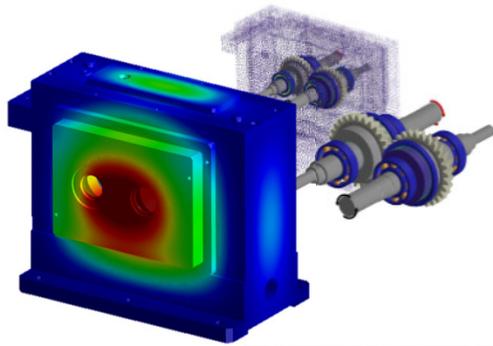
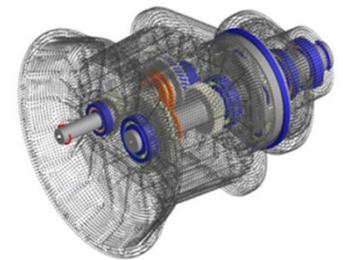

MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION AM BEISPIEL EINES PRÜFGETRIEBES

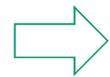
Jan Bräunig (Vortragender), Eric Hensel



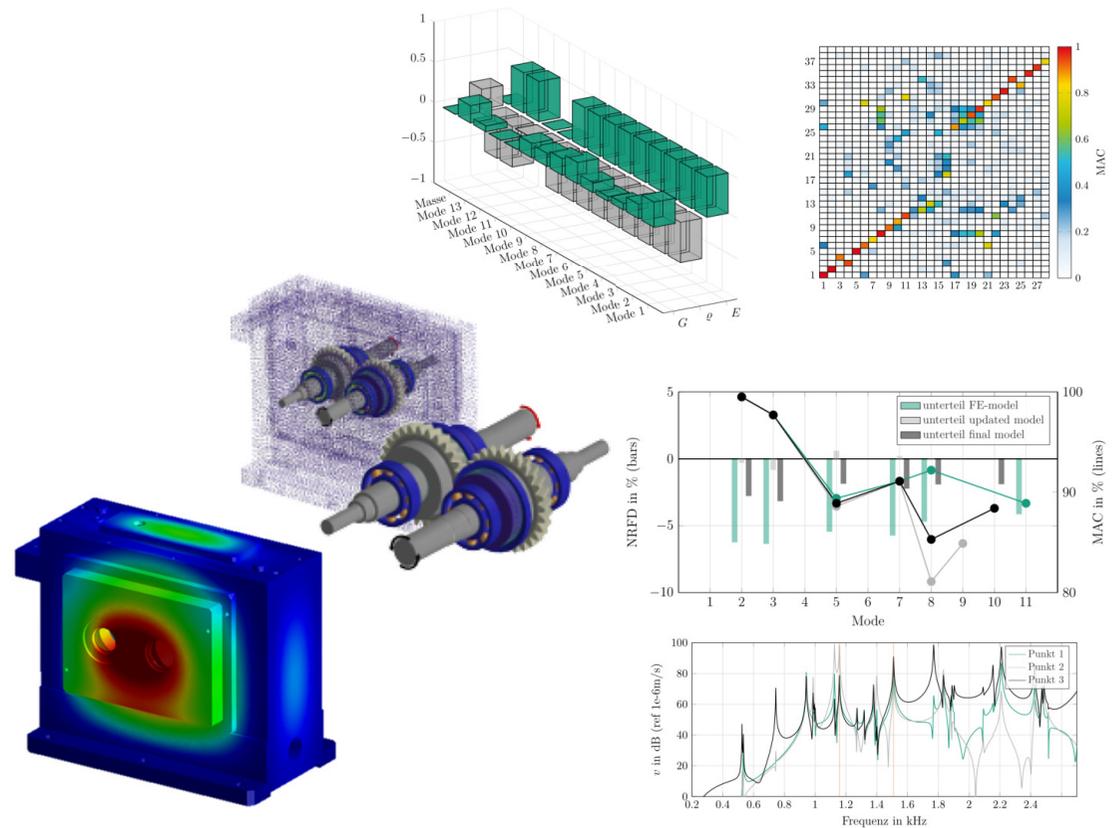
Fraunhofer
IWU



GLIEDERUNG



- Kurzvorstellung
- Themeneinleitung
- Messdatenbasierte Simulation
 - Vorbetrachtung & Ablauf
 - Testvorbereitung
 - Messdatenerfassung
 - Abschätzung Modalparameter
 - Modellvalidierung
 - model updating
 - Weiteres Vorgehen
- Anwendungsbeispiel

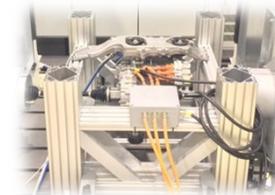
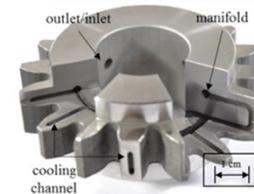


KURZE VORSTELLUNG – FRAUNHOFER IWU

WER WIR SIND UND WAS MIR MACHEN.

- Fraunhofer IWU
 - Institut für **W**erkzeugmaschinen und **U**mformtechnik
- gegründet 1991
- ≈ 590 Mitarbeiter
- Hauptsitz in Chemnitz, weitere Standorte in Dresden und Zittau
- Forschung unter dem Leitthema „Ressourceneffiziente Produktion“

- Gruppe: **Antriebsstrang- und Getriebeakustik**
 - wissenschaftliche Mitarbeiter aus den Fachbereichen Maschinenbau, Elektrotechnik und Kfz-Technik

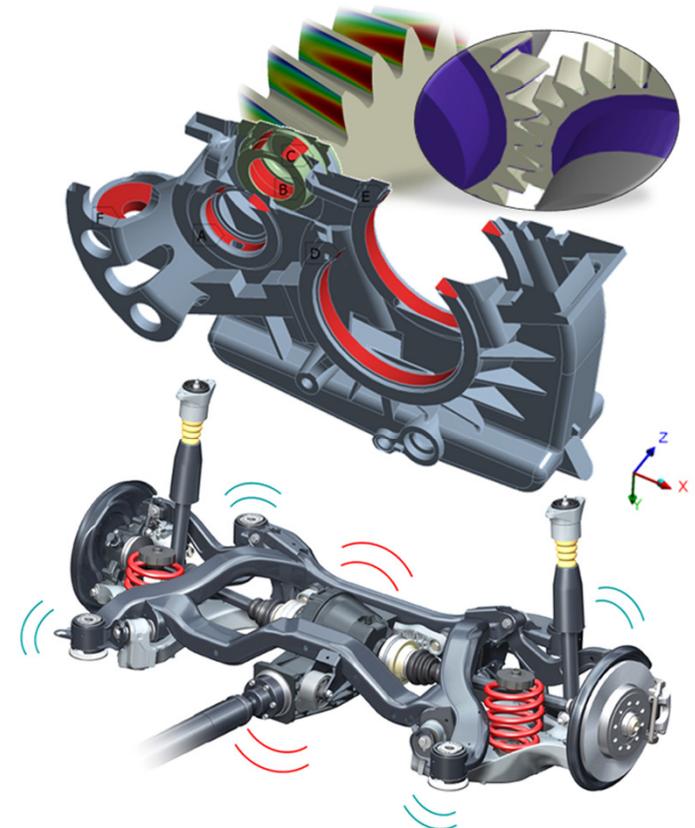
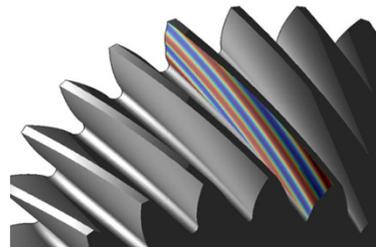


KURZE VORSTELLUNG – FRAUNHOFER IWU

WER WIR SIND UND WAS MIR MACHEN.

■ aktuelle Hauptarbeitsgebiete

- Optimierung der Getriebe- und Verzahnungsakustik
- Welligkeitsanalyse und optimierte Verzahnungsfertigung
- aktive und passive Maßnahmen zur Schall- und Schwingungsreduktion
- akustisches Verhalten elektrischer Antriebe
- Körperschallbeschreibung verkoppelter Strukturen (Schnittstellenbeschreibung, Körperschalleistung)
- Schallquellenortung mit Mikrofonarrays

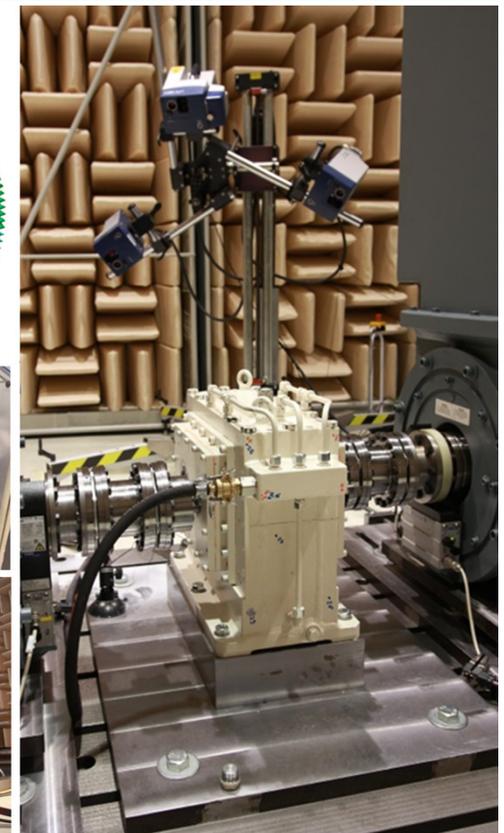
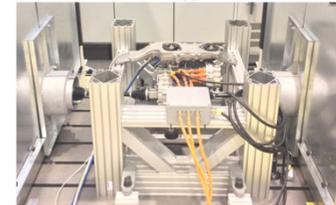
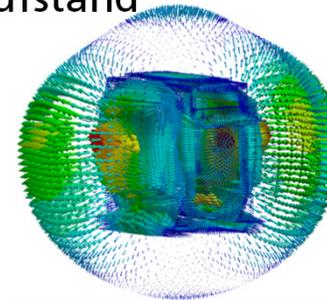


KURZE VORSTELLUNG – FRAUNHOFER IWU

WER WIR SIND UND WAS MIR MACHEN.

■ Untersuchungsobjekt Prüfgetriebe/Übersicht Getriebeprüfstand

- Maximaldrehzahl ± 10.000 U/min
- Maximaldrehmoment: ± 1100 Nm (bis 1500 U/min)
- max. Drehzahlgradient (frei): 10.000 U/min/s
- Maximalleistung: ca. 180 kW
- Standort: reflexionsarmer Halbfreifeldraum
- variables Henschel-Prüfgetriebe für unterschiedliche Stirnräder (variabler Achsabstand) sowie Einspritzschmierung
- integrierte Drehwinkelgeber Heidenhain RON 285
- Möglichkeit zur Integration von E-Antrieben (Batteriesimulator 200 kW)



KURZE VORSTELLUNG – FRAUNHOFER IWU

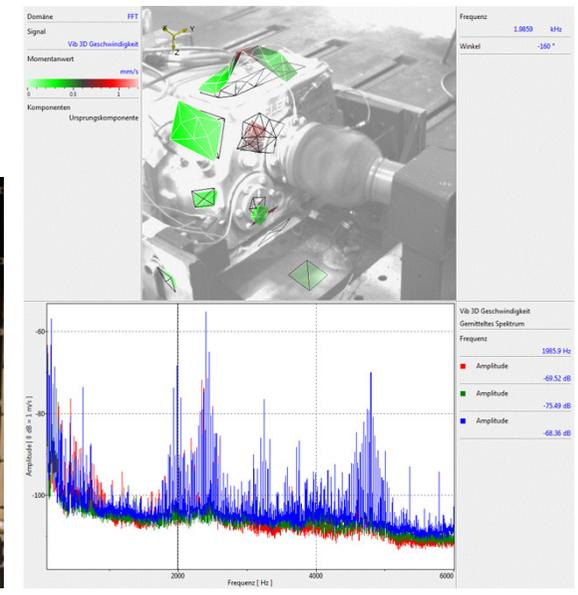
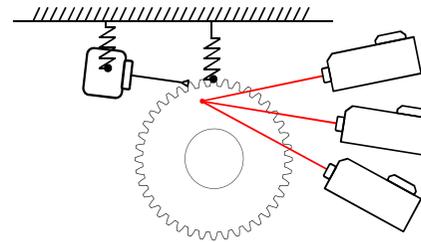
WER WIR SIND UND WAS MIR MACHEN.

■ Notwendiges Equipment → u. a. zur Experimentellen Modal-Analyse (EMA)

- 3D-Laser-Vibrometer
- drei Laserköpfe zur Messung dreidimensionaler Schwingungen mit hoher räumlicher Auflösung
- berührungslose und somit rückwirkungsfreie Messung
- Schwingformanimation
- **liefert Messdatenbasis zum model updating**
- Darstellung von Dehnungs- und Spannungsverteilung

Spezifikationen:

- Frequenzbereich bis 1 MHz
- Geschwindigkeitsbereich: 10^{-8} bis 10 m/s
- Arbeitsabstand > 0,4 m
- max. Messpunktanzahl: 512 x 512



KURZE VORSTELLUNG – FRAUNHOFER IWU

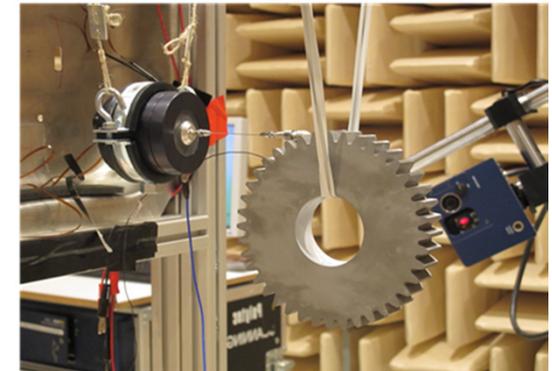
WER WIR SIND UND WAS MIR MACHEN.

■ Notwendiges Equipment → allg. Fahrzeug- & Getriebeakustik

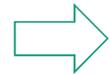
- Systemanregung (u. a. EMA, TPA)
- **Modalsaker** unterschiedlichster Größen
- IMA & Volumenschallquelle
- **Impedanzmesskopf** (→ Referenz am Krafteinleitungspunkt)

zusätzliche Erfassung unterschiedlicher Größen (Auswahl)

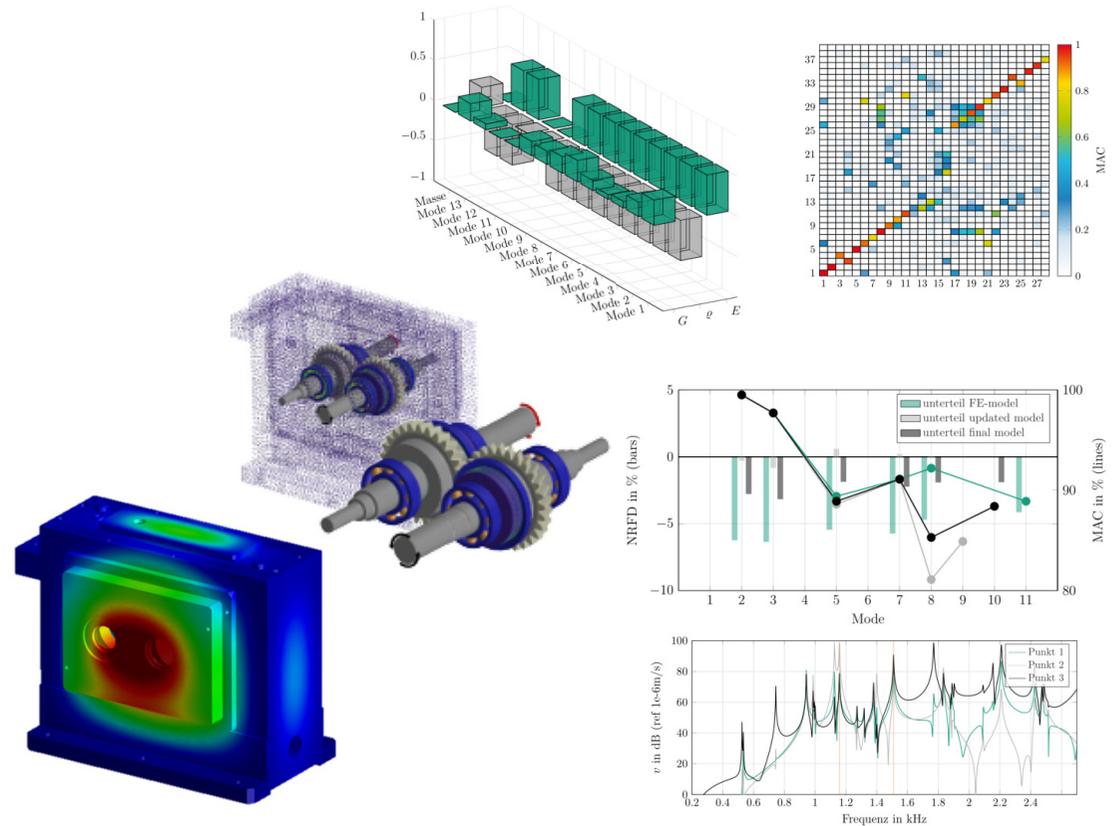
- **Schalldruck**
- **Kraft**
- **Beschleunigung**
- **Drehzahl (optisch)**
- Geschwindigkeit (GPS)
- Kunstkopf
- etc.



GLIEDERUNG



- Kurzvorstellung
- Themeneinleitung
- Messdatenbasierte Simulation
 - Vorbetrachtung & Ablauf
 - Testvorbereitung
 - Messdatenerfassung
 - Abschätzung Modalparameter
 - Modellvalidierung
 - model updating
 - Weiteres Vorgehen
- Anwendungsbeispiel



EINLEITUNG

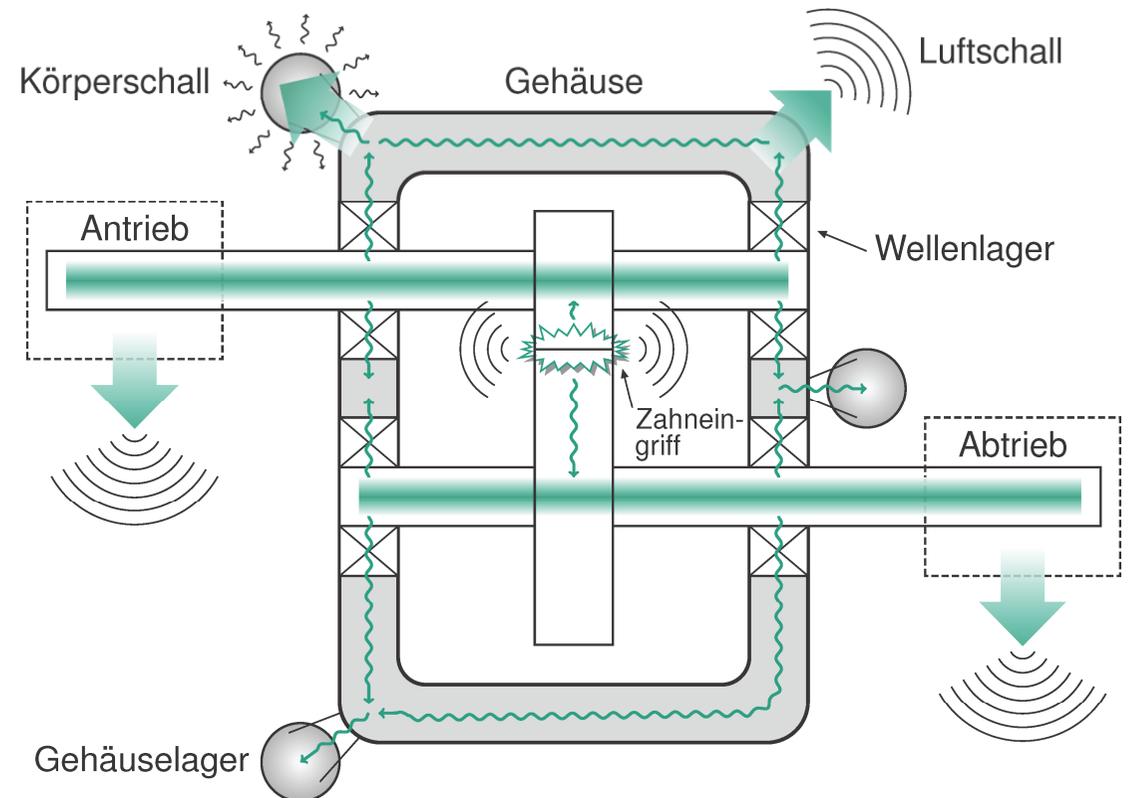
ALLGEMEINES

■ mesdatenbasierte dynamische System-simulation

- Simulation technischer Gesamtsysteme unter Verwendung experimentell ermittelter Eigenschaften von Subsystemen
- Einbindung in Mehrkörpersystem- oder Netzwerkmodelle (bspw. basierend auf 4-Pol-Theorie)

■ Beispiel Getriebe

- Aufbau eines MKS-Modells mit elastischem Gehäuse, dessen dynamische Eigenschaften auf Messdaten (z. B. experimentelle Modalanalyse EMA) beruhen



EINLEITUNG

DYNAMISCHE SYSTEMSIMULATION

- Simulation ermöglicht Vorhersage und Beurteilung des dynamischen/akustischen Verhaltens bereits im Entwicklungsprozess.
- heutzutage unterschiedliche Methoden zur dynamischen/akustischen Simulation vorhanden
 - Finite-Elemente-Methode (FEM)
 - starre und elastische Mehrkörpersysteme (MKS)
 - Netzwerkmodelle (bspw. 4-Pol-Theorie)
- Alle Methoden erfordern Kenntnis von Systemparametern (z. B. Werkstoffkennwerte oder Steifigkeitskennwerte für Lagerelemente).
- Verwendung von Literaturkennwerten in vielen Fällen nicht ausreichend und kann zu falschen Simulationsergebnissen führen
 - Fehlinterpertation des realen Systems
 - Ableitung falscher Optimierungsmaßnahmen

EINLEITUNG

EINBINDUNG FLEXIBLER KÖRPER

- Folgende Beschreibung einer messdatengestützten Simulation erfolgt am Beispiel eines flexiblen MKS-Modells.
- Warum Einbindung flexibler Körper?
 - Verformung elastischer Körper u.U. mit signifikantem Anteil am dynamischen Verhalten eines Systems
 - Beispiele
 - Biegeschwingform einer Getriebewelle und deren direkter Einfluss auf den Zahnkontakt im entsprechenden Frequenzbereich
 - Gehäuseverformung unter betriebsbedingter Belastung und die damit verbundene Änderung der relativen Lage verschiedener Getriebekomponenten
- Berücksichtigung elastischer Strukturen erfordert die Erstellung eines FE-Modells und eine anschließende Modellordnungsreduktion.
- **model updating** zur gezielten Anpassung physikalischer Eigenschaften von FE-Modellen anhand durchgeführter experimenteller Untersuchungen

EINLEITUNG

NOTWENDIGKEIT DER **MESSDATENBASIERTEN** SIMULATION

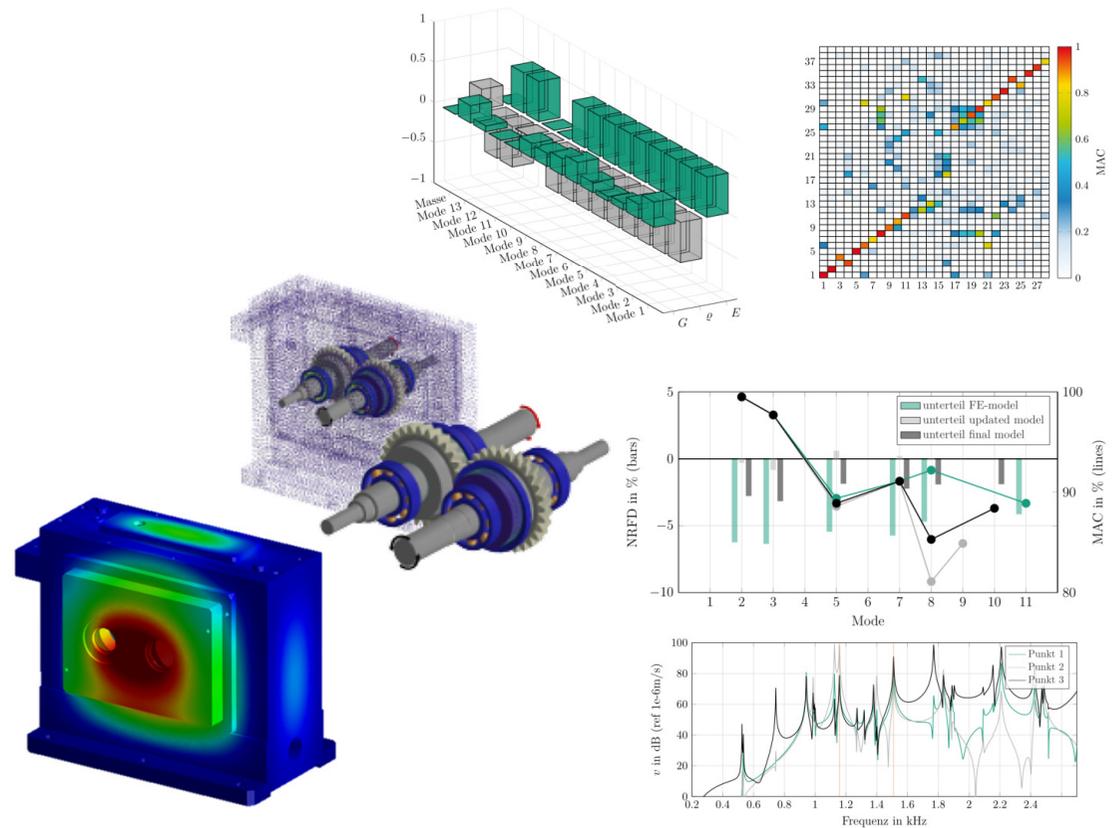
- Zur „exakten“ Vorhersage des dynamischen Verhaltens von technischen Bauteilen ist die genaue Kenntnis von Parametern, welche dieses Verhalten beeinflussen, notwendig.

- Beispielparameter
 - E-Modul, Schubmodul, Querkontraktionszahl, Dämpfung, Dichte

- Einflüsse ausgewählter Parameter
 - E-Modul
 - Einfluss auf Steifigkeit und somit auf Eigenfrequenzen
 - Dämpfung
 - Einfluss auf Ausprägung von Amplituden im Resonanzbereich
 - bei schwach gedämpften Strukturen Einfluss auf die Eigenfrequenzen meist vernachlässigbar

GLIEDERUNG

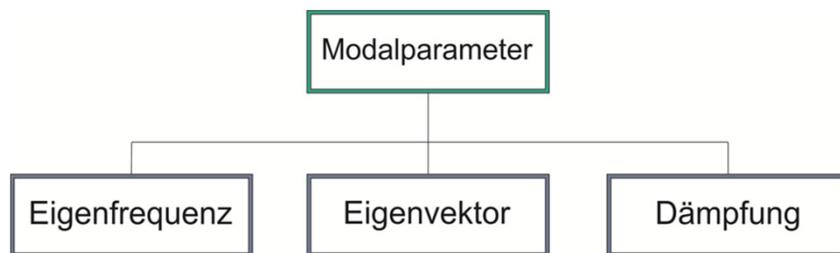
- Kurzvorstellung
- Themeneinleitung
- ➔ ■ Messdatenbasierte Simulation
 - Vorbetrachtung & Ablauf
 - Testvorbereitung
 - Messdatenerfassung
 - Abschätzung Modalparameter
 - Modellvalidierung
 - model updating
 - Weiteres Vorgehen
- Anwendungsbeispiel



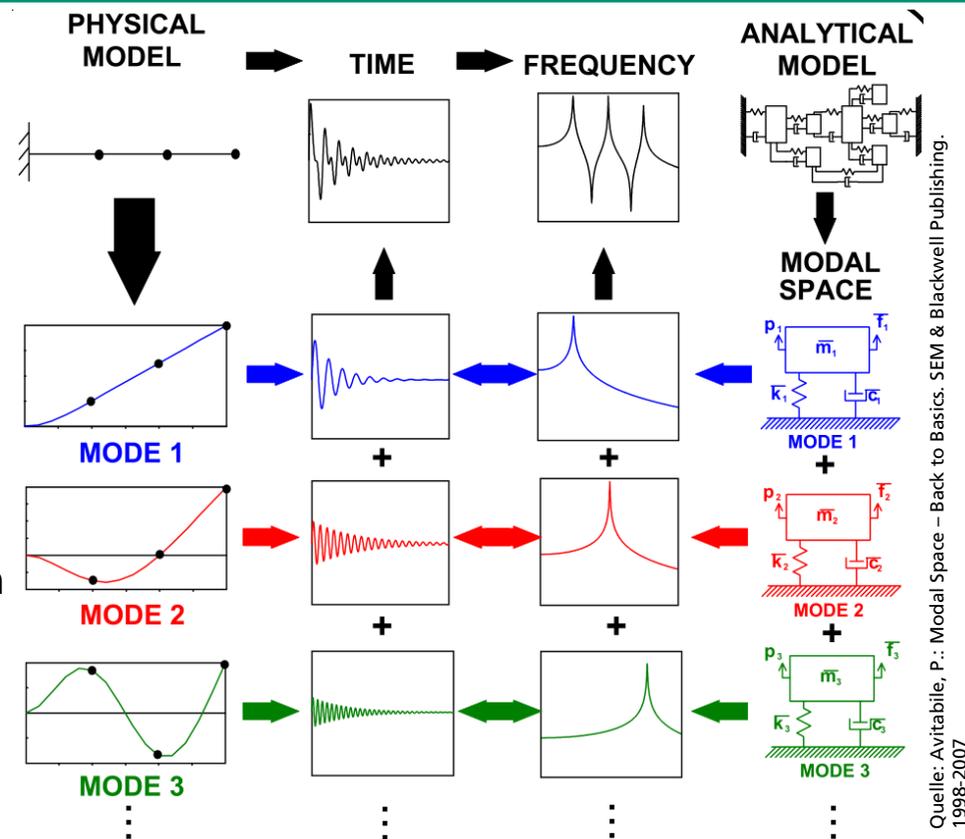
MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

VORBETRACHTUNG

- Modalanalyse als Prozess zur Beschreibung eines Systems mit seinen natürlichen Eigenschaften **Eigenfrequenzen**, **Eigenschwingformen** und **Dämpfung** (dynamische Eigenschaften)



- Zerlegung eines Systems mit N Freiheitsgraden in ein System aus N Einmassenschwingern (Diagonalisierung der Systemmatrizen)
- Ziel: Bestimmung der modalen Parameter



Quelle: Avitabile, P.: Modal Space – Back to Basics. SEM & Blackwell Publishing. 1998-2007

MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

VORBETRACHTUNG – EXP. MODALANALYSE (EMA)

- Annahme: vorhandenes System ist ein LTI-System (**L**inear **T**ime **I**nvariant)
- prinzipieller Weg
 - Anregung des Systems bspw. durch dynamische Kraft (deterministisch → Sinussweep, stochastisch → weißes Rauschen)
 - Erfassung der Systemantworten als Beschleunigung oder Schnelle (z. B. B-Aufnehmer, Laser-Vib.)
 - Transformation der erfassten Zeitsignale in den Frequenzbereich
- in Praxis entstehen Probleme durch
 - mechanische Störsignale der Struktur
 - nichtlineares dynamisches Verhalten des Systems
 - elektrische Rauschsignalanteile von Messgeräten
 - Mittelungen notwendig (Unterdrückung von stochastischem Rauschen, Addition deterministischer Signalanteile)

Quelle: Vorlesungsunterlagen Modalanalyse. Technische Universität Dresden. SS 2010

MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

VORBETRACHTUNG – EXP. MODALANALYSE (EMA)

■ Bewertung des Einflusses von Störsignalen auf Basis der Kohärenzfunktion

- Berechnung der Kohärenzfunktion γ^2 aus Auto- und Kreuzspektren von anregender Kraft F und Systemantwort X

$$\gamma(\omega)^2 = \frac{|G_{XF}(\omega)|^2}{G_{XX}(\omega) \cdot G_{FF}(\omega)}$$

- Kohärenzfunktion: Bewertung der Linearität zwischen Eingangssignal- und Ausgangssignal
- γ klein: großer Einfluss von Störsignalen auf den Frequenzgang
- meist ausreichend: $\gamma > 0,75$
- Kohärenzfunktion zur Kontrolle des Versuchsaufbaus (Kabeleinflüsse, schlechte Wahl der Anregungs- und Messpunkte, Nichtlinearitäten ...)

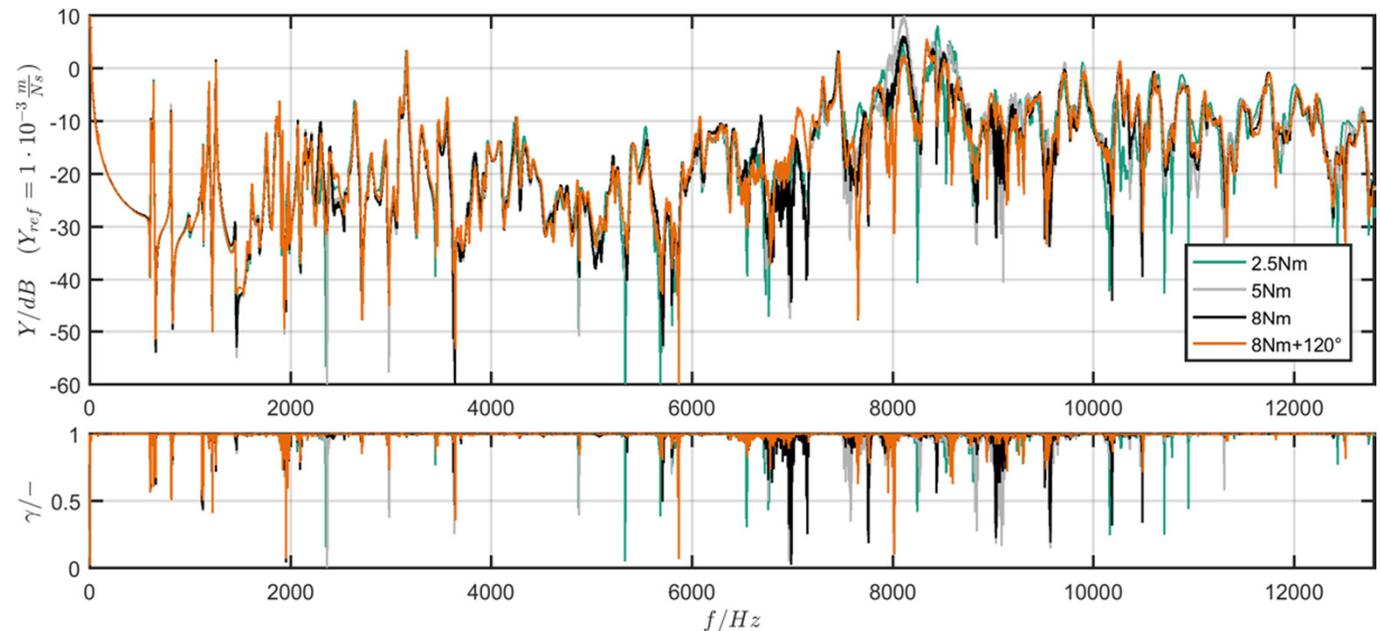
Quelle: Vorlesungsunterlagen Modalanalyse. Technische Universität Dresden. SS 2010

MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

VORBETRACHTUNG – EXP. MODALANALYSE (EMA)

■ Beispiel einer Kohärenz

- oberes Diagramm
- Übertragungsadmittanz
- unteres Diagramm
- zugehöriges Kohärenzspektrum



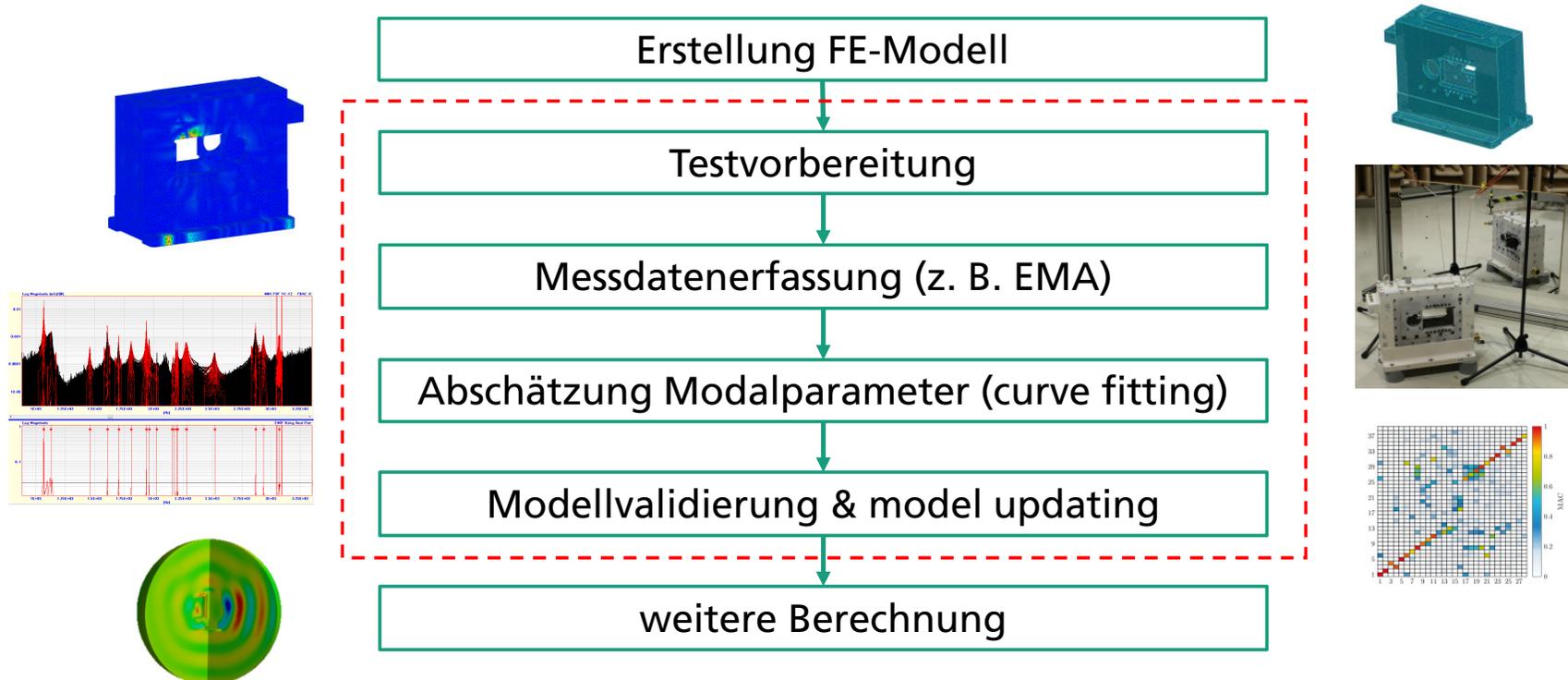
■ Fazit: EMA zur Ermittlung der Modalparameter (Eigenfrequenz, Schwingform, Dämpfung)

■ Ziel: Erstellung eines Modalmodells des Strukturverhaltens auf Basis der Modalparameter

MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

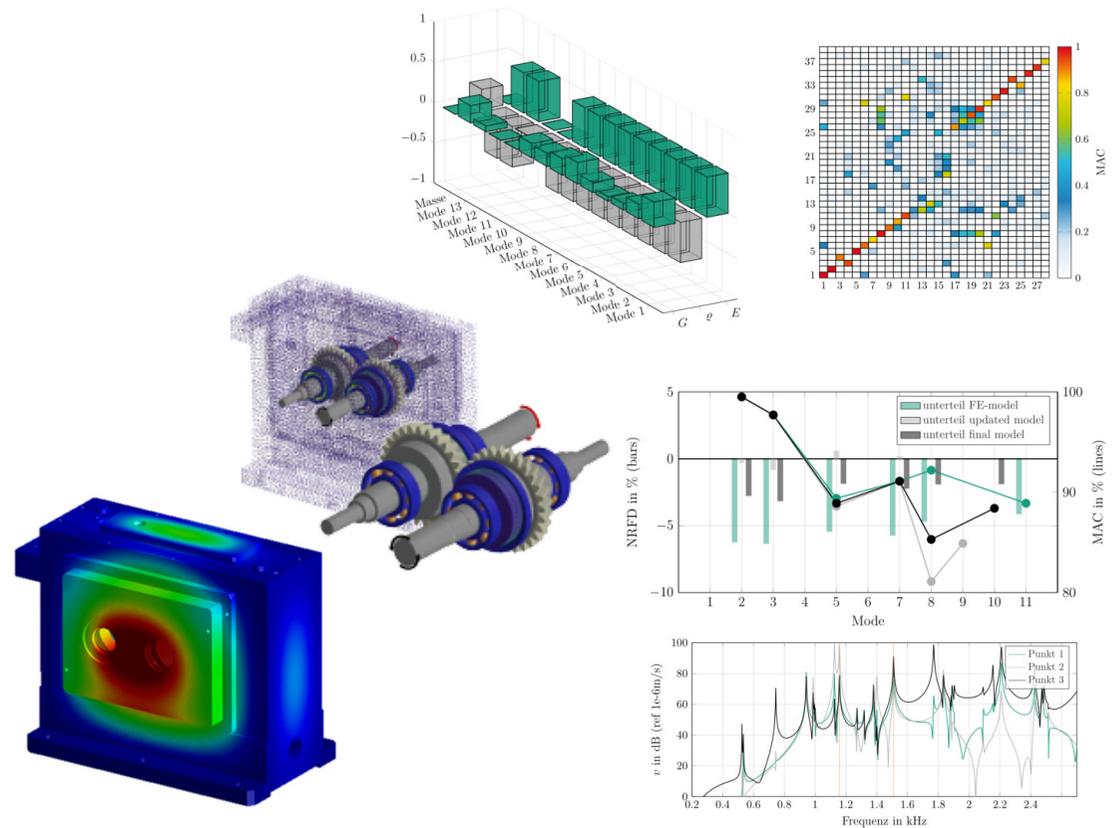
ABLAUF

- prinzipielles Vorgehen zur messdatenbasierten Systemsimulation (model updating)



GLIEDERUNG

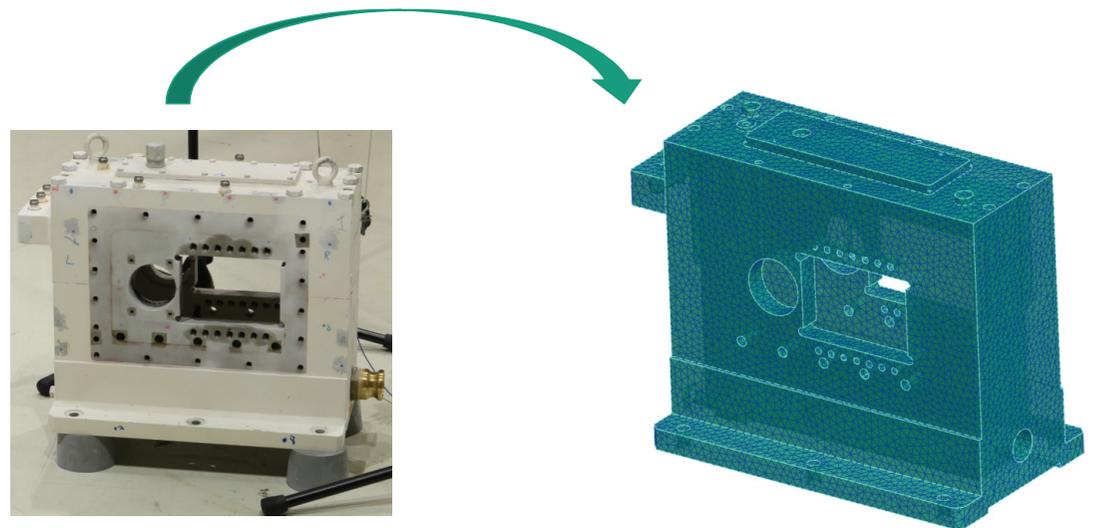
- Kurzvorstellung
- Themeneinleitung
- ➔ ■ Messdatenbasierte Simulation
 - Vorbetrachtung & Ablauf
 - ➔ ■ Testvorbereitung
 - Messdatenerfassung
 - Abschätzung Modalparameter
 - Modellvalidierung
 - model updating
 - Weiteres Vorgehen
- Anwendungsbeispiel



MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

TESTVORBEREITUNG

- Zweck der Testvorbereitung
 - Finden einer optimalen Referenzposition
 - Festlegung der Anzahl der Messpositionen, um festgelegten Frequenzbereich bzw. zu messende Moden zu erfassen
- Ausgangsbasis: vorhandenes FE-Modell
 - bspw. Abschätzung der Elementgröße auf Basis Biegewellenlänge oder Konvergenzanalyse



MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

TESTVORBEREITUNG

■ Finden einer optimalen Anregungsposition

- Kriterium: Anregung aller Moden im zu betrachtenden Frequenzbereich
- mögliches Verfahren zur Ermittlung der Anregungsposition
 - Minimum Normalized Modal Displacement Method (Minimum NMD)

■ NMD-Methode

- Ausgangspunkt: Driving-Point-Residuen (DPR) des UMM-skalierten Systems für DOF i der Mode j

$$R_j(i, i) = \frac{\Phi_j(i)^2}{\omega_j}$$

- Berechnung des Minimum NMD auf Basis der normierten DPR \bar{R} für M Moden ($j = 1 \dots M$)

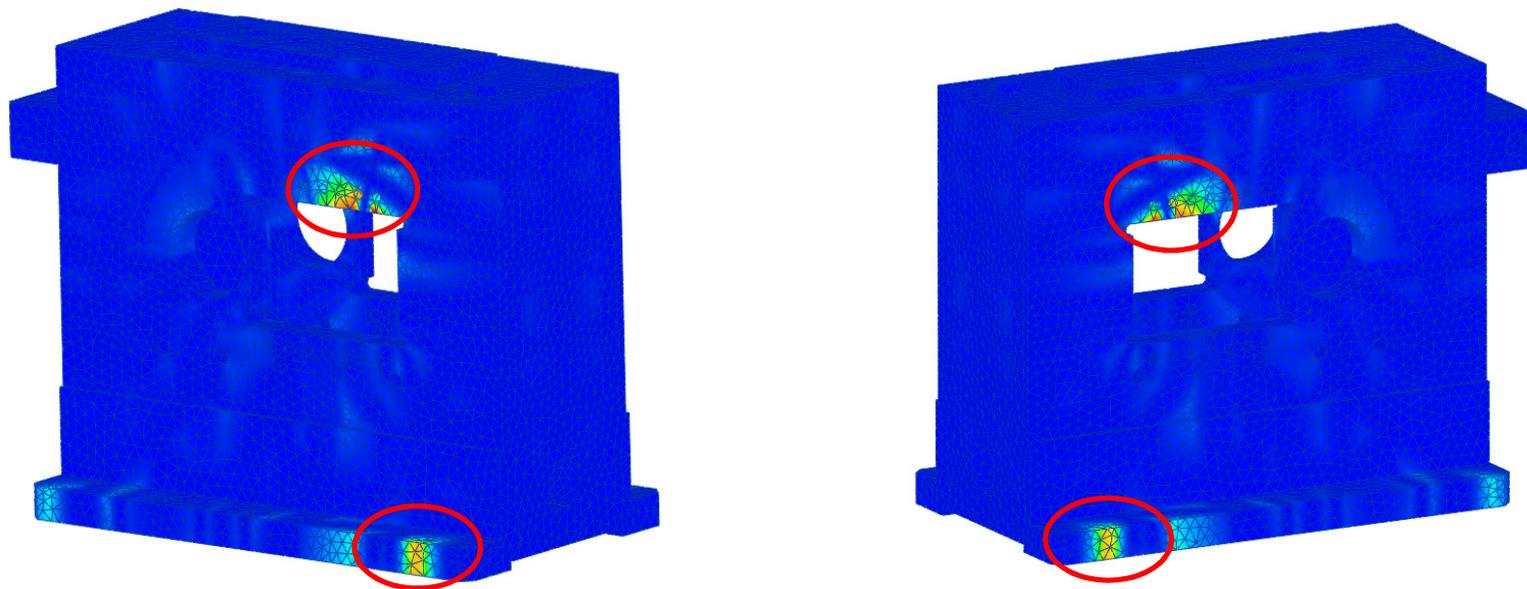
$$NMD_{min}(i) = \min_j(\bar{R}_j(i, i))$$

MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

TESTVORBEREITUNG

- Bestimmung der Anregungsposition auf Basis des Minimum NMD am Beispiel eines Prüfgetriebe-Gehäuses

○ Mögliche Anregungspositionen



MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

TESTVORBEREITUNG

- Finden von Sensor-/Antwortpositionen
 - Kriterium: Erfassung aller Moden im zu betrachtenden Frequenzbereich
 - mögliches Verfahren zur Ermittlung der Sensorposition
 - Weighted NMD oder iterative Verfahren (bspw. auf MAC-Kriterium basierend)
- Beispiel: Weighted NMD
 - Multiplikation von Minimum und Average NMD für M Moden ($j = 1 \dots M$)

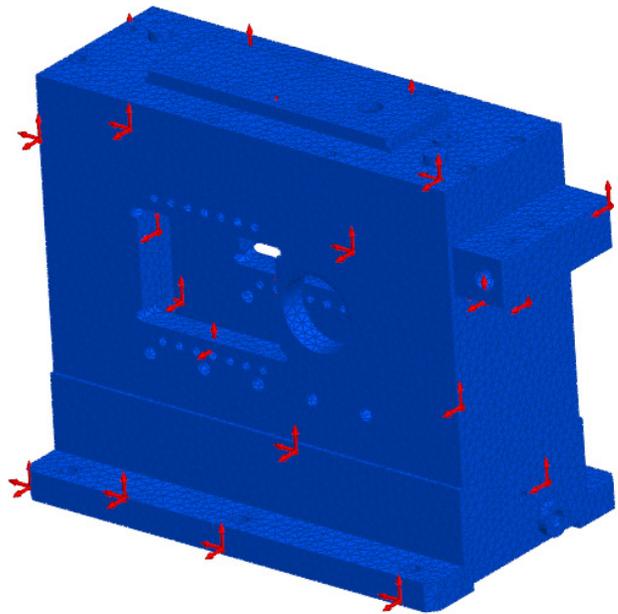
$$NMD_{weighted}(i) = NMD_{min}(i) \cdot NMD_{average}(i) = \min_j(\bar{R}_j(i, i)) \cdot \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (\bar{R}_j(i, i))$$

- Multiplikation mit Minimum NMD bewirkt, dass Knotenlinien einen deutlich geringen Wert erhalten.

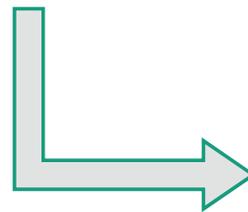
MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

TESTVORBEREITUNG

- Bestimmung der Sensorposition auf Basis des Weighted NMD am Beispiel eines Prüfgetriebe-Gehäuses

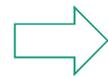


 Mögliche Sensorpositionen



Prüfung der Orthogonalität der Eigenvektoren
bspw. durch Größe der Nebendiagonal-
elemente der Auto-MAC-Matrix

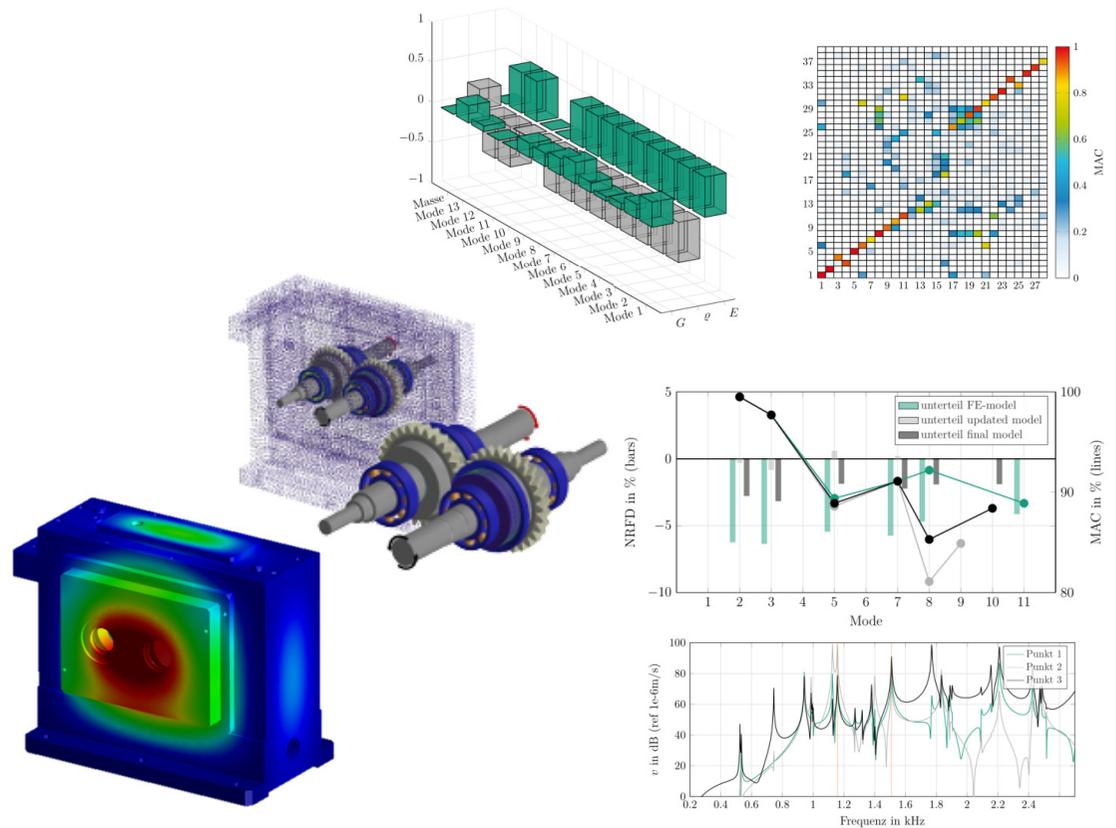
GLIEDERUNG



- Kurzvorstellung
- Themeneinleitung
- Messdatenbasierte Simulation



- Vorbetrachtung & Ablauf
- Testvorbereitung
- Messdatenerfassung
- Abschätzung Modalparameter
- Modellvalidierung
- model updating
- Weiteres Vorgehen
- Anwendungsbeispiel

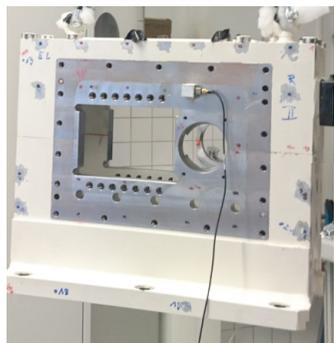


MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

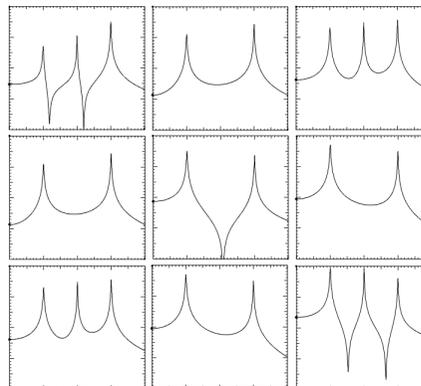
MESSDATENERFASSUNG

- experimentelle Modalanalyse zur Erfassung der notwendigen Übertragungsfunktionen der Übertragungsfunktionsmatrix H
- Messung bspw. mit Impulshammer und Beschleunigungsaufnehmern **oder** mittels Shaker und Laser-Scanning-Vibrometer

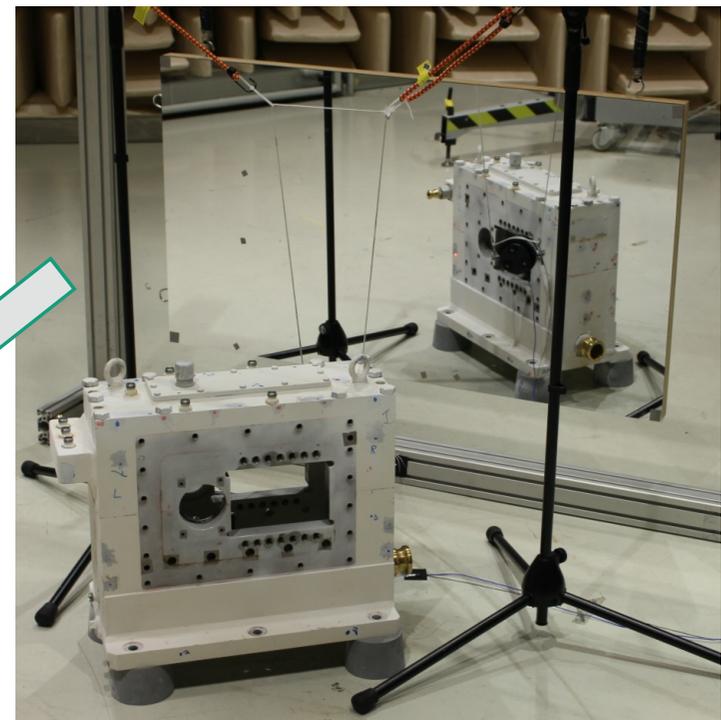
EMA mittels Hammer



H -Matrix



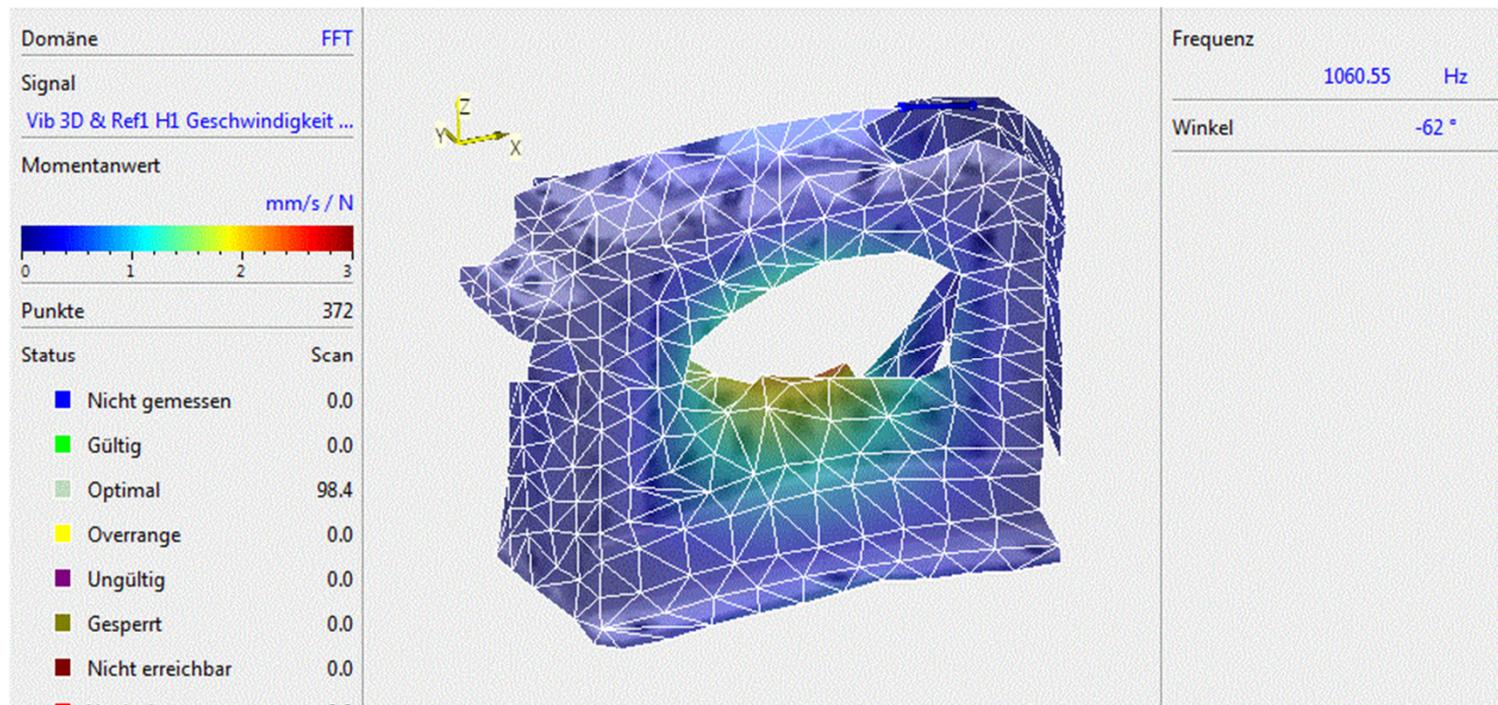
EMA mittels Laservibrometer



MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

MESSDATENERFASSUNG

- beispielhafte Schwingform ($f=1061\text{Hz}$), gemessen mittels 3D-Laservibrometer



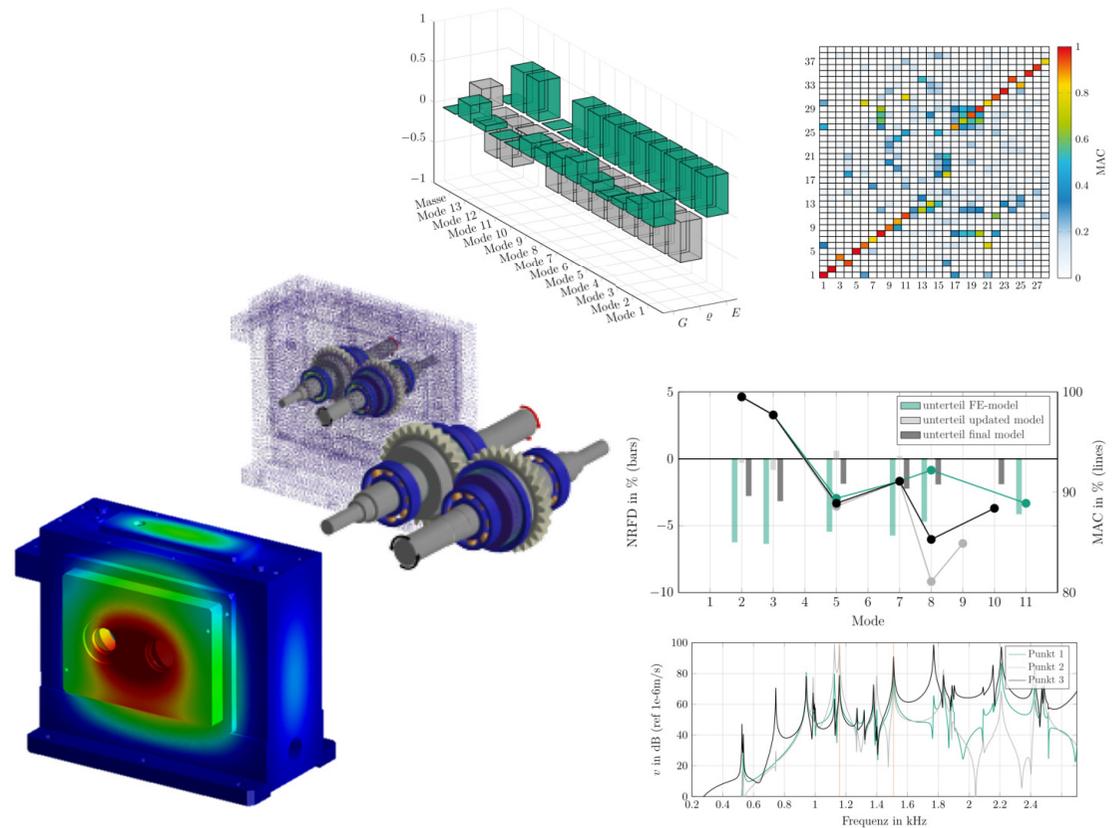
MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

MESSDATENERFASSUNG

- theoretisch: Auswahl des Messverfahrens (bspw. roving hammer oder roving acceleration) egal
→ unterschiedliche Verfahren führen zu gleichen Modalparametern, da Übertragungsfunktionsmatrix symmetrisch
- in Praxis: genutzte Messtechnik kann Struktur beeinflussen (Sensoren vs. berührungslose Messung)
- Beispiele
 - EMA mittels „roving acceleration“-Methode und Beschleunigungsaufnehmern
 - Einfluss der Masse des B-Aufnehmers an entsprechenden Messpunkten
 - möglicher Frequenz-Shift in den einzelnen Resonanzen (Eigenfrequenzen) der einzelnen Übertragungsfunktionen
 - Verwendung von Shakern zur Anregung
 - Systemverstimmung durch Shaker-Ankopplung möglich

GLIEDERUNG

- Kurzvorstellung
- Themeneinleitung
- ➔ ■ Messdatenbasierte Simulation
 - Vorbetrachtung & Ablauf
 - Testvorbereitung
 - Messdatenerfassung
 - ➔ ■ Abschätzung Modalparameter
 - Modellvalidierung
 - model updating
 - Weiteres Vorgehen
- Anwendungsbeispiel

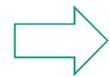


MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

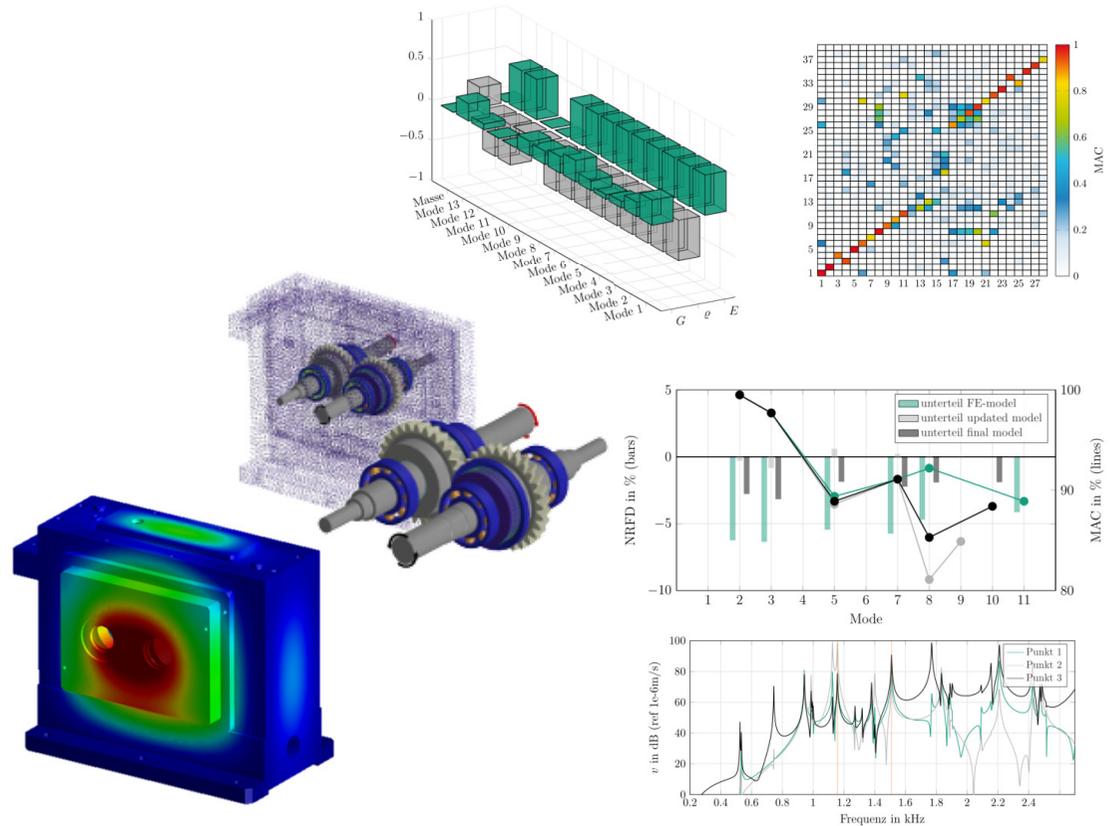
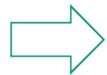
ABSCHÄTZUNG MODALPARAMETER

- Ziel: aus gemessenen Übertragungsfunktionen Ermittlung der Modalparameter
 - Eigenfrequenzen
 - Modalmatrix
 - modale Dämpfung
- Abschätzung der Modalparameter über curve fitting
- grundlegendes Vorgehen beim curve fitting
 - Messung von Daten (FRF, komplex) an diskreten Datenpunkten
 - Finden einer „Ausgleichsfunktion“
 - Ableiten von Polstellen, Residuen und Dämpfung (→ modale Parameter)
- weiterführende Literatur
 - Schwarz, B. J.; Richardson, M. H.: Experimental modal analysis. In: CSI Reliability week 35.1 (1999), S. 1–12.

GLIEDERUNG



- Kurzvorstellung
- Themeneinleitung
- Messdatenbasierte Simulation
 - Vorbetrachtung & Ablauf
 - Testvorbereitung
 - Messdatenerfassung
 - Abschätzung Modalparameter
- ⇒
 - Modellvalidierung
 - model updating
 - Weiteres Vorgehen
- Anwendungsbeispiel



MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

MODELLVALIDIERUNG

- Zweck der Modellvalidierung
 - in Praxis: Verwendung unterschiedlicher Korrelationskriterien zum Abgleich zweier Systeme
 - häufig: Abgleich von Messung und Simulation
 - weiterhin: Vergleich von FE-Modellen zur Konvergenzanalyse unterschiedlicher Diskretisierungsvarianten
- Klärung folgender Beispielfragen (unter Voraussetzung einer validen Messung):
 - Wie gut bildet mein Modell die Realität (Messung) hinsichtlich dynamischer Eigenschaften (Eigenfrequenzen und -moden) ab?
 - Ist die erzielte Genauigkeit ausreichend?
- unterschiedliche Methoden basierend auf
 - Eigenfrequenzen (z. B. **NRFD**) und Eigenmoden (z. B. **MAC**)
 - Übertragungsfunktionen (z. B. **FDAC**)
 - ...

MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

MODELLVALIDIERUNG – NRFD

■ NRFD

- **N**ormalized **R**elative **F**requency **D**ifference
- Vergleich der relativen Abweichungen der Eigenfrequenzen zweier Systeme
- kein Vergleich der Schwingformen!

■ Berechnung des NRFD-Kriteriums

- für gleiche bzw. ähnliche Moden j berechnet sich das NRFD-Kriterium zu

$$NRFD(j) = \left| 1 - \frac{f_{exp}(j)}{f_{num}(j)} \right| \cdot 100\%$$

■ für $NRFD < 3\%$ im Allgemeinen gute Übereinstimmung

■ weiterhin: Vergleich der Werte der Eigenfrequenzen

- Bsp.: alle Eigenfrequenzen des numerischen Modells über den gemessenen Werten → numerisches Modell als zu steif → Gründe: zu hoher E-Modul, zu grobe Vernetzung, falsche Ansatzfunktion

MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

MODELLVALIDIERUNG – MAC

■ MAC

- **M**odal **A**ssurance **C**riterion
- übliche Methode zum Vergleich gemessener und berechneter Eigenformen

■ Berechnung der MAC-Matrix

- Vergleich experimentell bestimmter Eigenformen \mathbf{v}_e mit numerisch berechneten Eigenformen \mathbf{v}_n
- MAC-Wert $MAC(i, j)$ einer gemessenen Mode j und einer numerisch berechneten Mode i

$$MAC_{ij} = \frac{(\mathbf{v}_{j,e}^T \mathbf{v}_{i,n})^2}{(\mathbf{v}_{j,e}^T \mathbf{v}_{j,e})(\mathbf{v}_{i,n}^T \mathbf{v}_{i,n})}$$

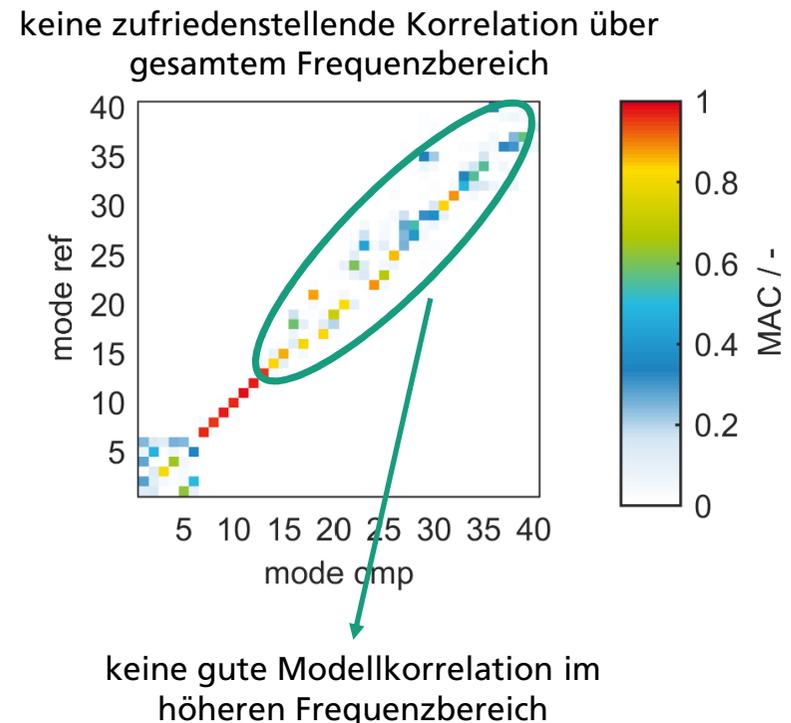
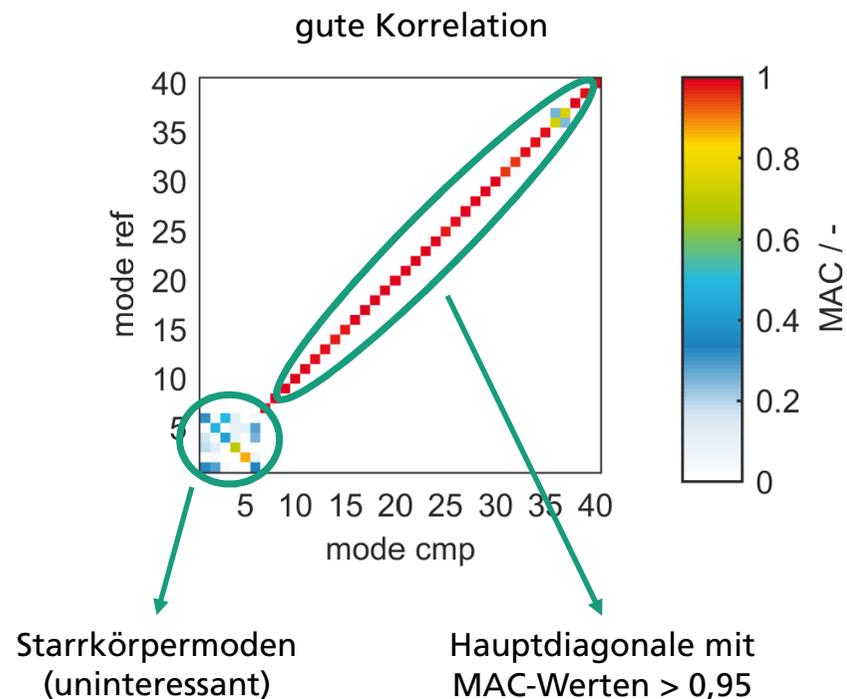
■ Interpretation

- gute Korrelation für $MAC_{ij} > 0,8$
- schlechte Korrelation für $MAC_{ij} < 0,3$

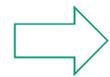
MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

MODELLVALIDIERUNG – MAC

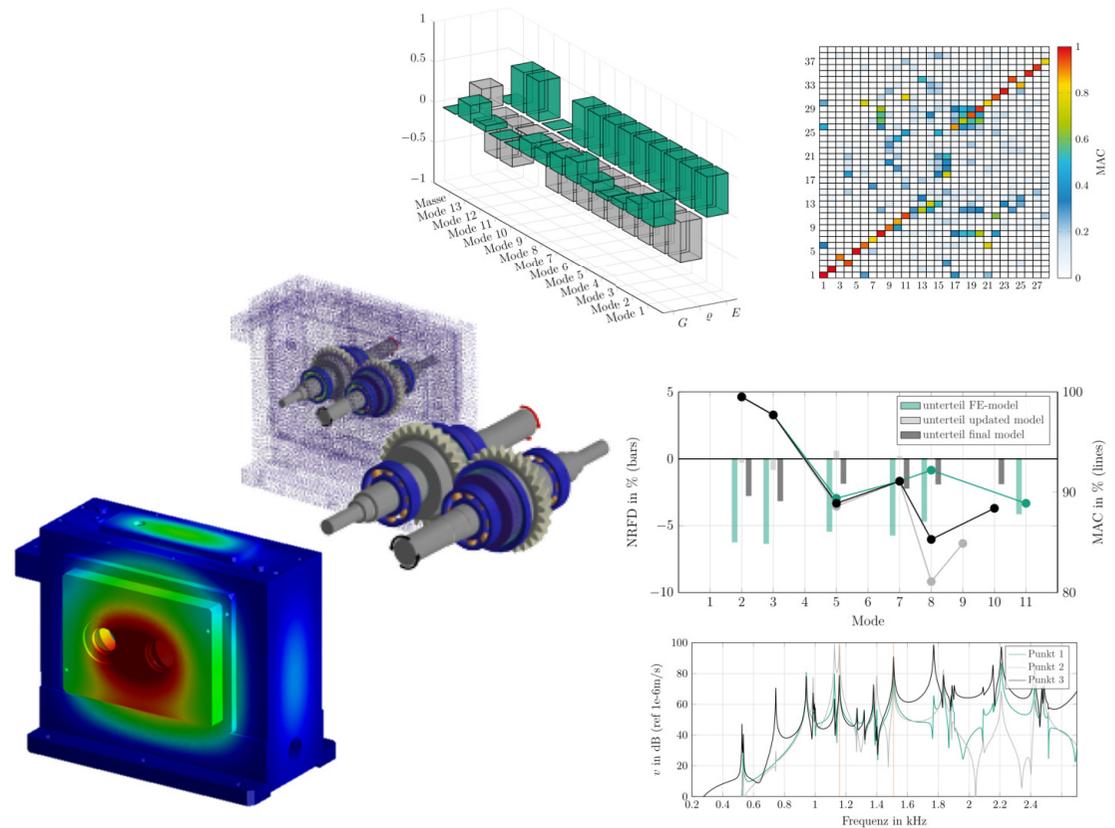
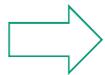
- Beispiele für gute und schlechte Korrelation zwischen berechneten und gemessenen Systemen



GLIEDERUNG



- Kurzvorstellung
- Themeneinleitung
- Messdatenbasierte Simulation
 - Vorbetrachtung & Ablauf
 - Testvorbereitung
 - Messdatenerfassung
 - Abschätzung Modalparameter
 - Modellvalidierung
- model updating
- Weiteres Vorgehen
- Anwendungsbeispiel



MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

MODEL UPDATING

- gezielte Anpassung physikalischer Eigenschaften von Simulationsmodellen auf Basis experimentell ermittelter Daten
- Definition von
 - Zielfunktionen (zu erreichende Eigenschaften aus Messung, wie Eigenfrequenz)
 - unsichere Parameter (geschätzte Modelleigenschaften)
- prinzipielles Vorgehen
 - Bestimmung einer linearisierten Abhängigkeit der definierten Parameter von den Zielfunktionen
 - gezielte Anpassung der physikalischen Parameter basierend auf unterschiedlichen Algorithmen (oder manuell)
 - Neuberechnung des Systems in mehreren Iterationsschritten (stetige Abfrage der Korrelation als Bewertungsbasis)
 - Abschluss nach Erreichen eines definierten Zielkriteriums

MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

FINITE-ELEMENTE MODEL UPDATING

- Ziel: gewählte Parameter so anpassen, dass sie möglichst hohe Korrelation zwischen Referenz (Messung) und Simulationsmodell

- verschiedene Möglichkeiten des FE model updatings
 - **Sensitivitäts-basierende Parameterabschätzung**
 - Steifigkeitsupdating mit statischer Verschiebung
 - Model updating durch Minimierung des Amplitudenresiduums der Übertragungsfunktion
 - Model updating mit Korrelationsfunktionen der Übertragungsfunktion
 - Multi-Model Updating

MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

FINITE-ELEMENTE MODEL UPDATING

■ Sensitivitäts-basierende Parameterabschätzung

- funktionaler Zusammenhang zwischen modalen Charakteristika und Strukturparametern

$$\mathbf{R}_e = \mathbf{R}_a + \mathbf{S} \cdot (\mathbf{P}_u - \mathbf{P}_o)$$

\mathbf{R}_e ... Vektor experimentell ermittelter Daten

\mathbf{R}_a ... Vektor geschätzter Daten für Zustand \mathbf{P}_o

\mathbf{S} ... Sensitivitätsmatrix

\mathbf{P}_u ... aktualisierte Parameterwerte

- Notwendigkeit der Ermittlung der Sensitivitätsmatrix \mathbf{S} im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse

- Ziel: Ermittlung Sensitivitätsfaktoren S_{ij}

- Sensitivitätsfaktoren stellen Änderungsrate einer bestimmten Zielfunktion R_i gegenüber der eines Parameters P_j dar.

- Erläuterung anhand der [finite difference sensitivity analysis](#)

MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

FINITE-ELEMENTE MODEL UPDATING

■ finite difference sensitivity analysis

- Durchführung zweier FE-Rechnungen mit unterschiedlichen Parametern P_j
 - Bildung der Differenz ΔP_j (entspricht Schrittweite und muss im Rahmen physikalischer Gesetzmäßigkeiten sinnvoll abgeschätzt werden)

- Berechnung der finiten Differenz ΔR_i mittels

$$\Delta R_i = R_i \cdot (P_j + \Delta P_j) - R_i(P_j)$$

- Quotient aus beiden Differenzen als Berechnungsgrundlage der Sensitivitätsmatrix

$$S_{ij} = \frac{\Delta R_i}{\Delta P_j} = \frac{R_i \cdot (P_j + \Delta P_j) - R_i(P_j)}{\Delta P_j}$$

MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

FINITE-ELEMENTE MODEL UPDATING

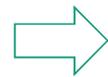
- Lösung der zugrundeliegenden Gleichung ($R_e = R_a + S \cdot (P_u - P_o)$) auf Basis von Abschätzungen
 - Pseudo-Inverse Parameter-Abschätzung
 - Bayes'sche Abschätzung (häufig genutzt)
- Bayes'sche Abschätzung
 - statistisches Verfahren
 - Einführung von Wichtungsfaktoren für Parameter und Zielfunktionale (C_{Ri} und C_{Pj})
 - Wichtungsfaktoren zur Festlegung eines Vertrauensbereiches für Messwerte/Einflussparameter
 - Ziel der Schätzung Minimierung des Fehlers e

$$e = \Delta R^T C_R \Delta R + \Delta P^T C_P \Delta P$$

C_R ... Wichtungsmatrix der Testparameter

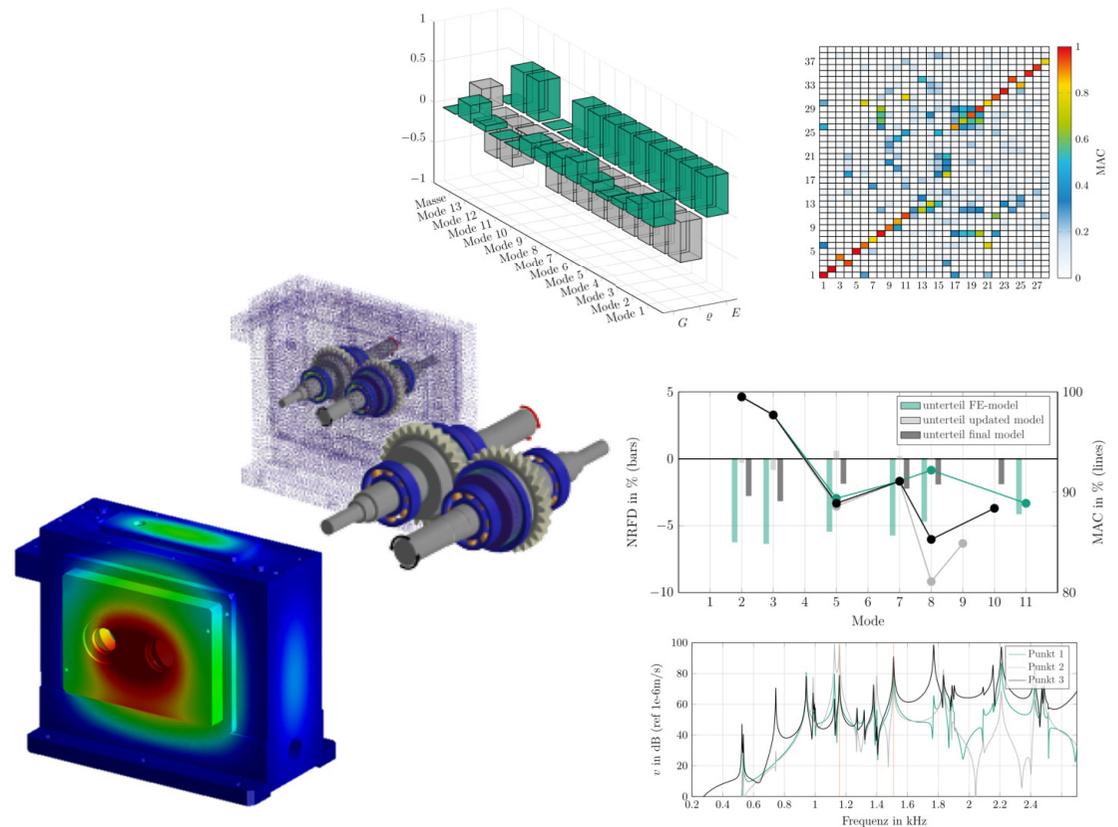
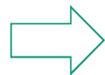
C_P ... Wichtungsmatrix der Modellparameter

GLIEDERUNG



- Kurzvorstellung
- Themeneinleitung
- Messdatenbasierte Simulation

- Vorbetrachtung & Ablauf
- Testvorbereitung
- Messdatenerfassung
- Abschätzung Modalparameter
- Modellvalidierung
- model updating
- Weiteres Vorgehen
- Anwendungsbeispiel

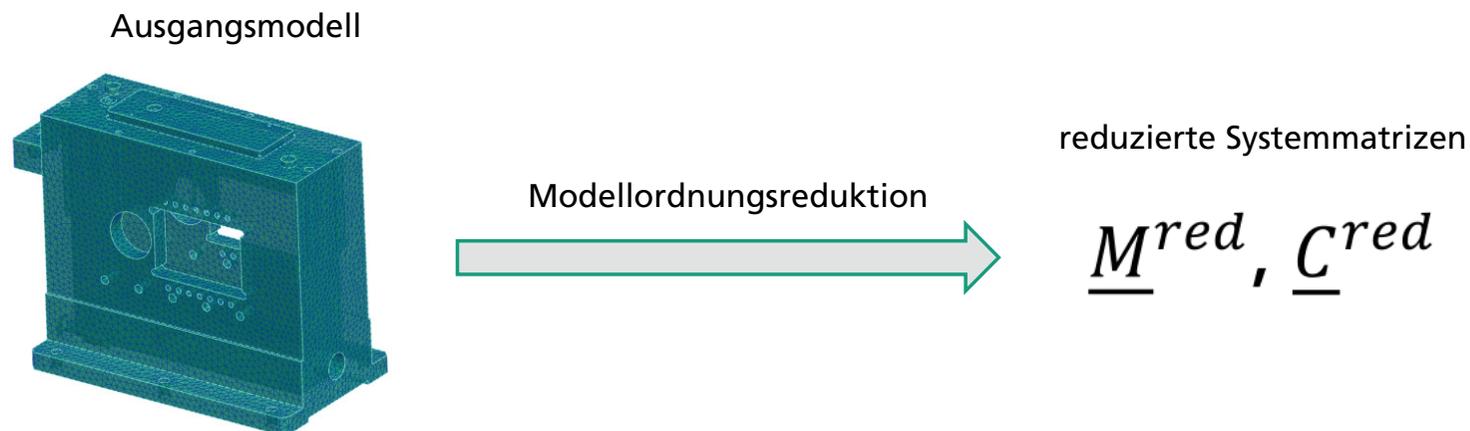


MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

WEITERES VORGEHEN

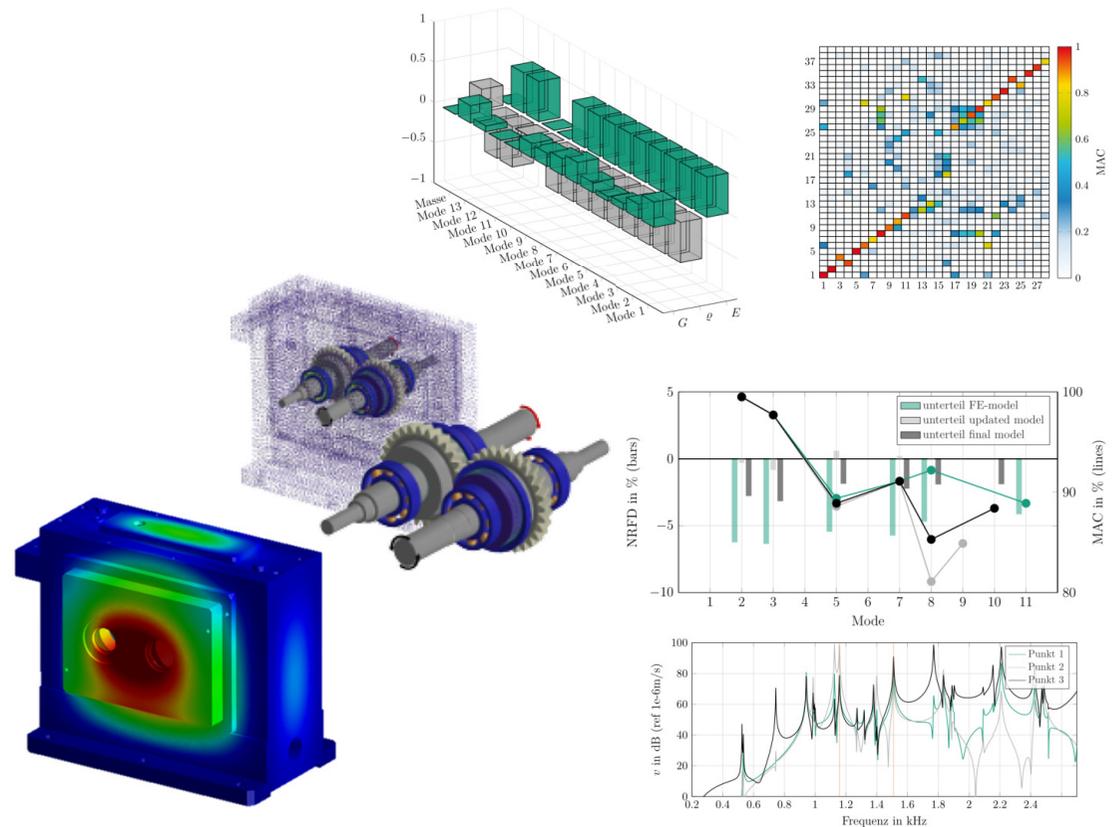
■ Modellordnungsreduktion

- in meisten Fällen notwendig (bspw. Einbindung in MKS-Modell)
- Zweck: Reduktion des Modellfreiheitsgrades
- unterschiedliche Verfahren vorhanden (z. B. CMS – **C**omponent **M**ode **S**ynthesis)
- Anforderung: reduziertes Modell muss dynamische Systemeigenschaften ausreichend genau wiedergeben.



GLIEDERUNG

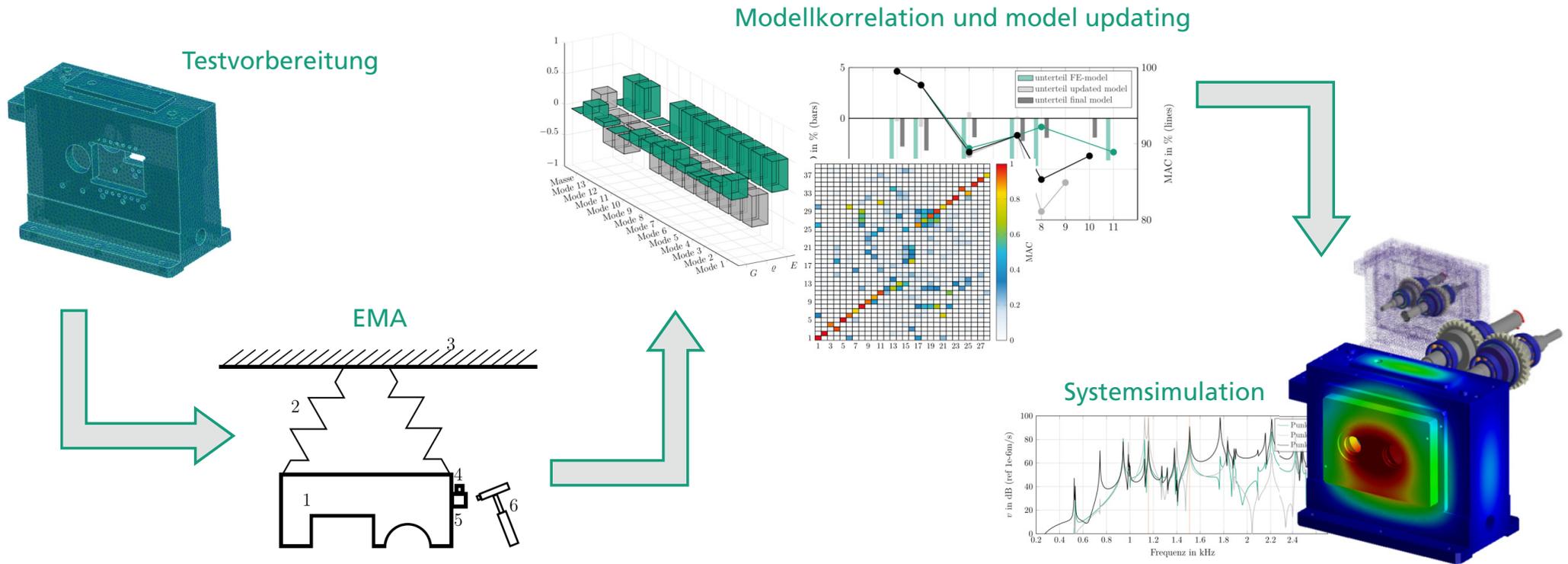
- Kurzvorstellung
- Themeneinleitung
- Messdatenbasierte Simulation
 - Vorbetrachtung & Ablauf
 - Testvorbereitung
 - Messdatenerfassung
 - Abschätzung Modalparameter
 - Modellvalidierung
 - model updating
 - Weiteres Vorgehen
- ➔ ■ Anwendungsbeispiel



MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

ANWENDUNGSBEISPIEL

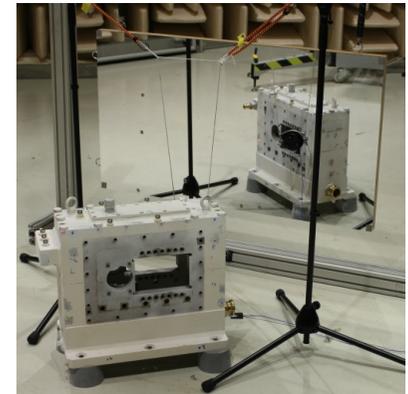
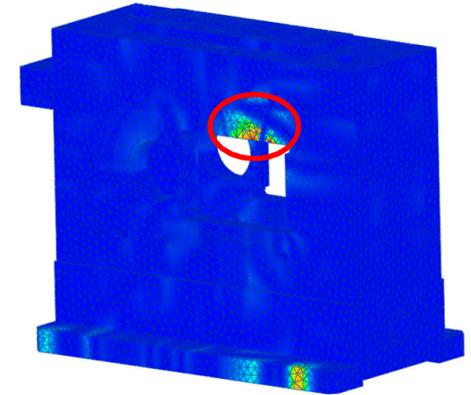
■ Modellbeispiel: Prüfgetriebegehäuse



MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

ANWENDUNGSBEISPIEL

- Beispiel: model updating Prüfgetriebegehäuse
- Vorgehen
 - Testvorbereitung auf Basis NMD-Verfahren
 - Lokalisierung der Anregungsposition
 - Durchführung der Messung mittels Laser-Scanning-Vibrometer und Shaker
 - Ankopplung des Shakers über Stinger (Messung bis 3kHz)
 - Erfassung eines Großteils der Struktur über Spiegel und anschließendem Stitchen der Messungen (Erzeugen einer kombinierten Datei)
 - Messung von rund 1100 Freiheitsgraden (Übertragungsfunktionen)
 - anschließendes curve fitting aus Basis gemessener Daten
 - Modellkorrelation und model updating
 - weiterführende Simulation (dynamisch und akustisch)



MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

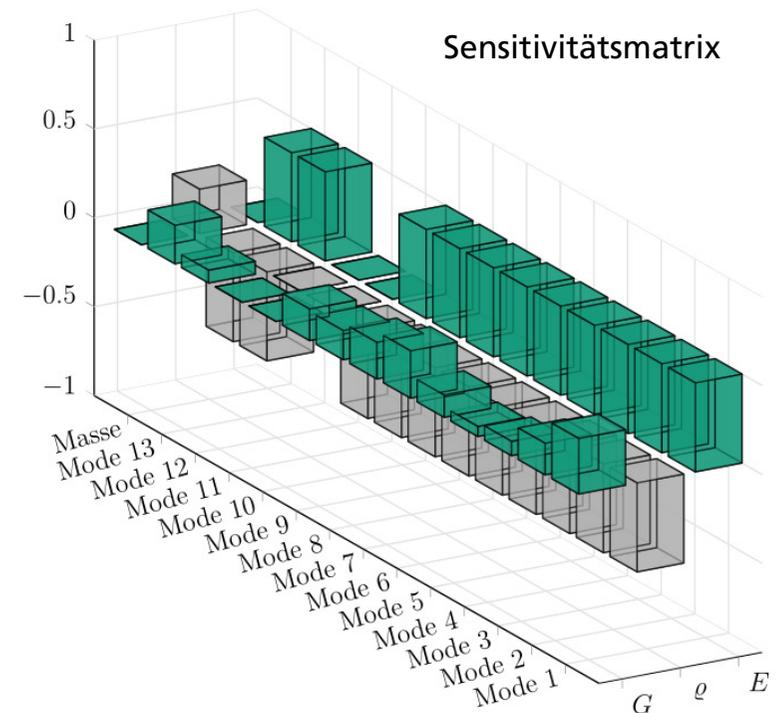
ANWENDUNGSBEISPIEL

■ model updating

- Zielgrößen: Eigenfrequenzen und Eigenmoden
- Variationsparameter: E-Modul, Dichte(-verteilung), Schubmodul

■ Ergebnis model updating

- ermittelte Sensitivitätsmatrix (Bsp. Moden)
 - Plausibilität: Masse wird lediglich durch Dichte beeinflusst, nicht durch E-Modul und Schubmodul
 - E-Modul mit größtem Anteil
 - Ausgangsbasis für Modelländerung

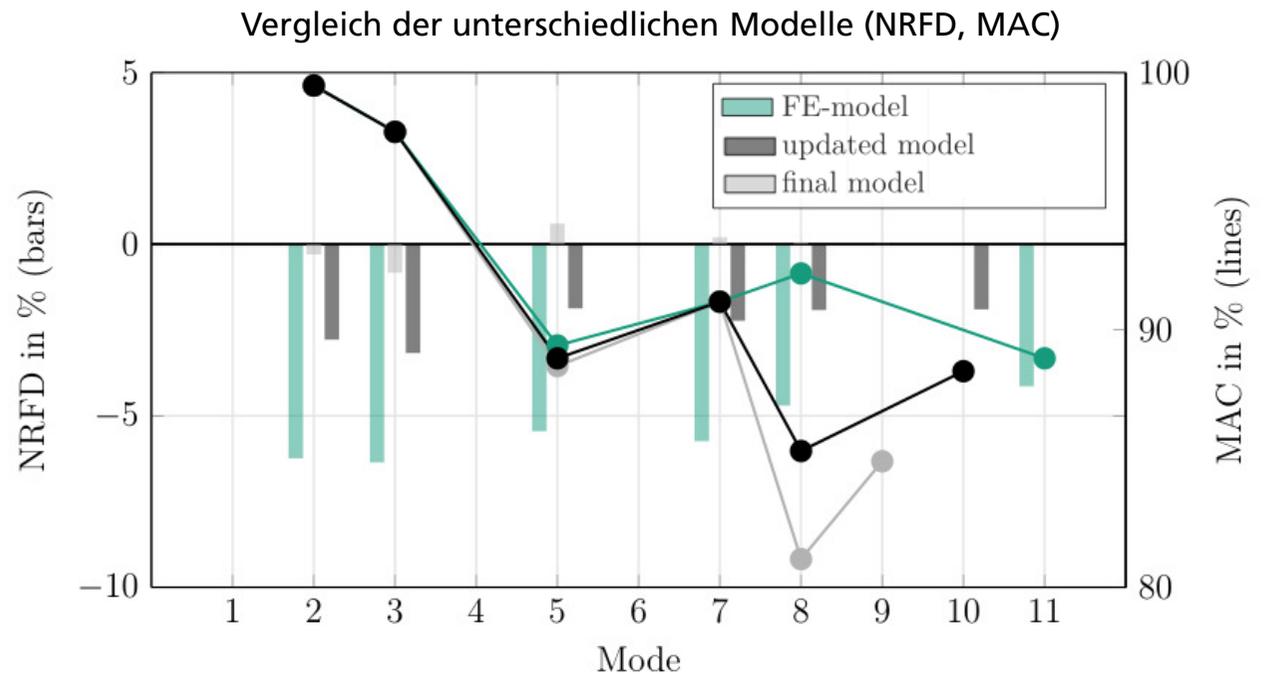


MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

ANWENDUNGSBEISPIEL

■ Ergebnis model updating

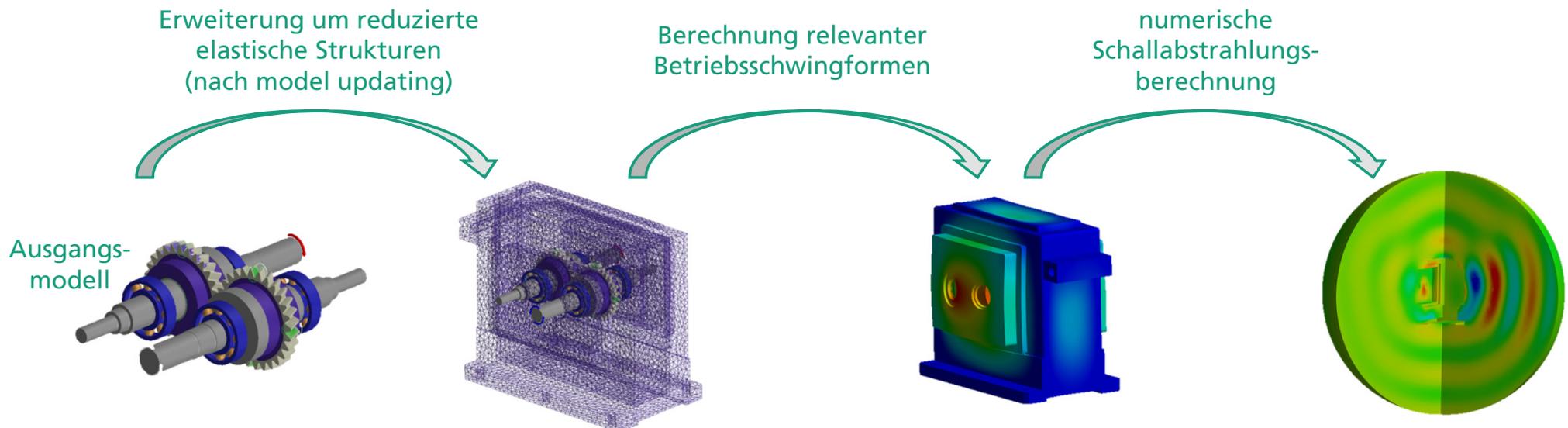
- deutliche Annäherung der Eigenfrequenzen des Simulationsmodells an Messung
- ohne model updating NRFD-Kriterium bei einigen Schwingformen deutlich größer als 5%
- nach model updating Frequenzabweichungen kleiner 1% ohne signifikant Moden zu beeinflussen



MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

ANWENDUNGSBEISPIEL

- Aktualisiertes FE-Modell kann nun zur weiteren Analyse in Gesamtsystemmodell eingebunden werden.
- Beispielanwendung: Schallabstrahlungsberechnung eines Getriebegehäuse zur Bewertung der Abstrahlcharakteristik



MESSDATENBASIERTE SYSTEMSIMULATION

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fraunhofer Institut
für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)
Außenstelle Dresden:
Nöthnitzer Straße 44
01187 Dresden



Jan Bräunig

jan.braeunig@iwu.fraunhofer.de

+ 49 351 4772 2321