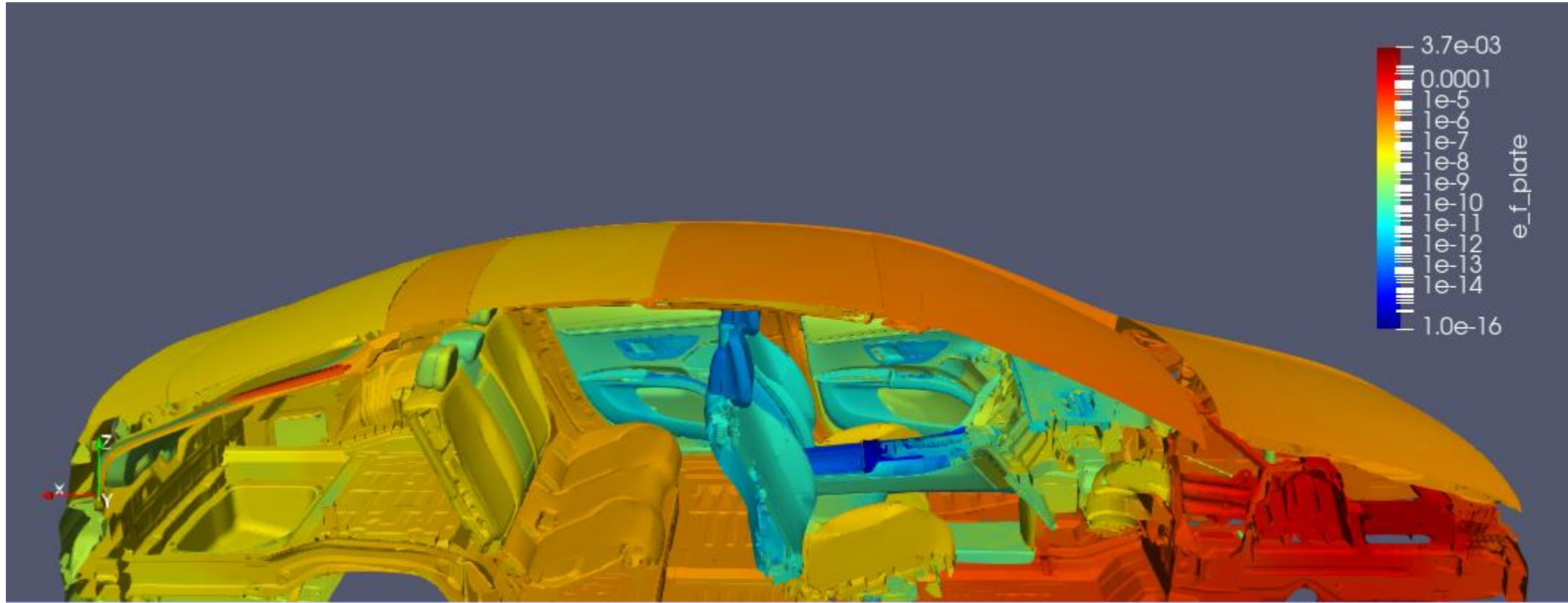
EFEM - Gesamtfahrzeugsimulation

Serienfahrzeug-Simulation Biegewelle bei 8 kHz



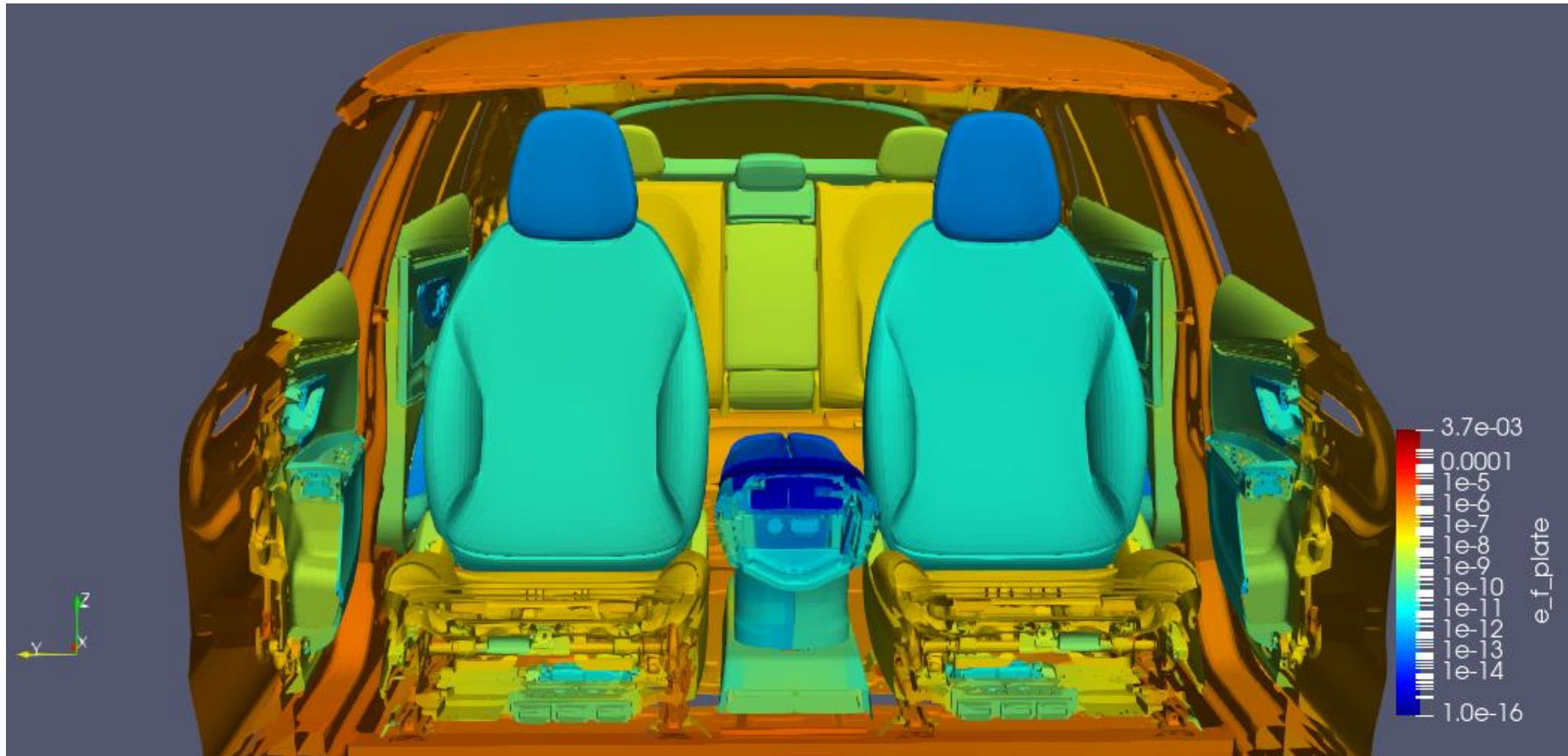
EFEM - Gesamtfahrzeugsimulation

Serienfahrzeug-Simulation Biegequelle bei 8 kHz



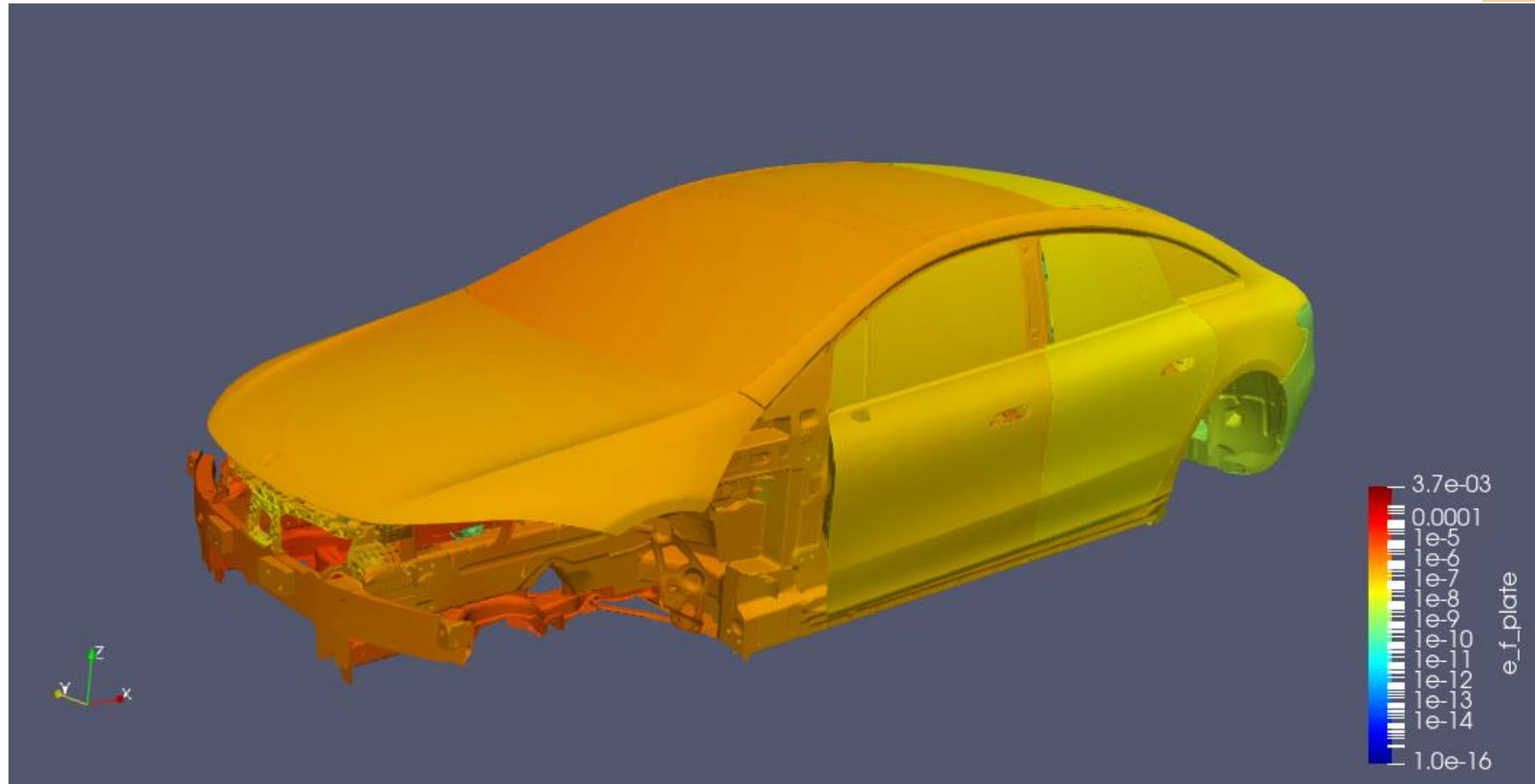
EFEM - Gesamtfahrzeugsimulation

Serienfahrzeug-Simulation Biegewelle bei 8 kHz



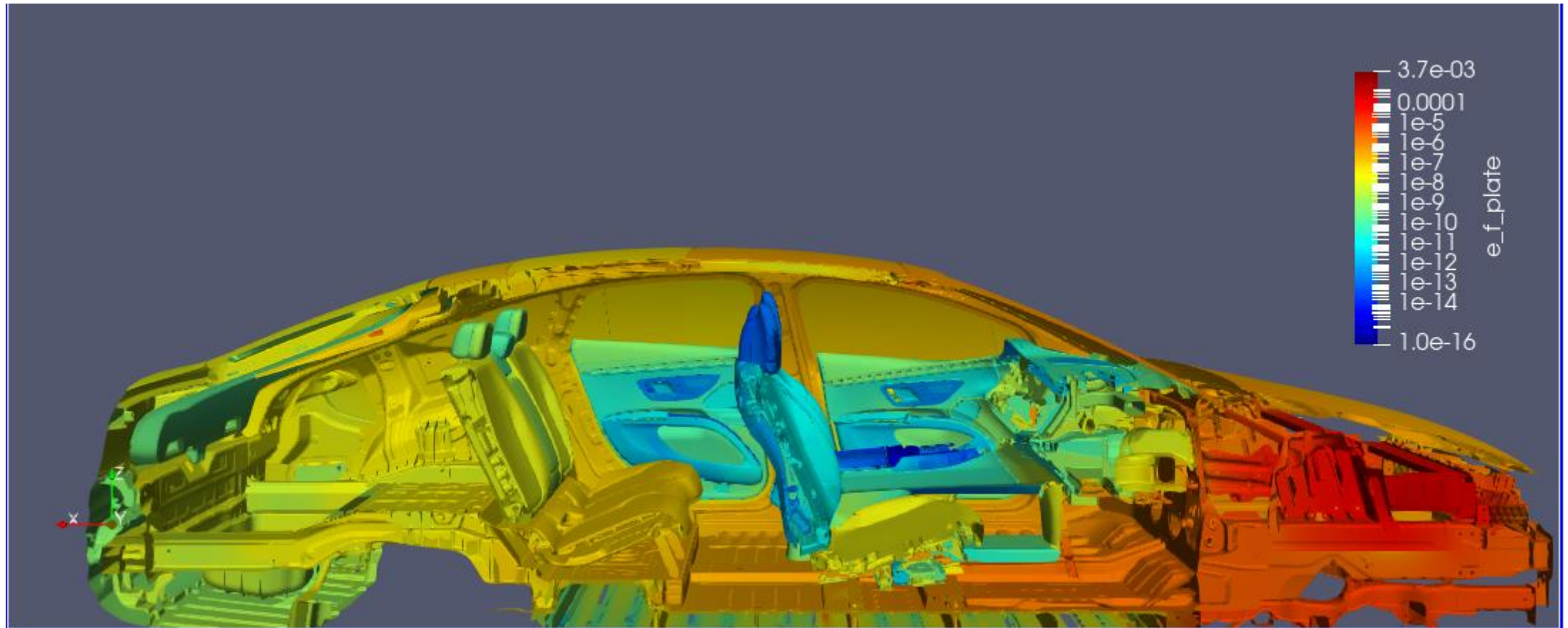
EFEM - Gesamtfahrzeugsimulation

Serienfahrzeug-Simulation Biegequelle bei 12 kHz



EFEM - Gesamtfahrzeugsimulation

Serienfahrzeug-Simulation Biegewelle bei 12 kHz



EFEM - Gesamtfahrzeugsimulation

Serienfahrzeug-Simulation Biegequelle bei 12 kHz



Resumé



- Energiebasierte Finite Element-Methode ist attraktive Alternative für hochfrequente Schwingungen
- Ansatz für Metamaterialien konnte erfolgreich umgesetzt werden
- Herausforderung den Abstrahlgrad besser zu modellieren





Mercedes-Benz



Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Mercedes-Benz



LBF