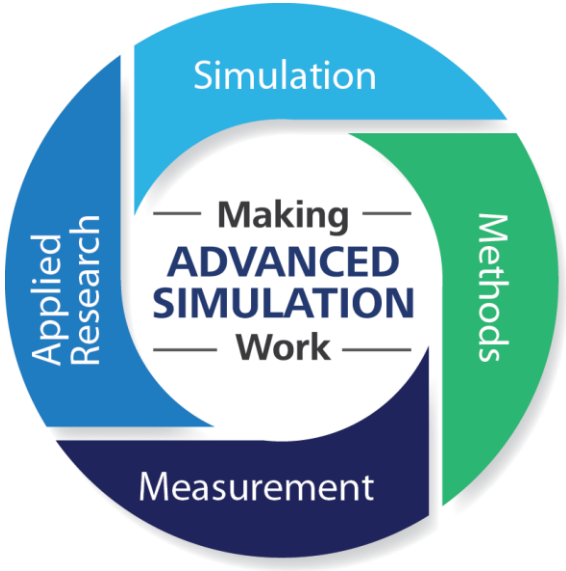
Aktormodellierung und –reduktion im Rahmen von LeichtFahr

… oder wie kommen große FE-Modelle in die Systemsimulation



Symposium Leichtbau und NVH-Optimierung im Fahrzeugbau
23. Oktober 2019 – Fraunhofer LBF, Darmstadt

J. Grabinger, H. Landes, M. Meiler
SIMetris GmbH

Motivation

Finite-Elemente-Simulation (FEA)

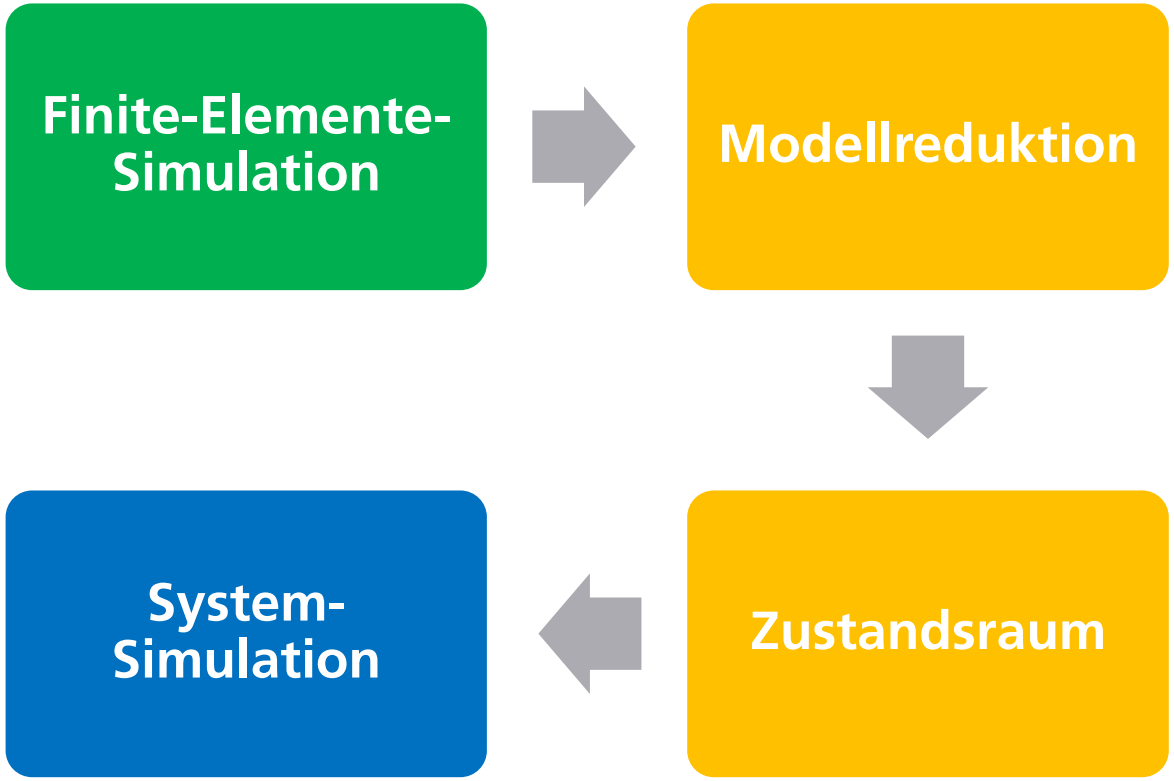
Vorteile	Nachteile
Optimierungsmöglichkeit	Gesamtmodell Simulation häufig nicht möglich
Gezielte Systemanalyse und Extraktion von Verbesserungspotential	Hoher Speicherbedarf und große Datenmengen
Abbildung der Realität im Rahmen der verwendeten Formulierungen	Lange Rechenzeiten

System-Simulation

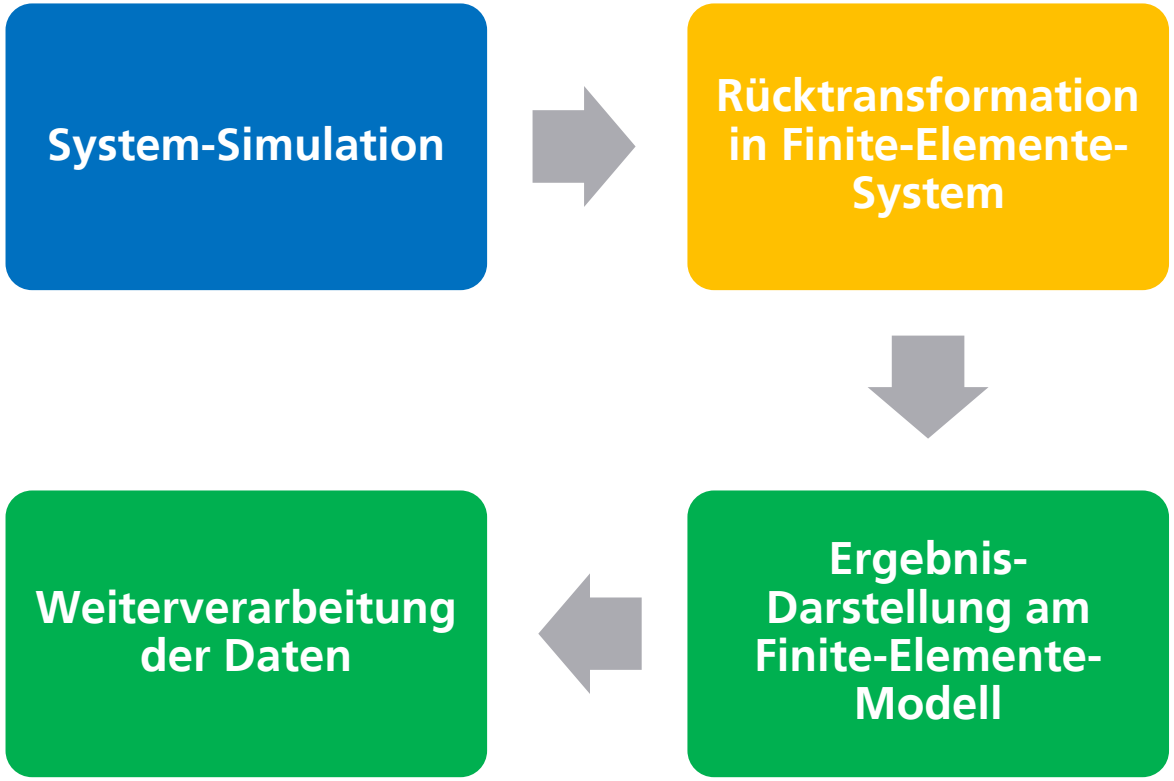
Vorteile	Nachteile
Geringer Speicherbedarf	Bedingt Komponenten-Optimierung möglich
Schnelle Rechenzeiten	Detailergebnisse nicht verfügbar
Simulation von komplexen Systemen	Vereinfachte Modellierung

Motivation

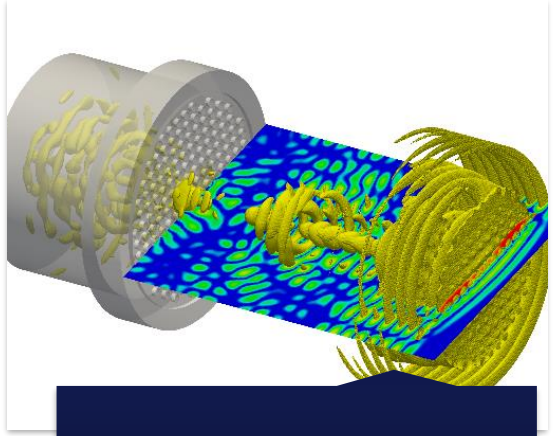
FEA in Systemsimulation nutzen



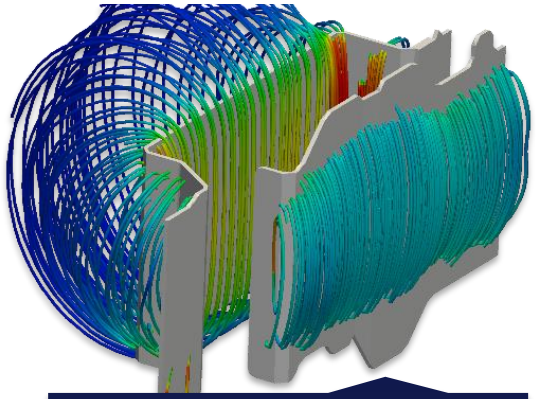
Systemsimulationsergebnisse in FEA verwenden



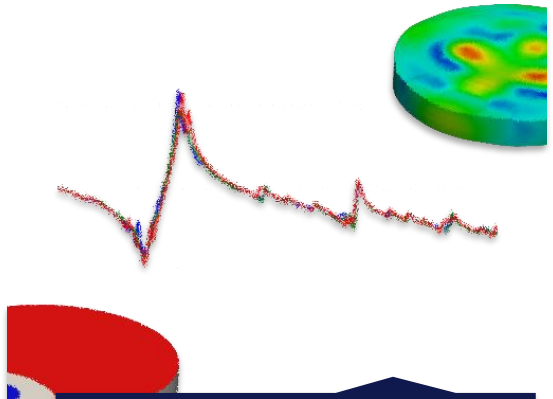
SIMetris - Expertise



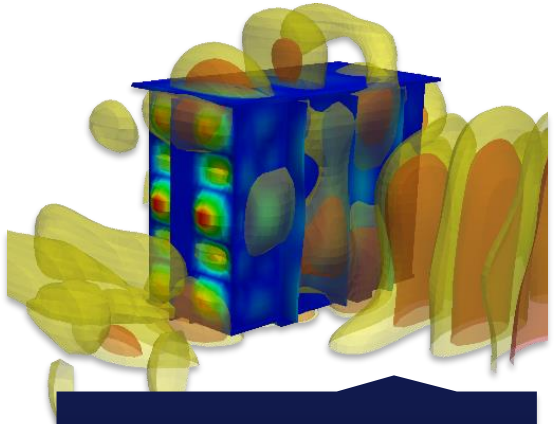
Akustik, Ultraschall



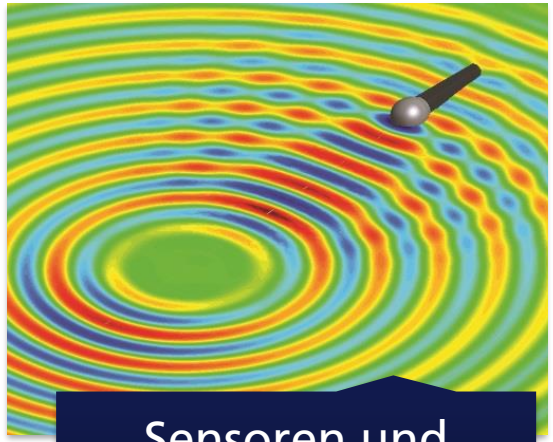
Elektromechanische Wechselwirkungen



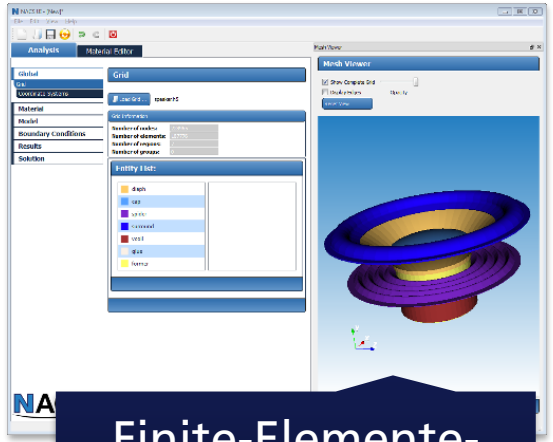
Piezoelektrische Wandler



Magnetomechanik



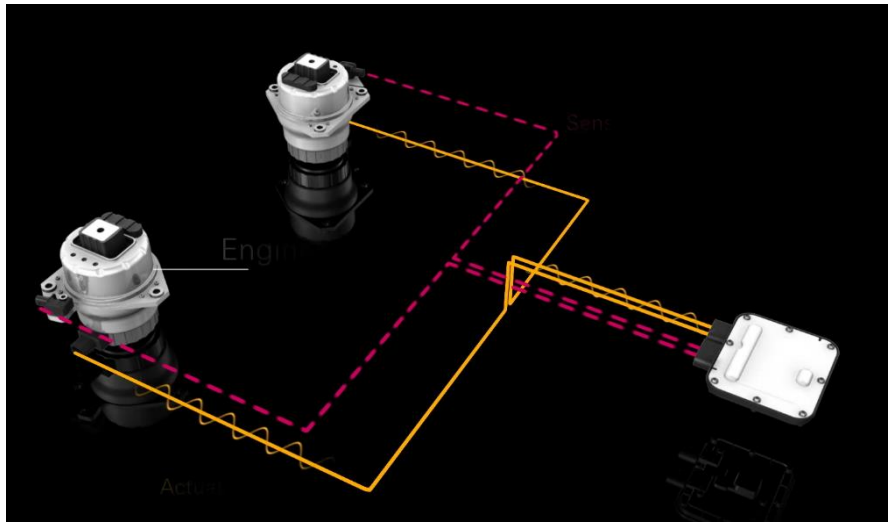
Sensoren und Aktoren



Finite-Elemente-Software NACS

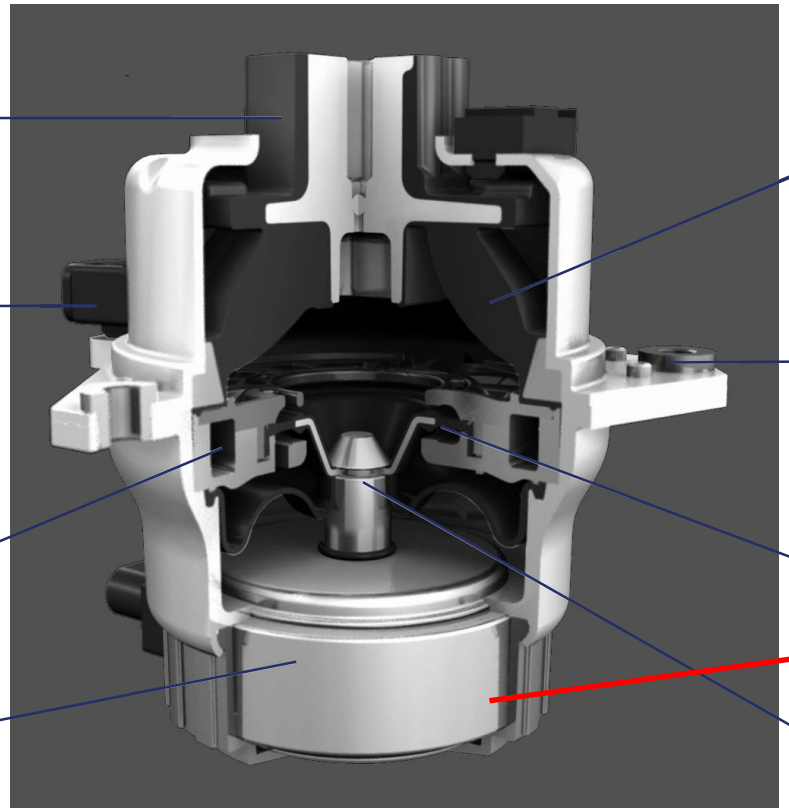
ANWENDUNGSBEISPIEL

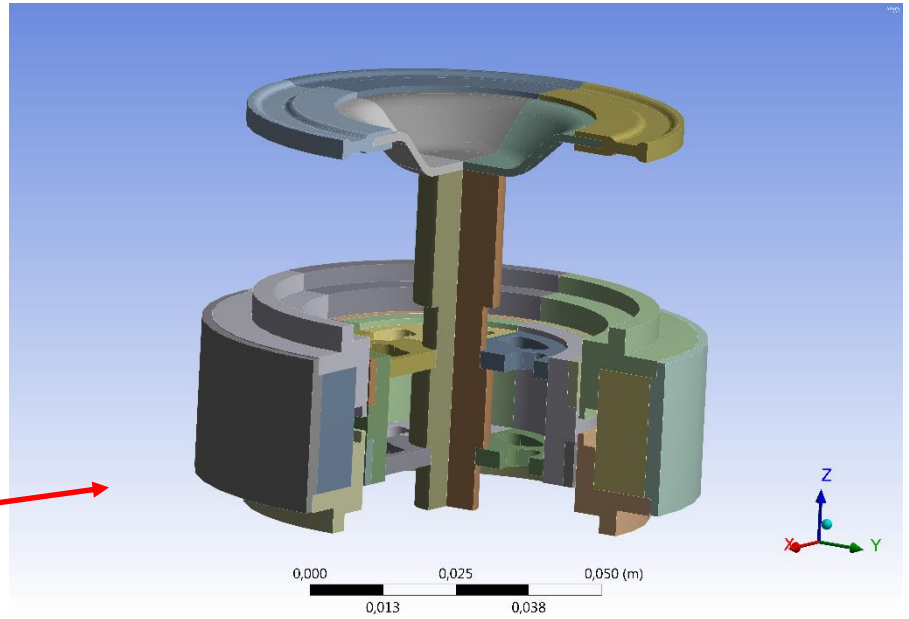
Aktives Motorlager



© Boge Elastmetall GmbH

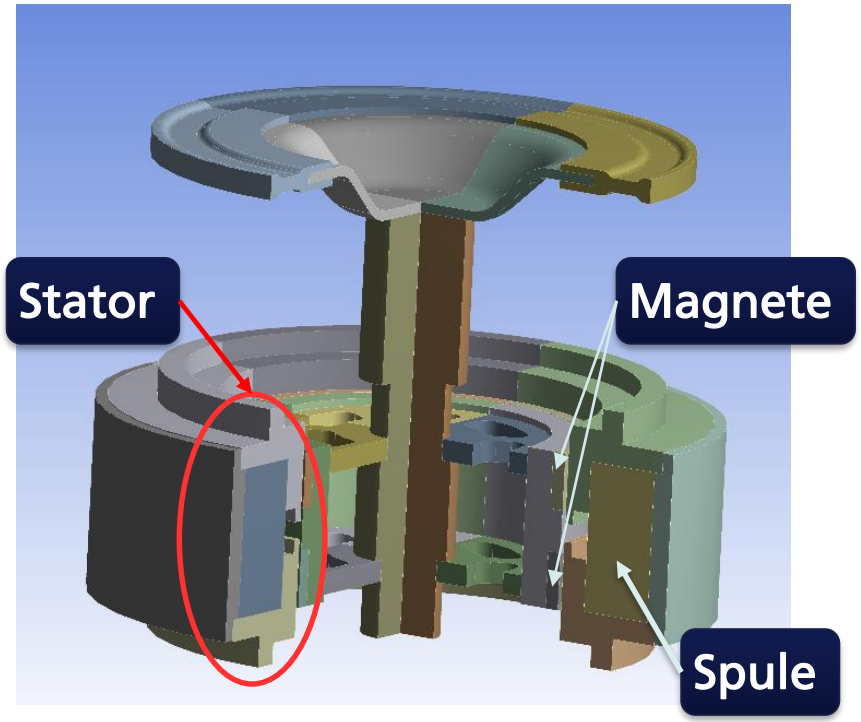
Magnetomechanisch: Aktives Motorlager



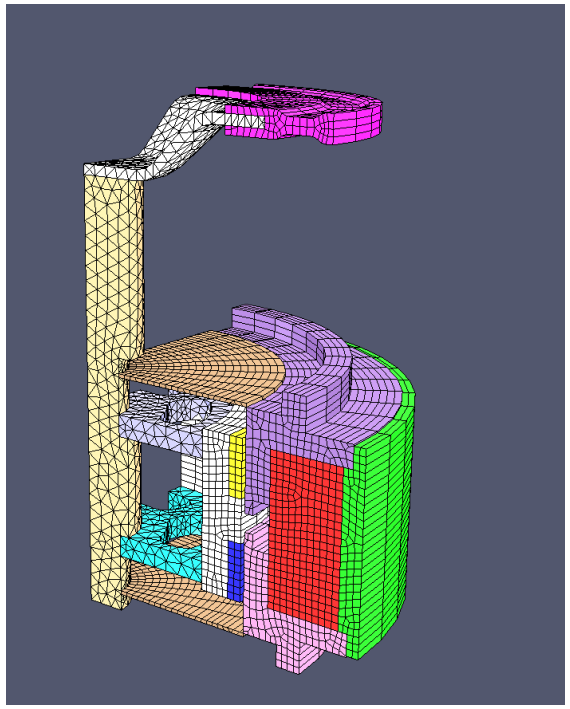


Magnetomechanische Aktorik – Aktives Motorlager

Geometrie



Gitter



Gitter ohne Luftumgebung

Magnetomechanische Aktorik – Aktives Motorlager

Messungen von Boge und ZF

ZF: Chirp-Anregung

- Frequenzen 15 – 350 Hz
- Sweep-Time ca. 10 s

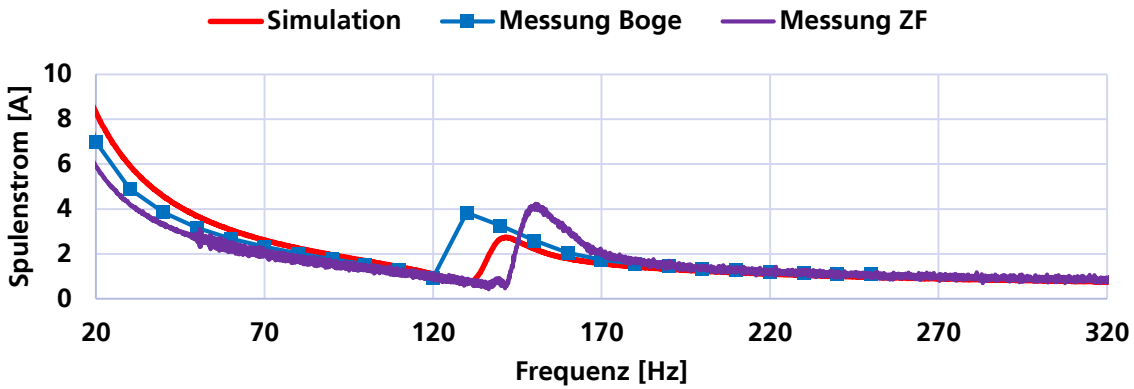
Boge: Sinus-Anregung

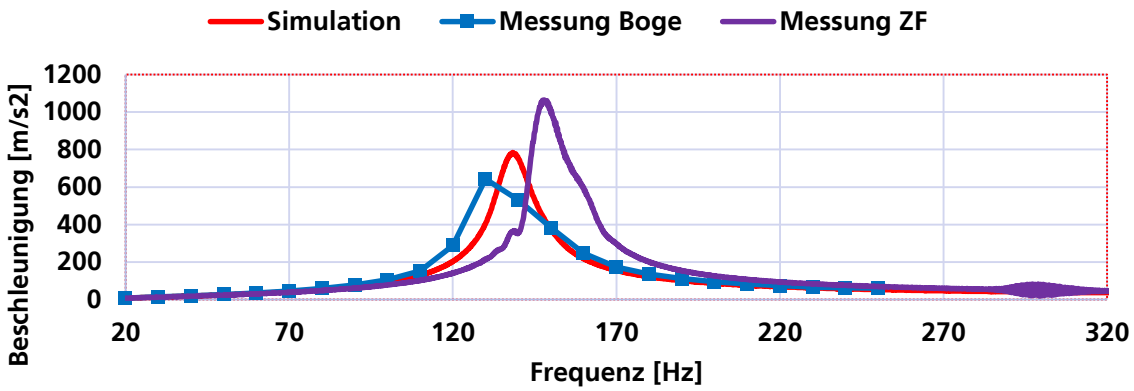
- Anregung für diskrete Frequenzen
- Eingeschwungener Zustand

Validierung

- Beschleunigung und Stromkurven zeigen gute Übereinstimmung

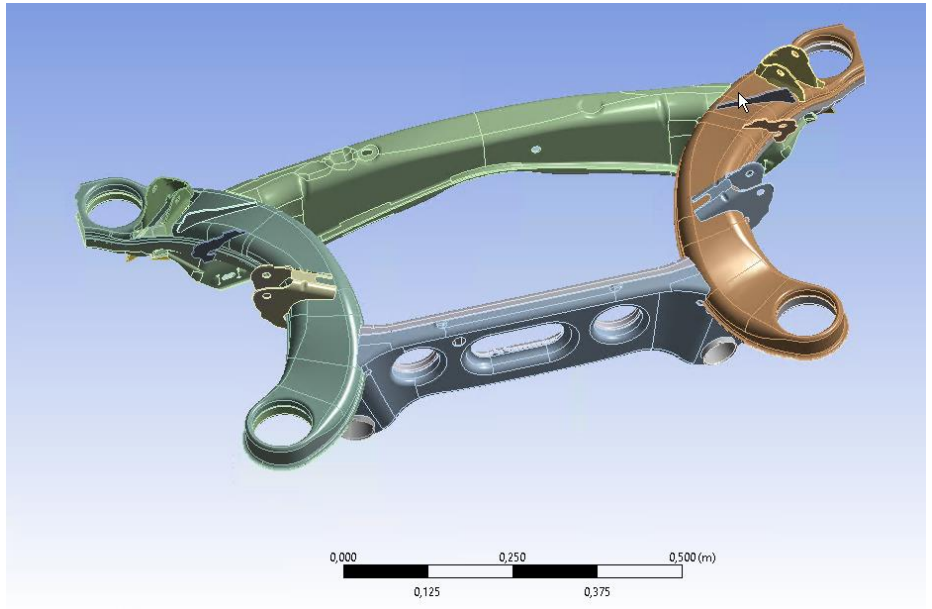
Vergleich Messung / Simulation





ANWENDUNGSBEISPIEL

Hinterachsfahrschemel mit Piezo-Patches



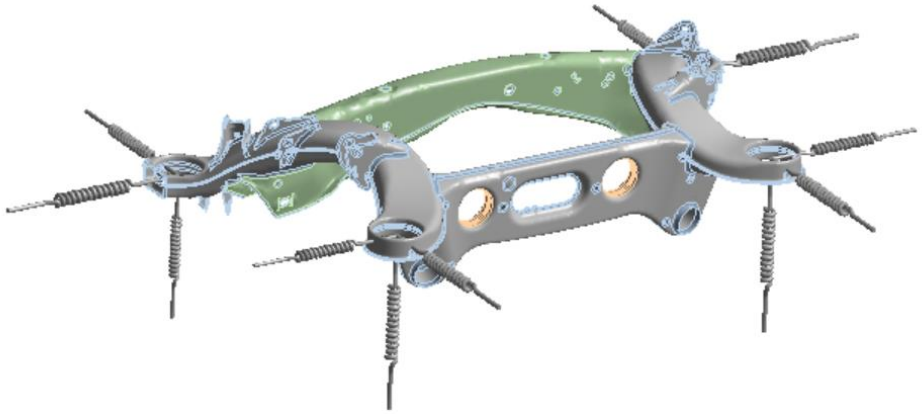
Hinterachsfahrschemel

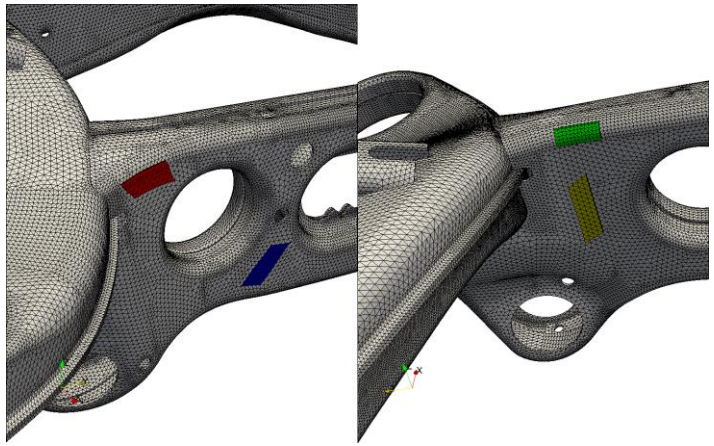
Modell

- Tetraeder Gitter (Novicos)
  - Kein Geometrie-Modell
  - Piezo-Patch durch Extrudieren von Oberflächen-Elementen
  - Keine Gittervariationen möglich ohne großen Aufwand

Modellerweiterung für Regelung

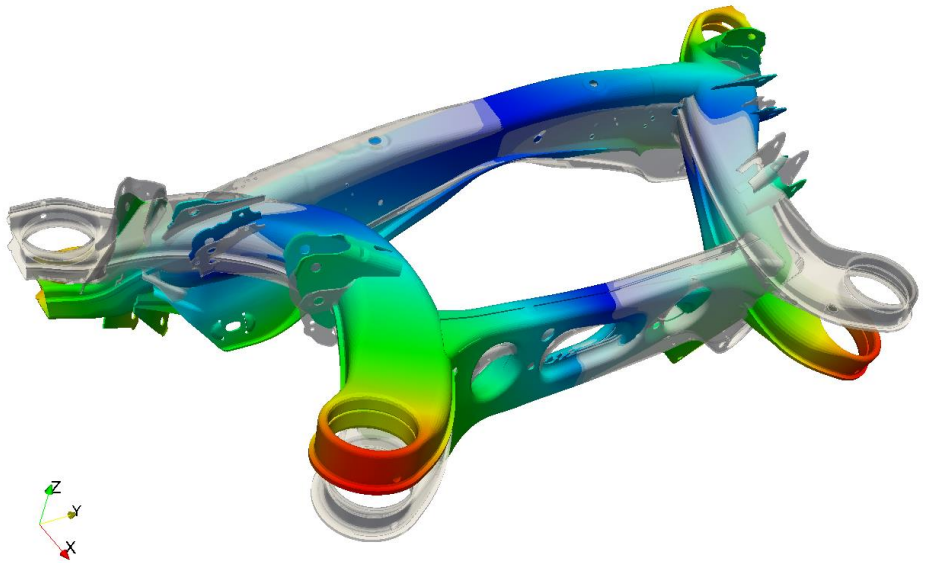
- Federelemente an den 4 Lagerpositionen
  - Masselos, verlustfrei
- Reduktion mittels modaler Reduktion
- Integration in AdaptroSim möglich





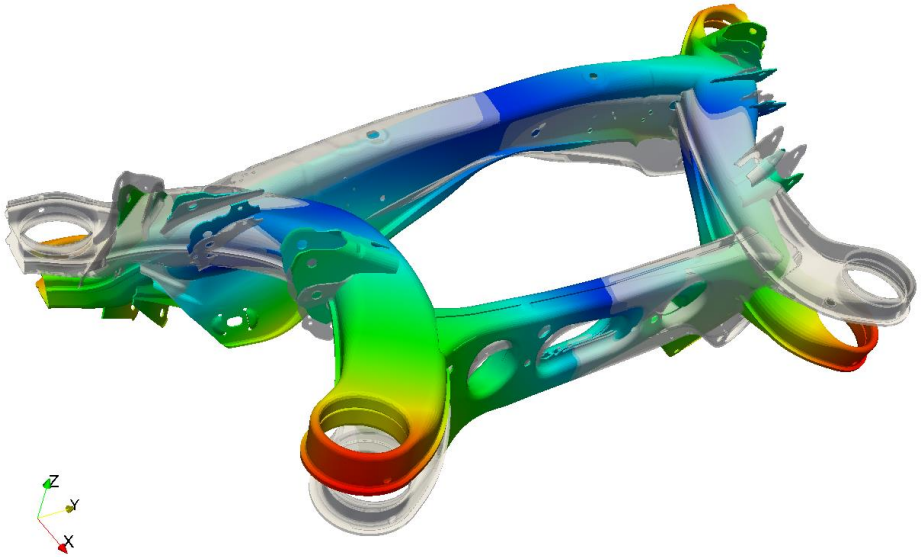
Hinterachsfahrschemel – Moden für unterschiedliche Randbedingungen

Modell frei, ohne Federelemente



Frequency 149.6

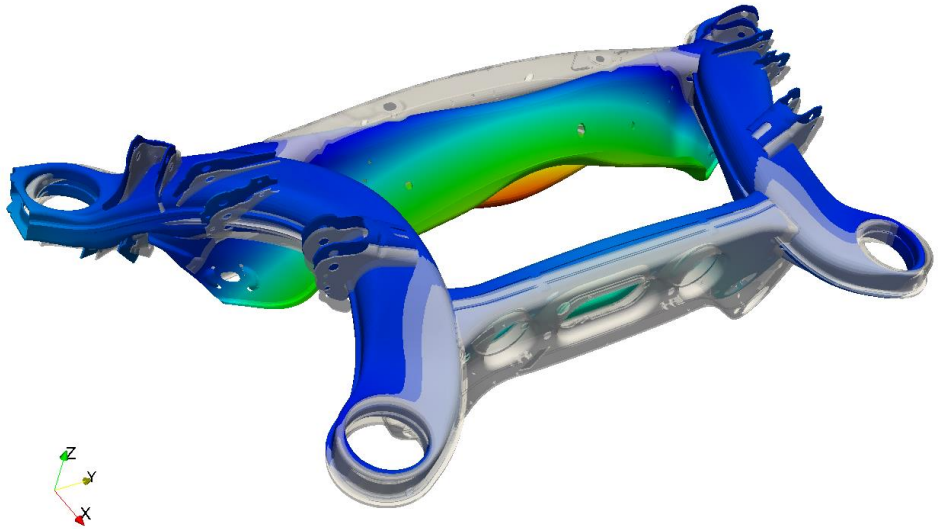
Modell mit Federelementen



Frequency 196.7

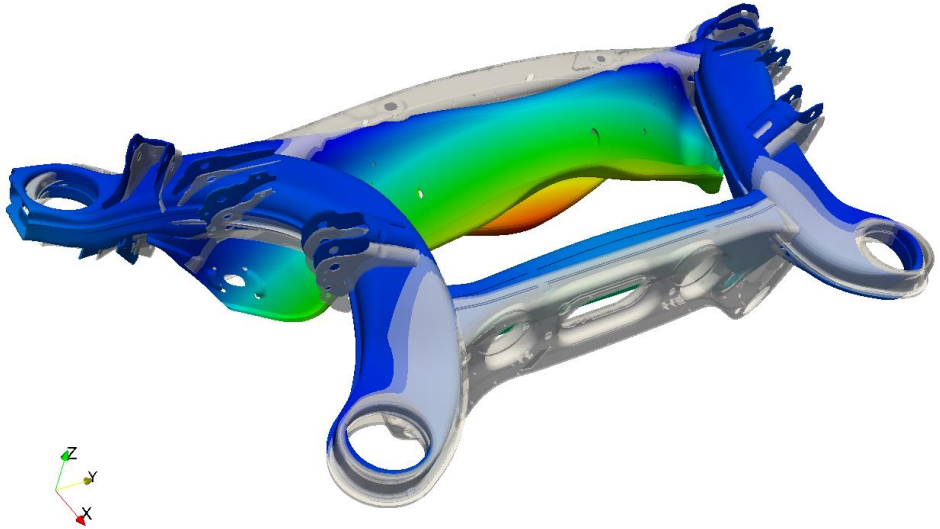
Hinterachsfahrschemel – Moden für unterschiedliche Randbedingungen

Modell frei, ohne Federelemente



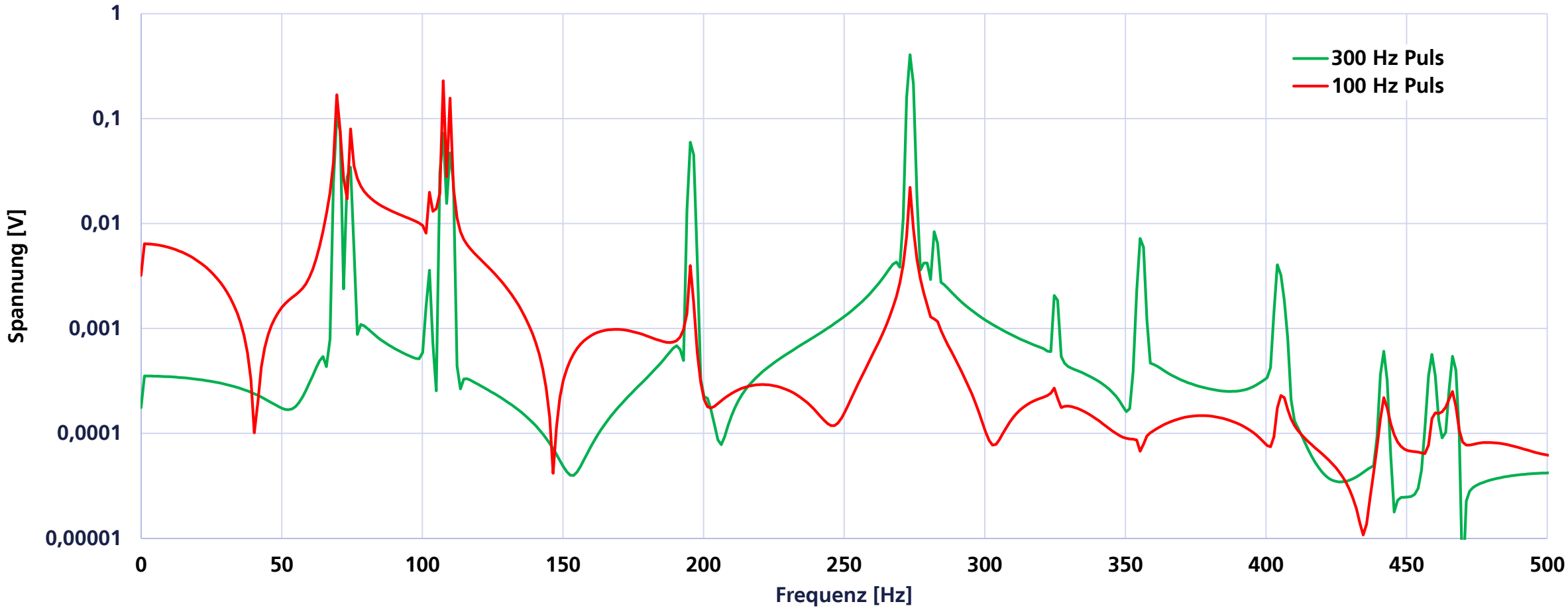
Frequency 283.5

Modell mit Federelementen



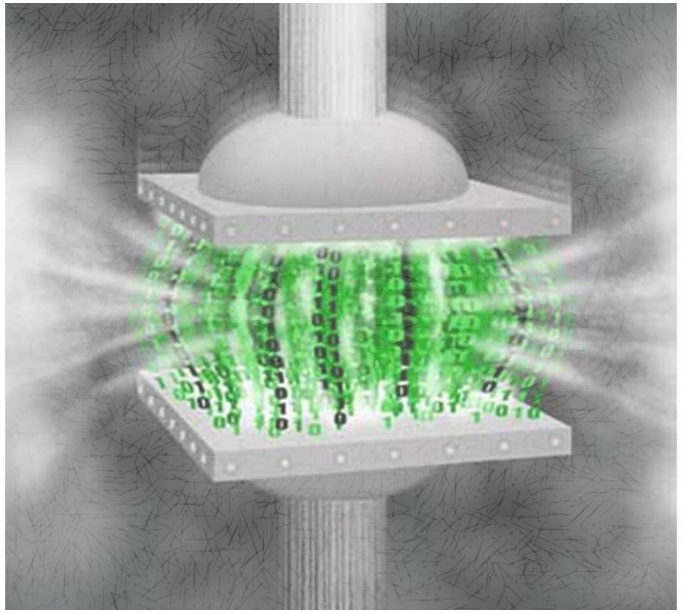
Frequency 285.0

Potential an Patch 1, Spektralverlauf



ELEKTROMECHANISCHE WANDLER

Modell Reduktion



Modellreduktion

Reduktionsverfahren

Modale Superposition

- Einsetzbar falls Eigenfrequenz-Formulierung für das gekoppelte Problem existiert
- Güte der Reduktion hängt ab von den erfassten Eigenmoden

Krylov – Verfahren

- Approximation der Übertragungsfunktion
- Güte abhängig von der Krylov-Ordnung
- Implementierung für partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung
- Block-Arnoldi-Algorithmus
- Second Order Arnoldi Algorithmus (SOAR)
- Two-level Orthogonal Arnoldi Algorithmus (TOAR)
- Single Input Single Output (SISO)
- Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Anwendungsgebiete

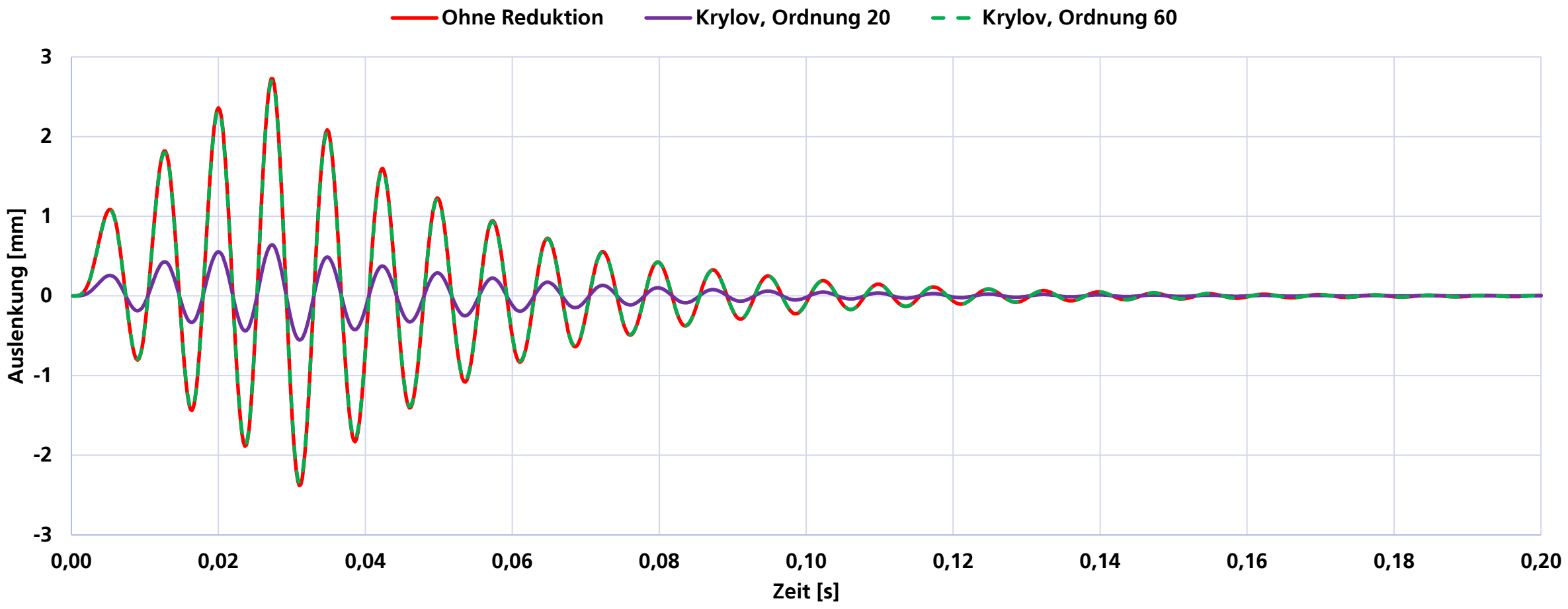
Piezoelektrik

- Modale Superposition
- Statische „Moden“ zur Beschreibung des elektrostatischen Feldes in Piezokeramiken

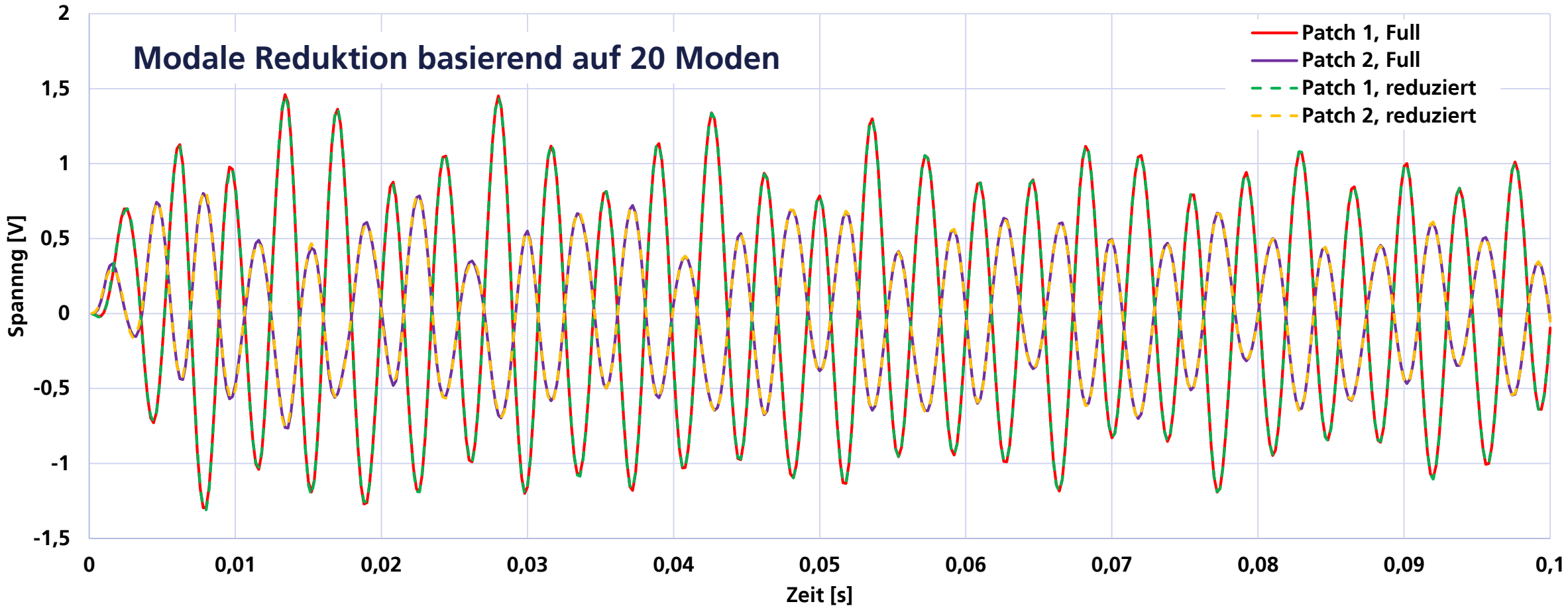
Magneto-Mechanik

- Krylov-Verfahren
- Direkte Physikkopplung (Kopplungsmatrix)

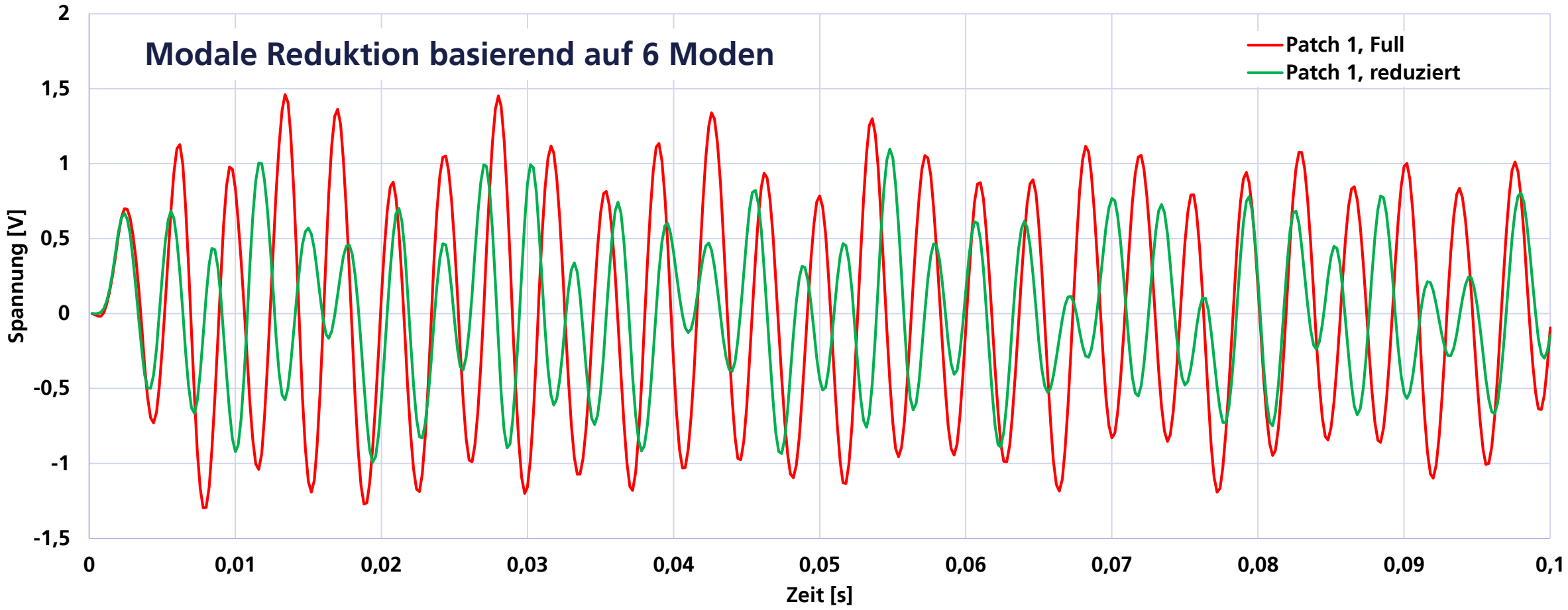
Validierung: Boge Aktor Impulsantwort, Aktorauslenkung



Anregung Kraft-Impuls, 300 Hz, Elektrisches Signal an Patches 1 und 2



Anregung Kraft-Impuls, 300 Hz, Elektrisches Signal an Patches 1 und 2



Zustandsraumformulierung – Einbindung FEA in Systemsimulation

Zustandsraumformulierung für magnetomechanischen Aktor

Ausgangspunkt: Differentialgleichungs-System

- $$\begin{aligned} M\ddot{u} + D\dot{u} + Ku &= F + F_P A + F_L \dot{A} \\ L\dot{A} + PA &= J \end{aligned}$$ **Direkte Kopplung**

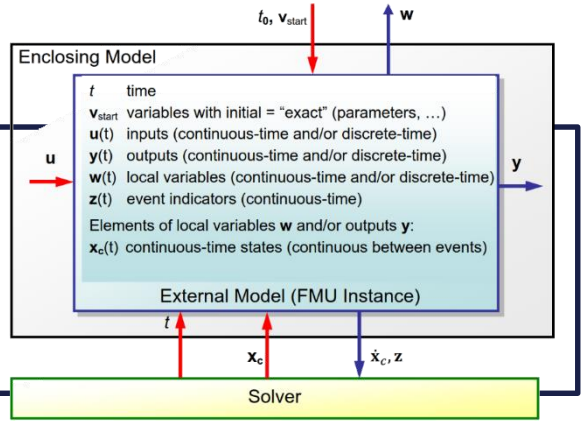
Zustandsraum Formulierung

- $$\begin{pmatrix} \dot{u}_1 \\ u_2 \\ A \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} M^{-1}D & -M^{-1}K & -M^{-1}F_P + M^{-1}F_L L^{-1}P \\ -Id & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L^{-1}P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ A \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M^{-1} & M^{-1}F_L L^{-1} \\ 0 & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ J \end{pmatrix}$$
  - $u_2 = u, u_1 = \dot{u}_2$
- **Weitere Ergänzungen für spannungsgespeiste Spulen und nicht-leitfähige Teilregionen nötig**

Allgemeine Schnittstellen Spezifikation FMI/FMU

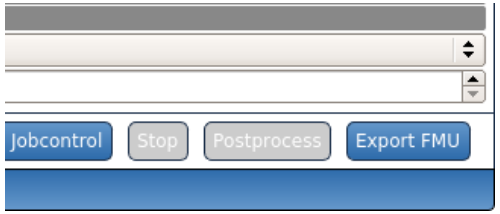
Functional Mock-up Interface (FMI)

- Standard zur Verknüpfung verschiedener Modelle in einer Systemsimulation



Implementierung in NACS

- Export von linearen FE-Modellen zum Modellaustausch mit AdaptroSim (FMU)
- Implementierung von Zustandsraumformulierungen für
  - Mechanik
  - Piezoelektrik
  - Magneto-Mechanik




```
nacs --exportFmu
```

Verfügbare FMI/FMU Schnittstellen-Implementierung

	Mechanik	Piezoelektrik	Magneto-Mechanik
Modale Superposition	✓	✓	
Krylov-Verfahren	✓		✓
Eingänge	Kraft, Druck	Kraft, Druck Ladung	Kraft, Druck Strom, Spannung
Ausgänge	Auslenkung	Auslenkung Spannung	Auslenkung

Zusammenfassung

Aktormodellierung und –reduktion im Rahmen von LeichtFahr

Verfügbarkeit geeigneter Aktor-Modelle für die Systemsimulation geregelter Systeme von großer Bedeutung

Finite-Elemente-Modelle liefern genaue Beschreibung des Aktor-Verhaltens

Modell-Reduktion aufgrund der Komplexität der Finite- Element-Simulationen unabdingbar

Im Rahmen von LeichtFahr Reduktionsverfahren für piezoelektrische und magnetomechanische Aktoren entwickelt und implementiert

Aktor-Modelle können mittels FMI/FMU Schnittstelle an AdaptroSim angebunden werden

Validierungsbeispiele belegen die Anwendbarkeit der entwickelten Methoden