

Fluid-Struktur-Akustik als Analyse mit bidirektionaler Kopplung und Schalldurchgang

Reinhard Helfrich

INTES GmbH, Stuttgart

info@intes.de

www.intes.de

INTES

INTES Ingenieurgesellschaft für technische Software mbH



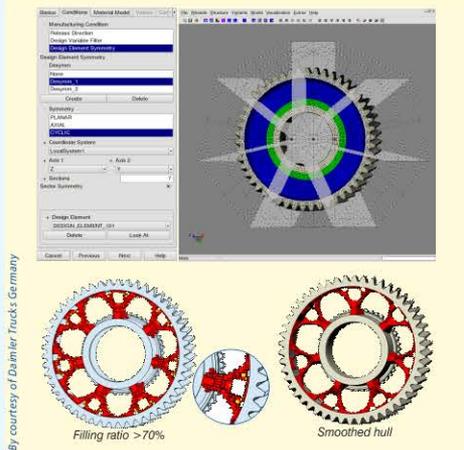
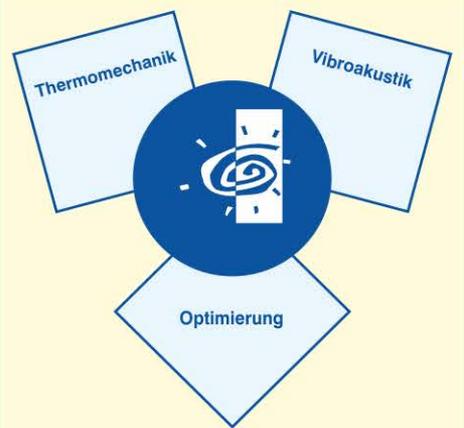
Unabhängiges Unternehmen für Finite Element (FE) Technologie seit 1984 mit Niederlassungen in Stuttgart, Paris und Tokio

Das Angebot umfasst die eigene FE-Berechnungssoftware PERMAS mit VisPER, Softwareentwicklung im PERMAS-Umfeld und Berechnungsdienstleistungen

Integrierte Software für Thermomechanik, Vibroakustik und Optimierung



INTES
 INTES GmbH
 Schulze-Delitzsch-Str. 16
 D-70565 Stuttgart
 Tel + 49-711-78499-0
 Fax + 49-711-78499-10
 E-Mail: info@intes.de
 http://www.intes.de



Hohe Rechenleistung durch Parallelisierung (über Multithreading) und spezielle Algorithmen (Kontakt, MLDR, Fluid-Struktur-Akustik)

Einheitliche Konzepte für inkompatible Netze, Teilstrukturtechnik, Submodelle

Simulationsgetriebener Entwurf durch integrierte Optimierung (Topologie, Form, Dimensionen, Sicken) mit lokalen und globalen Methoden

1984: Beginn der Software-Industrialisierung und neuer Entwicklungen für Optimierung, Akustik und Zuverlässigkeit

1989: Beginn eines vollständigen Neuentwurfs der Software für höhere Entwicklungsgeschwindigkeit und Nastran-Verträglichkeit

1993: PERMAS Version 5 verfügbar, der neuen Softwarebasis für die weitere Entwicklung

2005: Beginn der Entwicklung einer neuen graphischen Benutzerschnittstelle VisPER (Visual PERMAS)

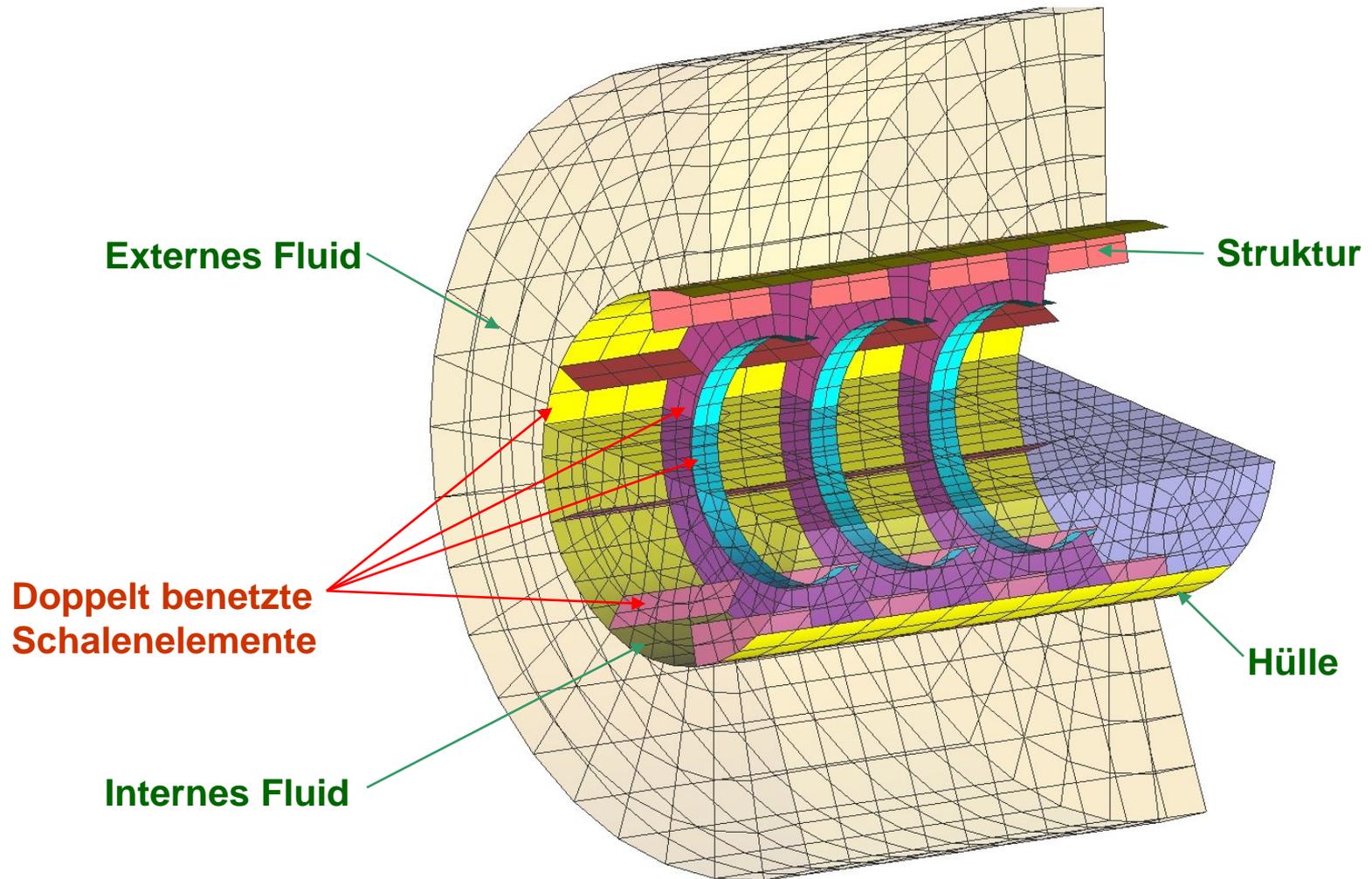
2008: VisPER Version 1 einsetzbar

2012: PERMAS Version 14 und VisPER Version 3



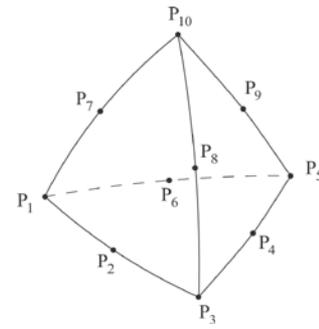
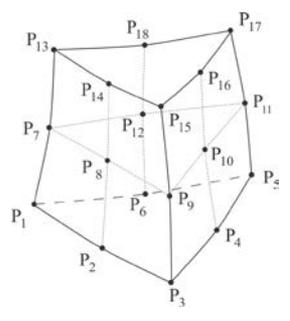
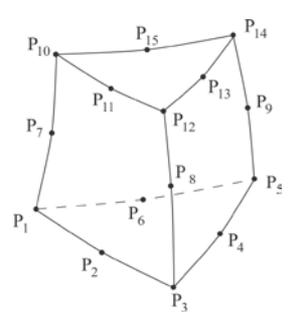
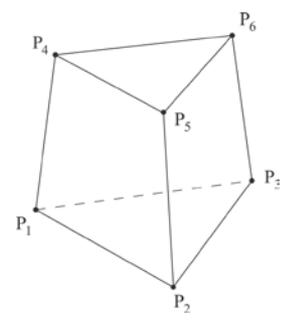
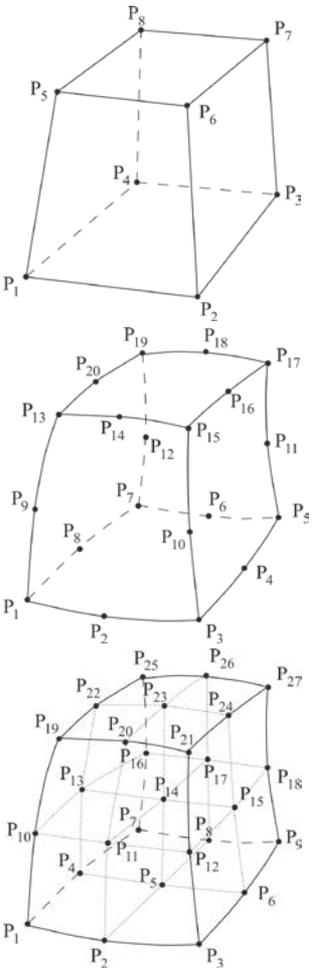
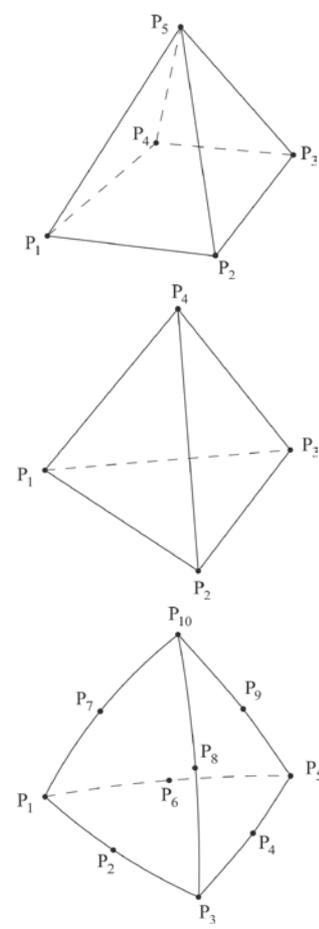
- Methoden der Strukturmechanik (Schwingungen)
- Anwendung auch auf Fluide allein (Akustik) und auf Strukturen, die mit Fluiden gekoppelt sind (Fluid-Struktur-Akustik)
- Dadurch Erweiterung der klassischen Strukturmodelle um die angrenzenden Fluidmodelle mit einer geeigneten Kopplung
- Diese Kopplung wird physikalisch durchgeführt, d.h. die normale Verschiebung der Struktur ist stets gleich der normalen Verschiebung des Fluids

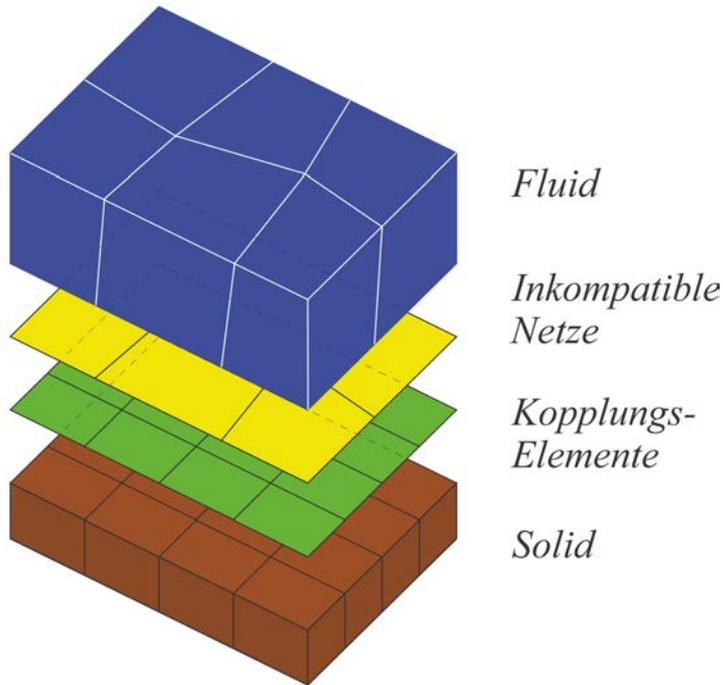
Beispiel für Fluid-Struktur-Akustik



Fluid-Modell mit Finiten Elementen

Akustik	Fluid alleine	Fluid gekoppelt mit Struktur
Freiheitsgrade	Druckänderung	+ Verschiebung
Elemente	Fluid, Abstrahlrandbedingung, Oberflächenwellen, halbumendliche für mitbewegte Masse	+ Kopplung, Struktur
Materialwerte	Dichte, Kompressibilität (auch inkompressibel)	+ Dichte, E-Modul, Querkontraktion



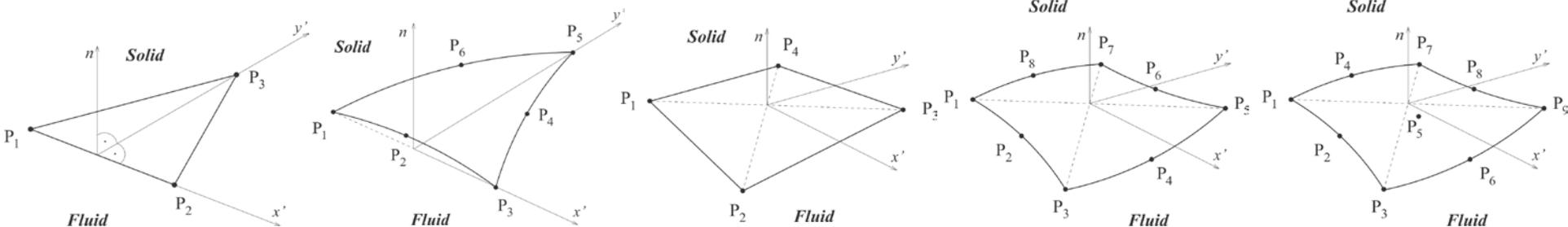


- **Fluid- und Strukturnetz** sind häufig nicht kompatibel.

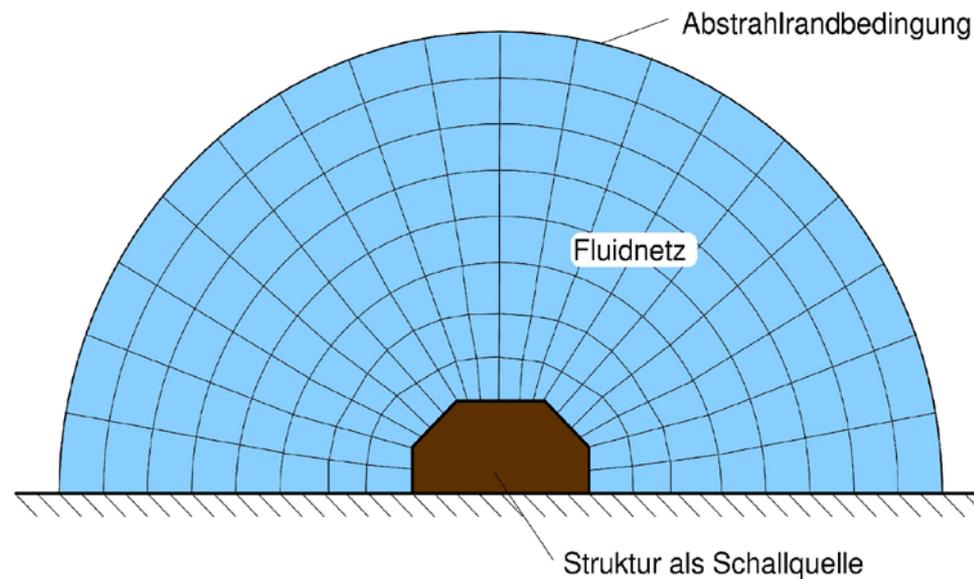
Gründe:

- Fluid und Struktur werden getrennt vernetzt
- Strukturnetze sind häufig wesentlich feiner als das zugehörige Fluidnetz wegen der unterschiedlichen Schallgeschwindigkeit

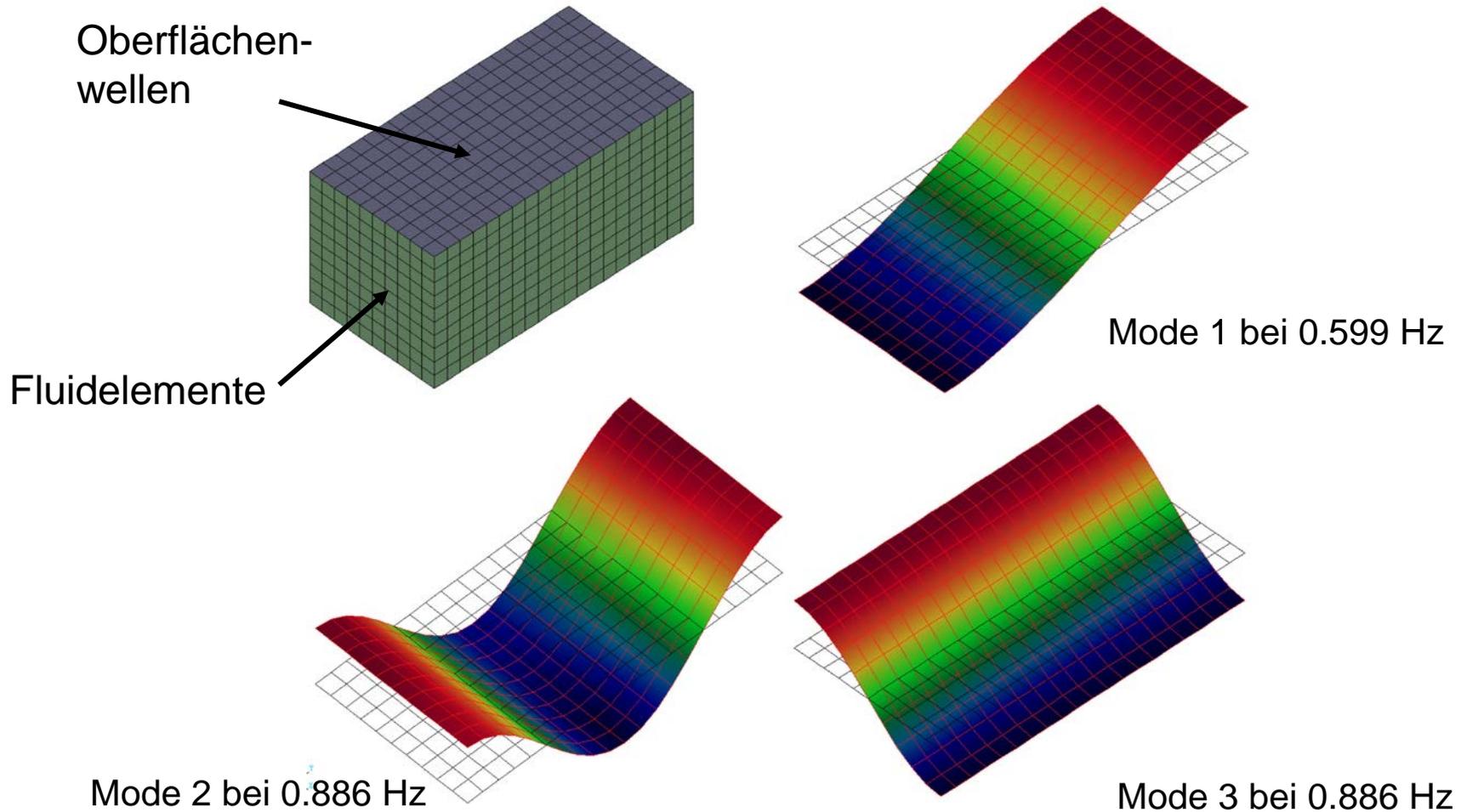
- **Lösung durch inkompatible Netze**



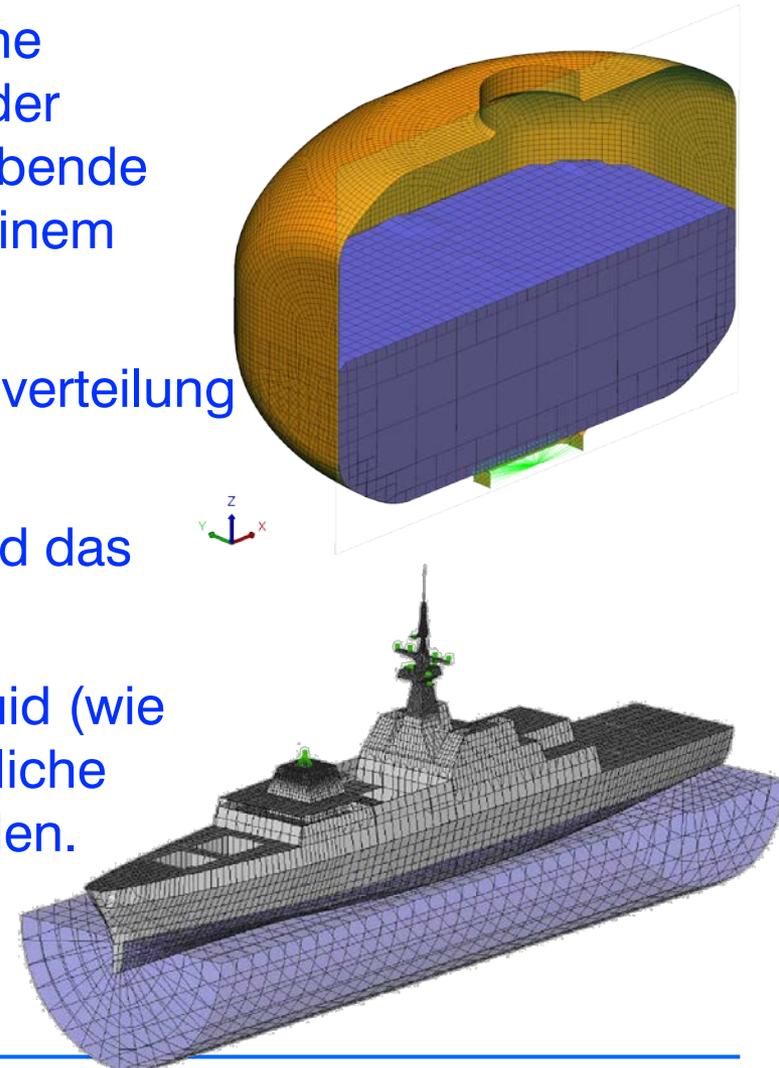
Reflexionsfreie Grenzfläche über Abstrahlrandbedingungen,
z.B. kugelförmige Grenzfläche nach Bayliss-Turkel



Oberflächenwellen



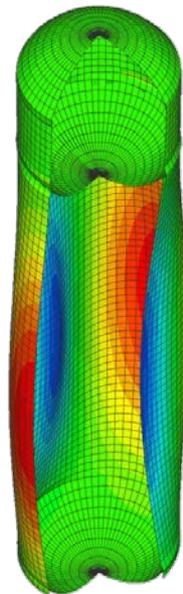
- Oft genügt es für die strukturdynamische Analyse, dass man ein umgebendes oder eingeschlossenes Fluid (wie das umgebende Wasser bei Schiffen oder das Fluid in einem Tank) als Masse mitnimmt.
- Dabei kommt es darauf an, die Massenverteilung korrekt zu erfassen.
- Durch eine Modellierung des Fluids wird das ermöglicht.
- Selbst ein unendlich ausgebreitetes Fluid (wie bei einem Schiff) kann über halbunendliche Elemente näherungsweise erfasst werden.



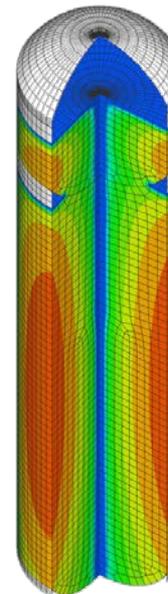
Eigenwerte

Akustik	Fluid alleine	Fluid gekoppelt mit Struktur
Reelle Eigenwerte und Eigenformen	ja	gekoppelt, mit Energieverteilung
Statische Zusatzmoden	ja	ja
Dynamische Kondensation	nach Craig-Bampton	trocken (nur auf Verschiebungsfhg.) oder benetzt (auch auf Druckfhg.)

Verschiebung



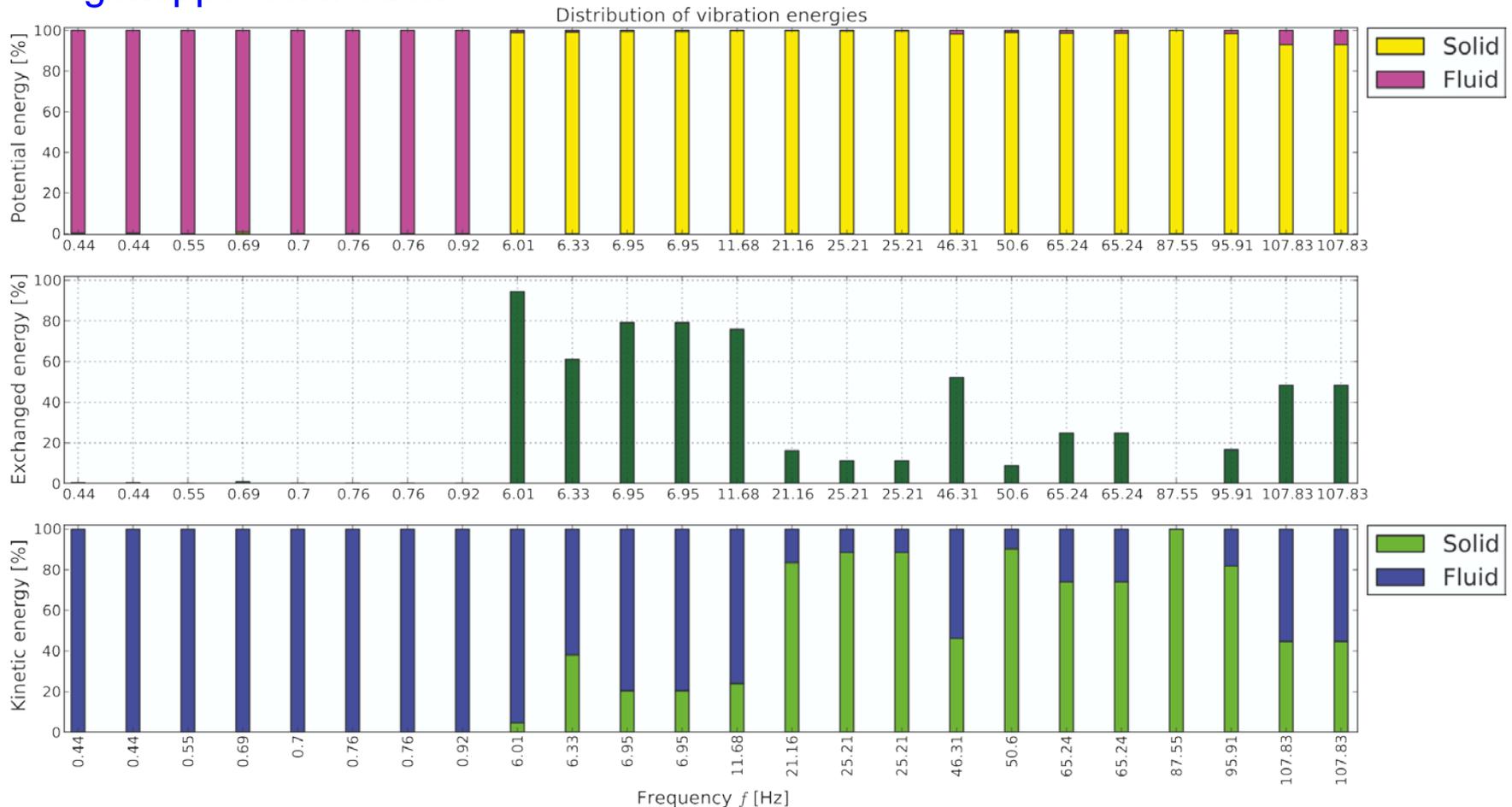
Druckverteilung



Reelle gekoppelte Eigenschwingungsform eines Raketentanks

Energieverteilung in gekoppelten Eigenformen

- Relative Verteilung der Energie auf Struktur und Fluid für die Eigenformen
- erlaubt die Identifikation von struktur-dominanten, fluid-dominanten und stark gekoppelten Moden



Es sind zwei Optionen zur dynamischen Kondensation verfügbar:

- **‘Benetzte’ Kondensation**

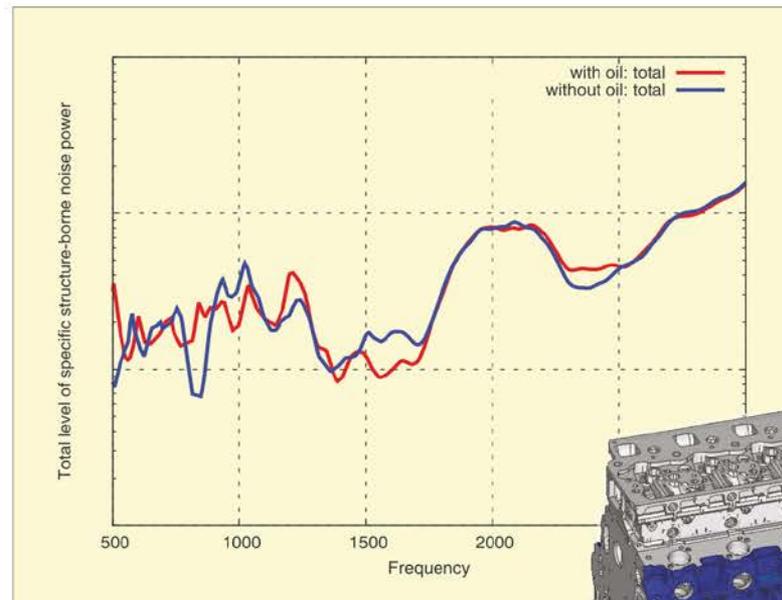
- Getrennte Berechnung von Struktur- und Fluidmoden in Teilstrukturen. Die externen Moden sind Verschiebungs- und Druckmoden.
- Die Gesamtlösung besteht in einer gekoppelten Schwingungsanalyse.

- **‘Trockene’ Kondensation**

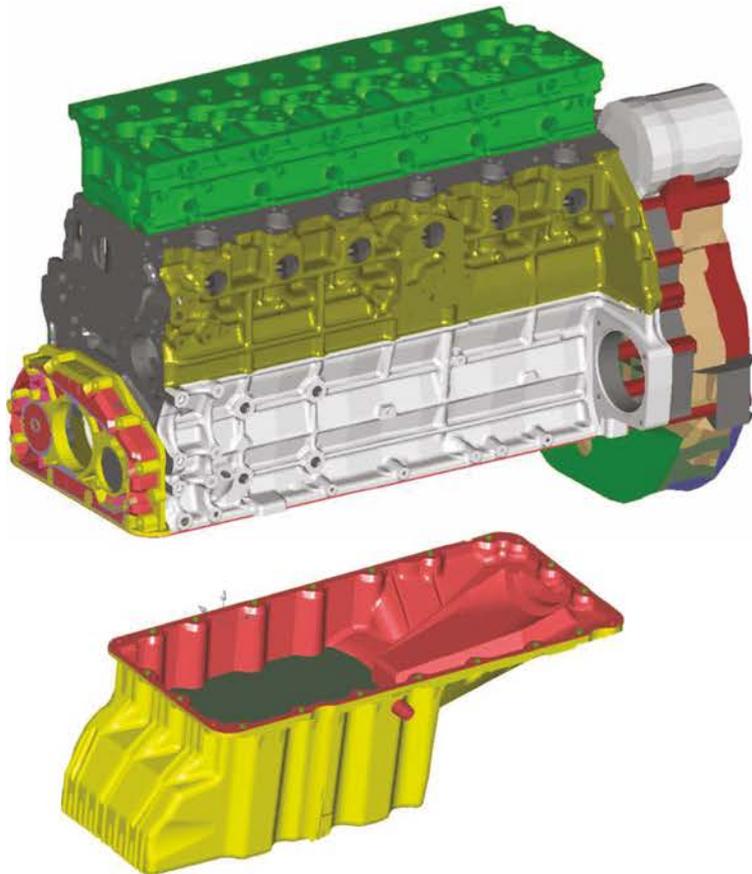
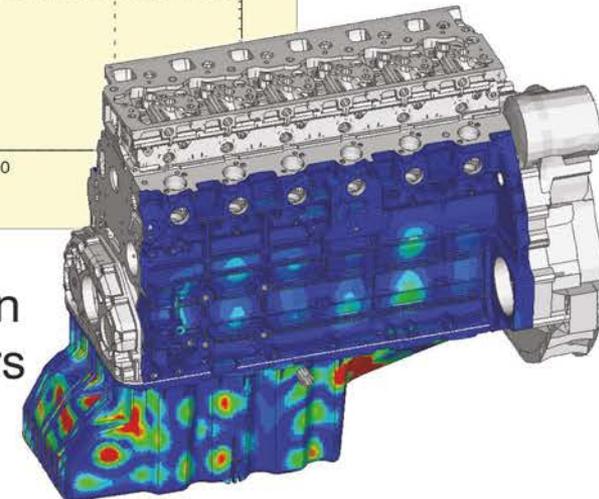
- In den Teilstrukturen wird ein gekoppeltes Eigenwertproblem gelöst, d.h. die Fluidkomponente wird isoliert. Die externen Moden sind gekoppelte Moden (ohne Druckfreiheitsgrade).
- Die Gesamtlösung ist ein rein strukturdynamisches Problem, da keine Druckfreiheitsgrade mehr vorhanden sind.
- Erleichtert die Nutzung akustischer Komponenten in ansonsten nur mechanisch aufgebauten Komponenten (dabei bleibt die Möglichkeit der Rückrechnung auf die Druckfreiheitsgrade erhalten).

Motor mit Anbauteilen

Spezifische Körperschalleistung als Indikator für Luftschallentstehung



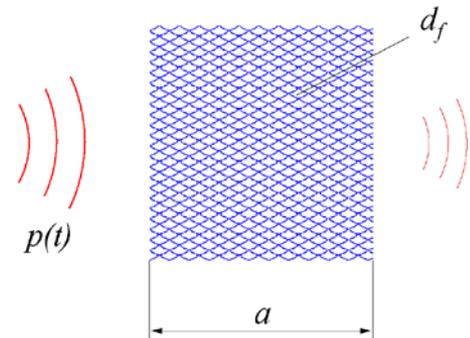
Einfluss des Öls auf den Körperschall des Motors



Alle Bilder mit freundlicher Genehmigung der Daimler AG

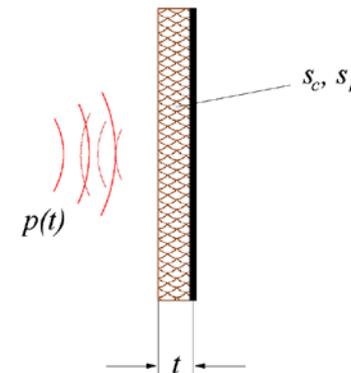
Dynamische Antwort

Akustik	Fluid alleine	Fluid gekoppelt mit Struktur
Dämpfung	Absorption an Oberflächen und im Volumen	+ jede Strukturdämpfung
Modale dynamische Antwort	im Frequenz- und Zeitbereich	im Frequenz- und Zeitbereich
Direkte dynamische Antwort	im Frequenzbereich	im Frequenzbereich



Absorption im Volumen

$$V_f = -d_f \dot{u}_f$$

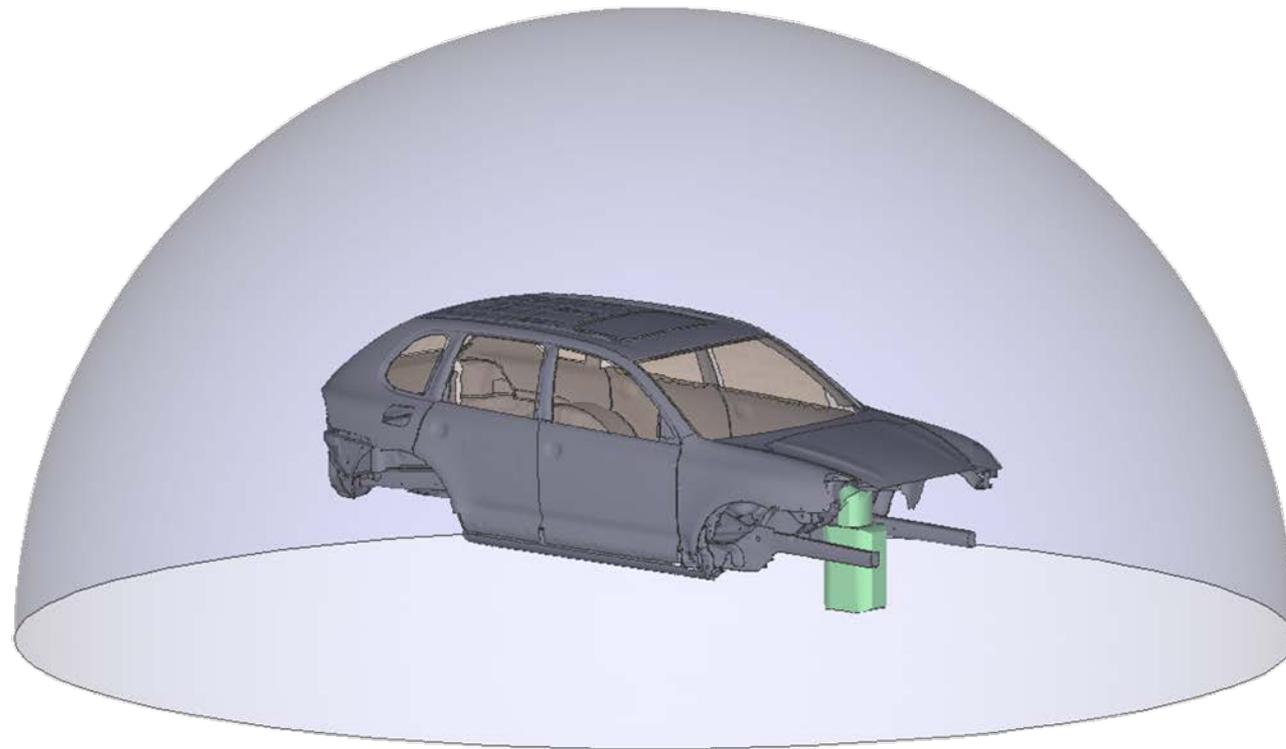


Absorption an der Oberfläche
(Normalimpedanz)

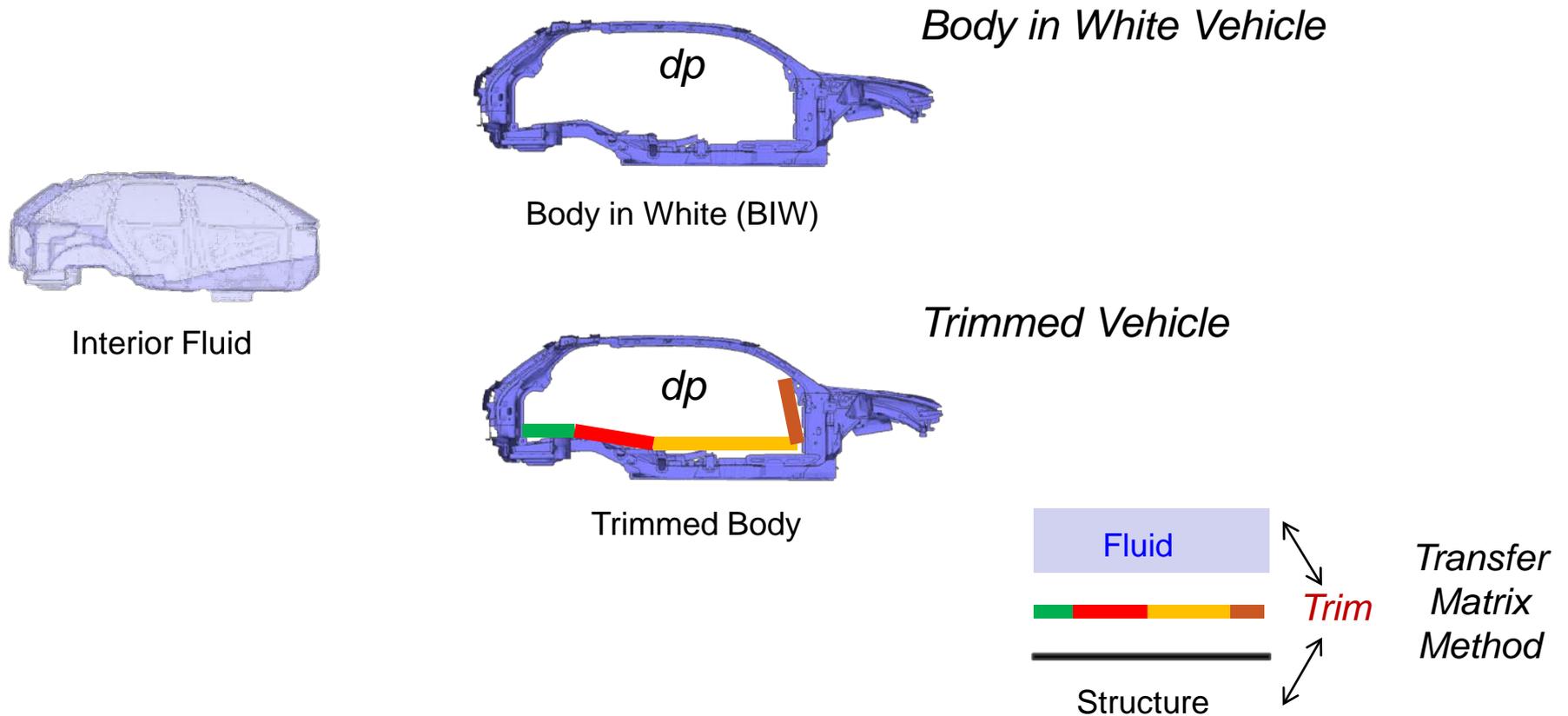
$$\dot{u}_n = s_c p + s_k \dot{p}$$

Annahme: $\lambda \gg t$

Innengeräusche eines SUV



- Körperschall- und Luftschallanregung für Rohkarosserie (BIW) und 'Trimmed Body'
- Vergleich von Messung (durchgeführt von Autoneum, Winterthur, Schweiz) und Berechnung (durchgeführt von INTES)



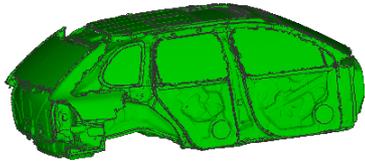
Struktur- und FS-Modell



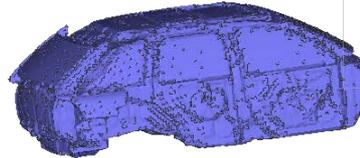
DISP DOF: 2 900 367
PRES DOF: 502 696



FS coupling to inner fluid

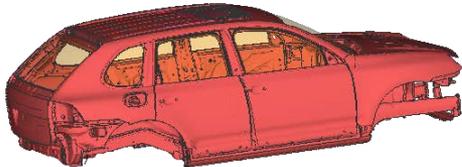


Inner fluid



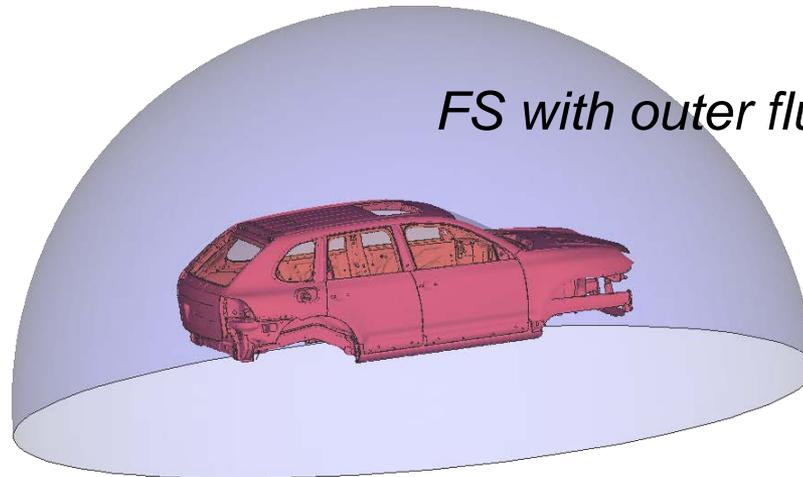
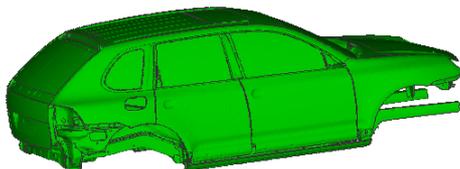
FS with inner fluid

Structure model



Outer fluid and radiation boundary condition

FS coupling to outer fluid

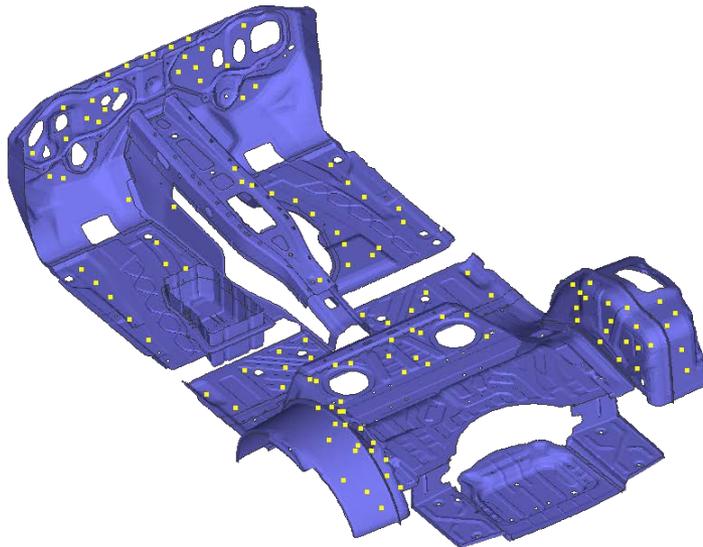


FS with outer fluid

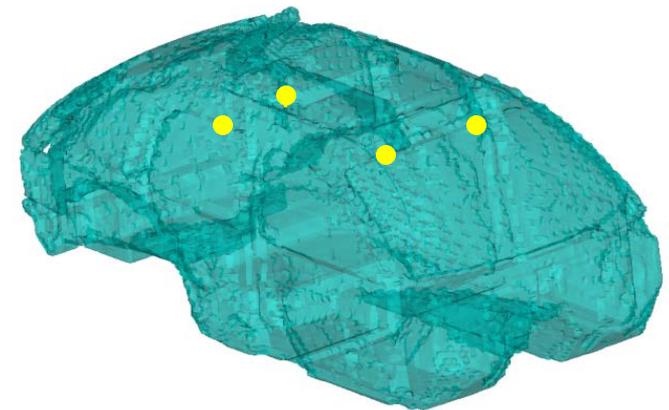
FS Model

- Die Messpunkte sind in folgenden Bereichen angeordnet:
 - 1) Instrumententafel (links und rechts)
 - 2) Boden (links und rechts, vorne und hinten)
 - 3) Tunnel (links, oben und rechts)
 - 4) Radkasten (links und rechts)
 - 5) Vier Mikrophone im Inneren

Beschleunigungsaufnehmer

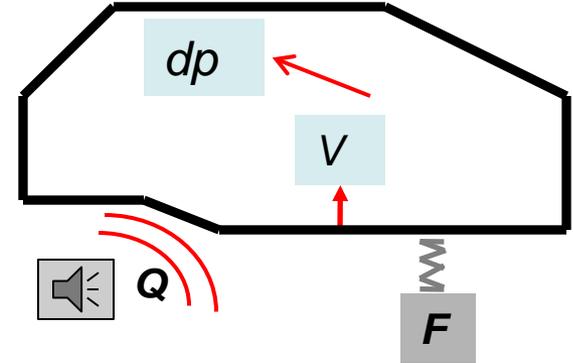


Mikrofone



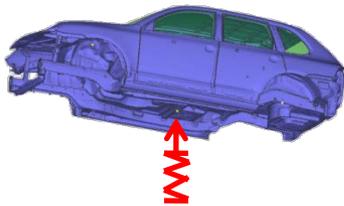
- Berechnungsart: Eigenwertanalyse
Modaler Frequenzgang

- Anregungen (Sinus von 5 bis 500 Hz):

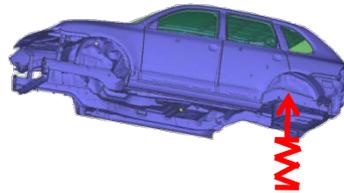


1) Körperschall

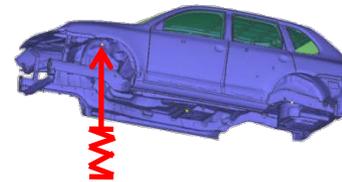
$F[N]$



Getriebeaufhängung



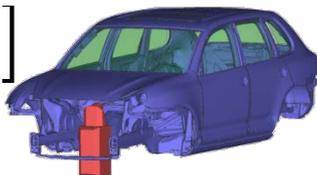
Hinterachsträger



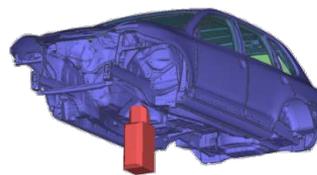
Federdom

2) Luftschall

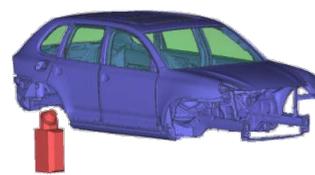
$\dot{Q}[mm^3/s^2]$



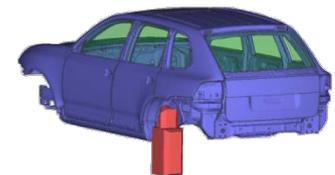
Motorraum



Getriebe



Auspufftopf



Radkasten

- Messgrößen für die Korrelation:
 - v/F – Transfer functions (RMS normal velocity / input force)
 - p/F – Transfer functions (RMS microphone SPL / input force)
 - v/Q – Transfer functions (RMS normal velocity / volume velocity acoustic source)
 - p/Q – Transfer functions (RMS microphone SPL / volume velocity acoustic source)

$$v_{RMS} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_i^2}{N}}}{v_0} \right)$$

$$v_0 = 1000 \text{ mm/s}$$

$$p_{RMS} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N p_i^2}{N}}}{p_0} \right)$$

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-11} \text{ MPa}$$

- Die Korrelation zwischen Simulation und Messung wurde ausgewertet mit dem „Frequency Response Assurance Criterion“ (FRAC).

$$FRAC = \frac{\left(\sum_{f_i}^{f_{\max}} FRF_{meas}(f_i) FRF_{cal}(f_i) \right)^2}{\sum_{f_i}^{f_{\max}} FRF_{meas}^2(f_i) \sum_{f_i}^{f_{\max}} FRF_{cal}^2(f_i)}$$

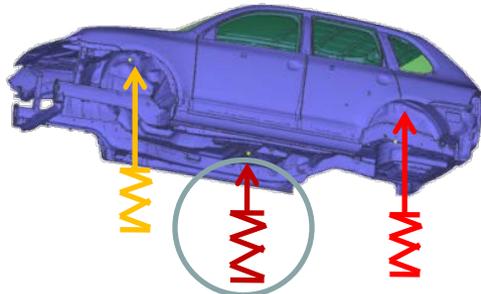
$$FRF_{\alpha}(f_i)$$

$$\alpha = meas, cal$$

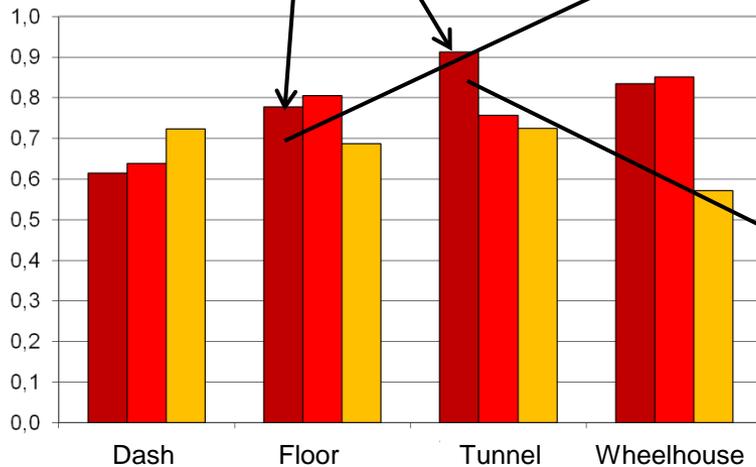
Strukturanregungen

v/F Response in frequency domain [Hz]

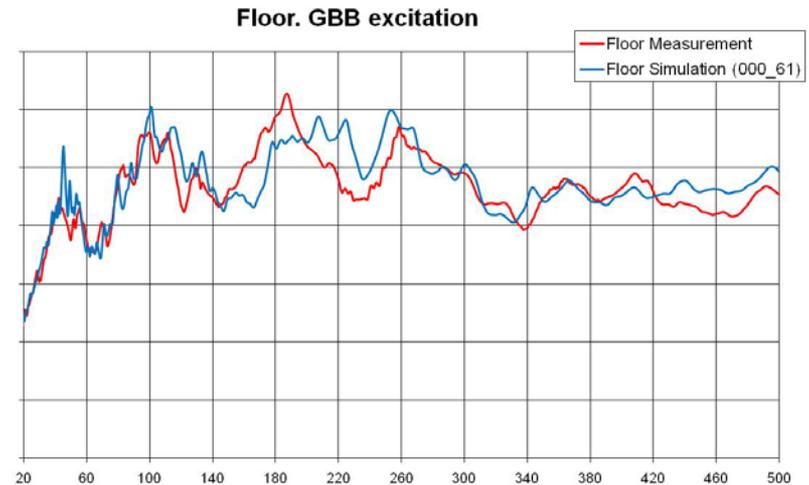
— Measurement
— Simulation



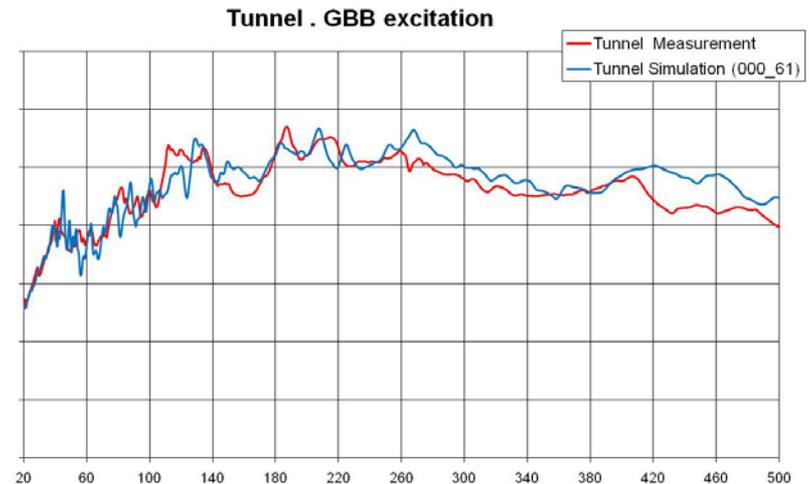
FRAC



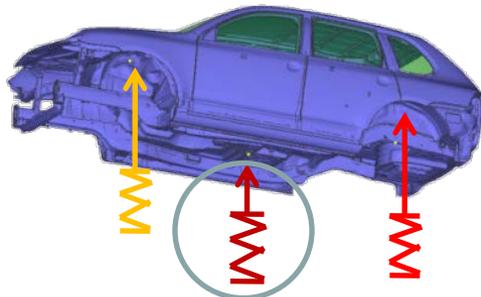
Mobility [(mm/s)/N]



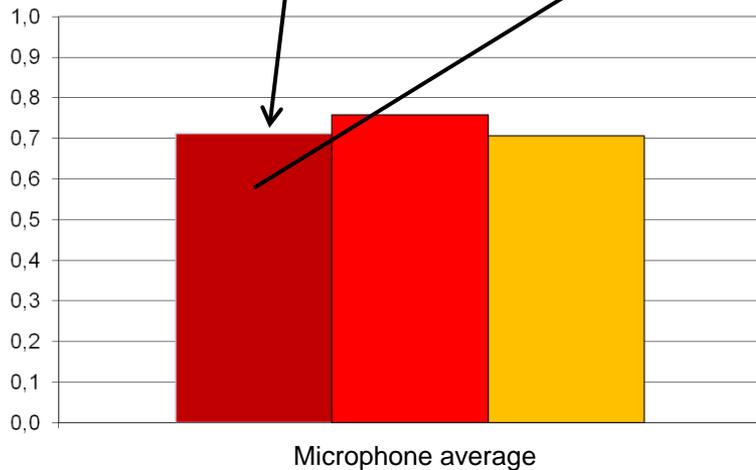
Mobility [(mm/s)/N]



Strukturanregungen



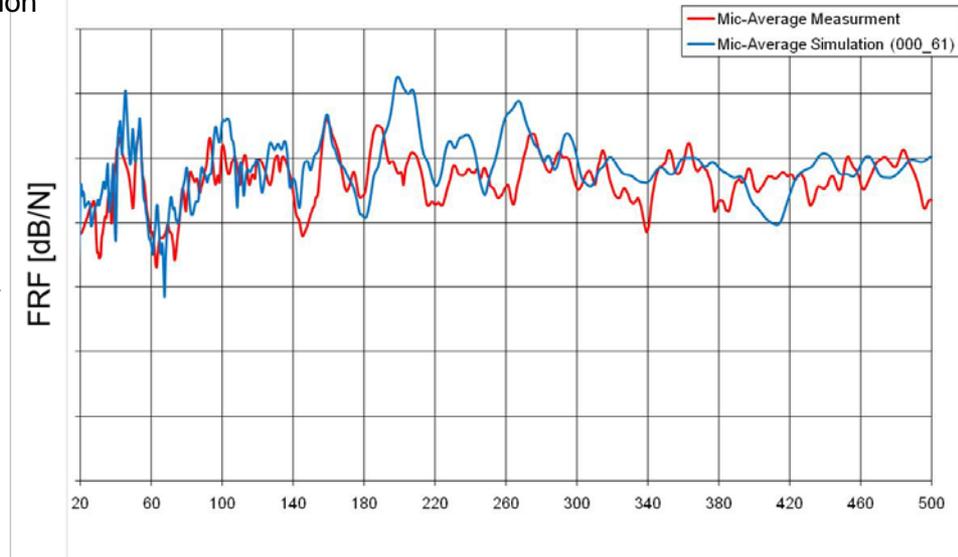
FRAC



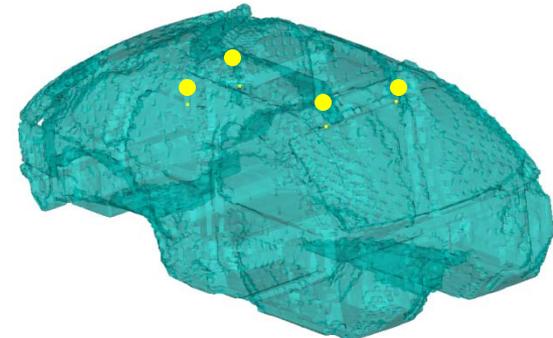
p/F Response in frequency domain [Hz]

— Measurement
— Simulation

Mic. Average FRF - Structural Excitation GBB

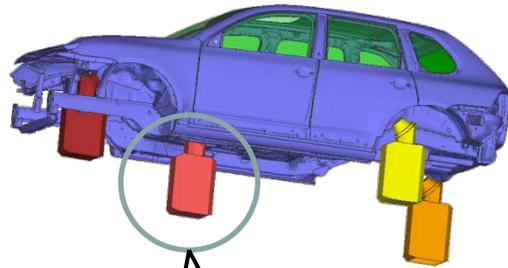


Mikrofone

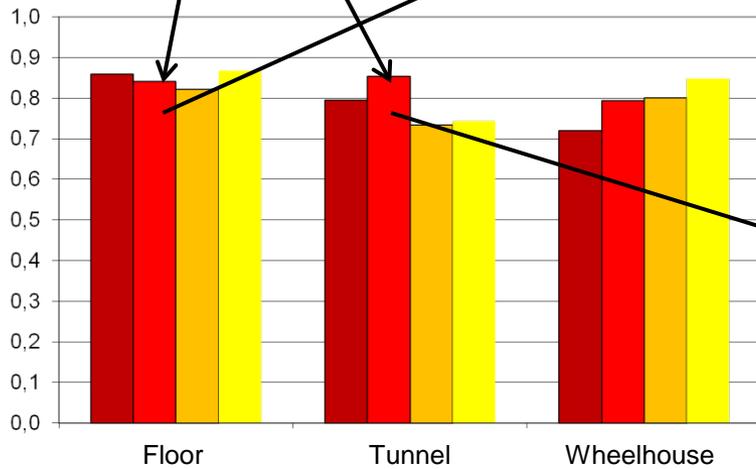


Vergleich Luftschall BIW Messung/Berechnung

Schallanregungen

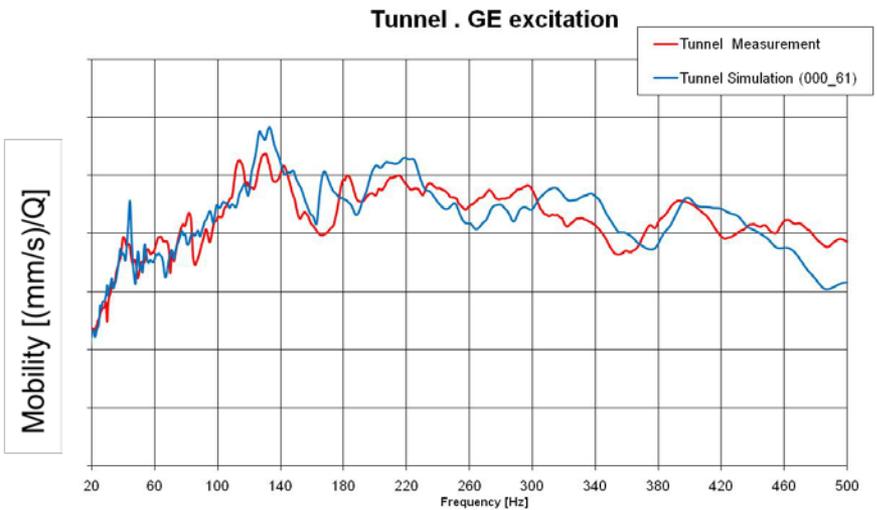
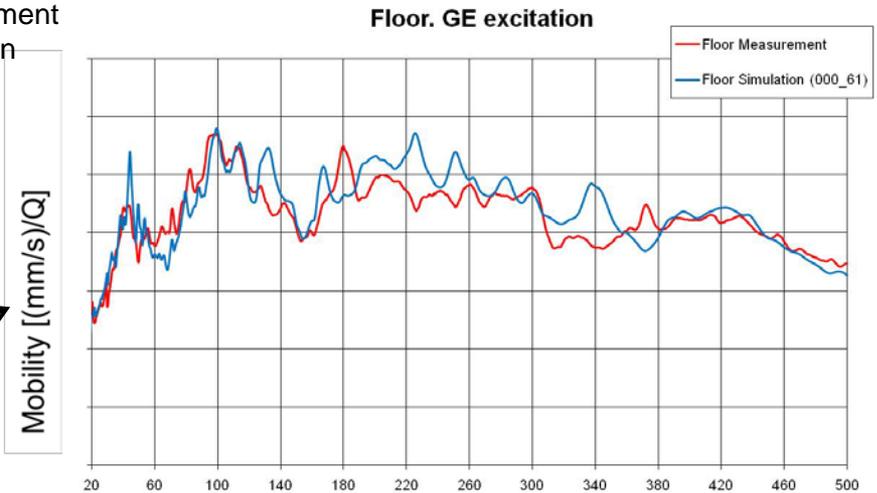


FRAC

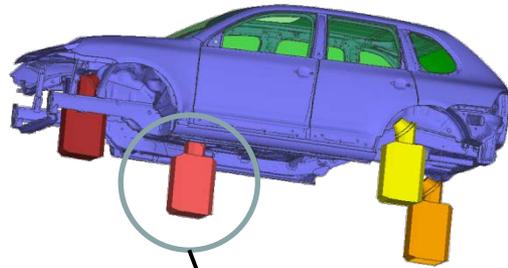


v/Q Response in frequency domain [Hz]

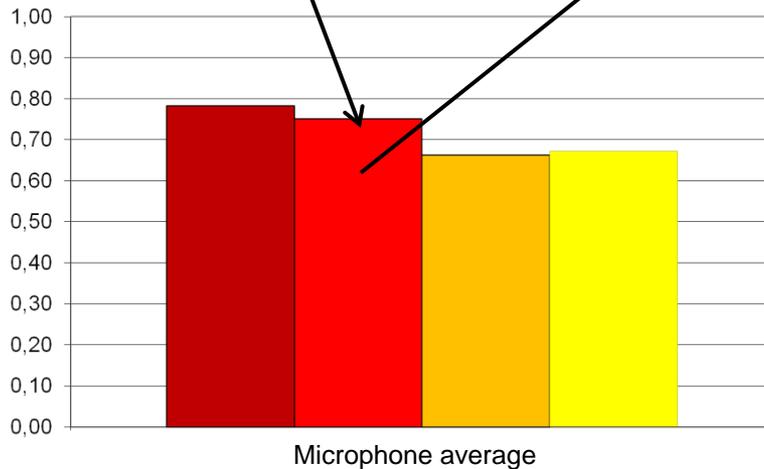
— Measurement
— Simulation



Schallanregungen

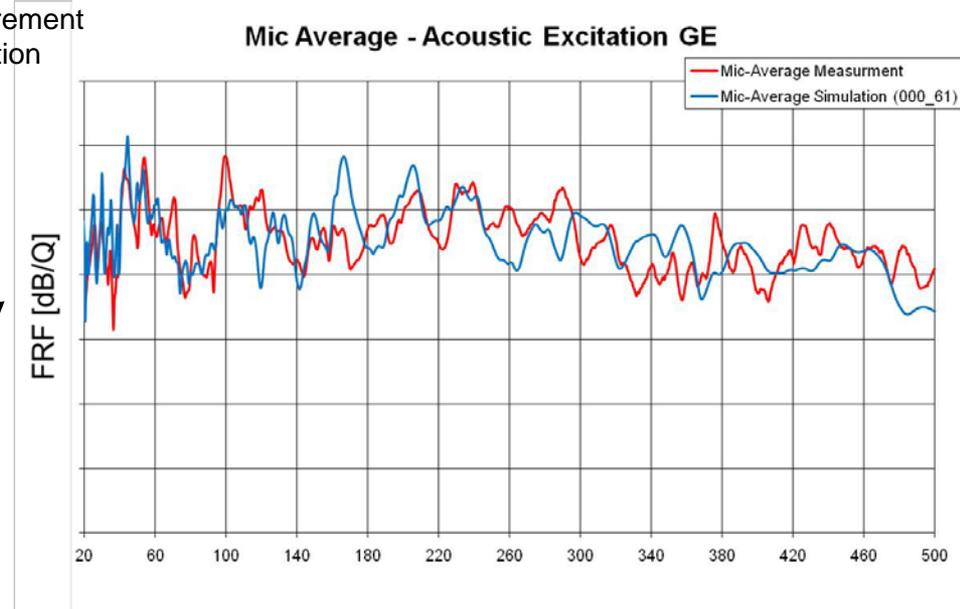


FRAC

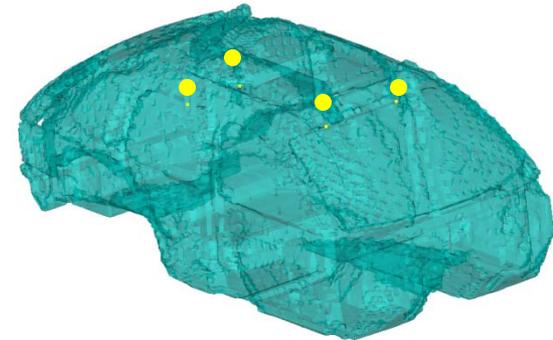


p/Q Response in frequency domain [Hz]

— Measurement
— Simulation



Mikrofone

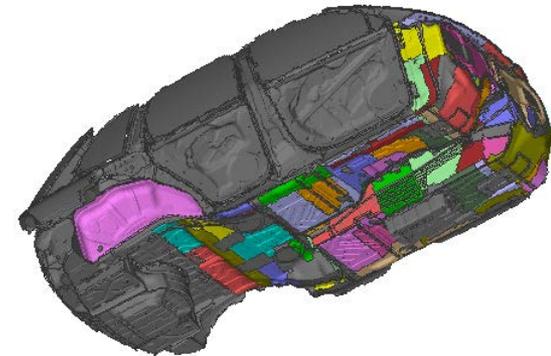


- Es wurden 80 gedämmte Bereiche berücksichtigt

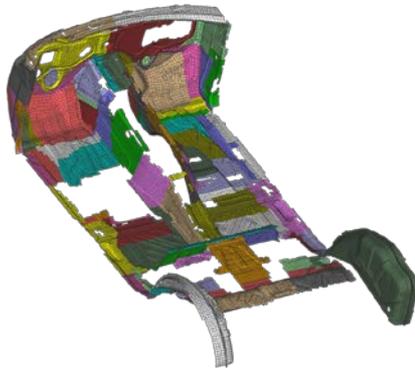
Kinematische Fluid-Struktur-Kopplung



Kopplung mit Dämmung

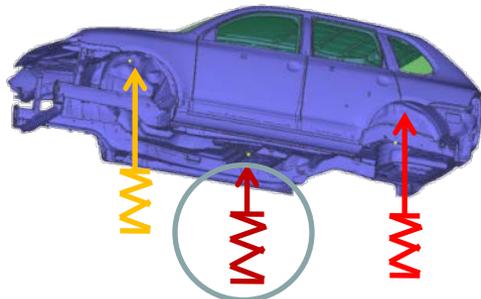


TB mit 80 gedämmten Bereichen



- Die physikalische Beschreibung des Dämmmaterials (und der daraus ermittelten Impedanzmatrizen) erfolgt direkt auf den Kopplungselementen (unter Verwendung einer Software von Autoneum, Winterthur, Schweiz).

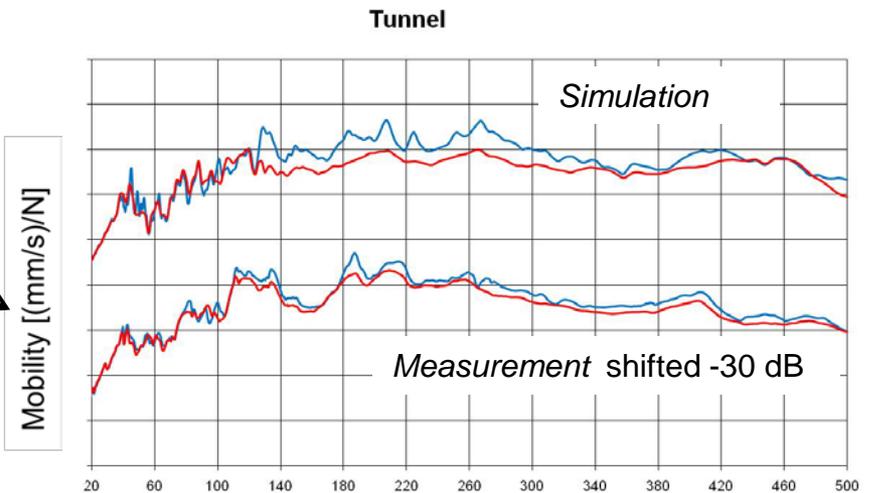
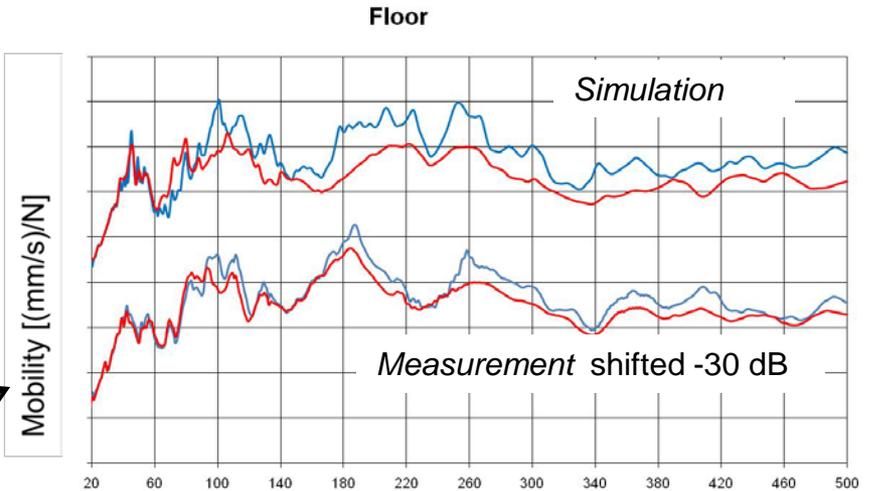
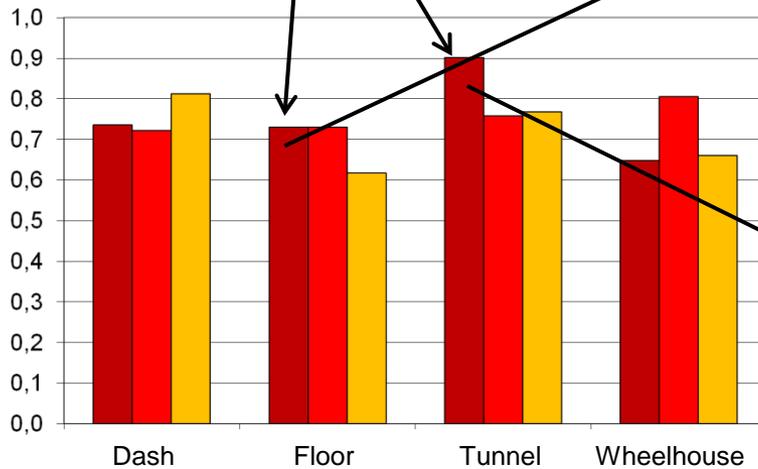
Strukturanregungen



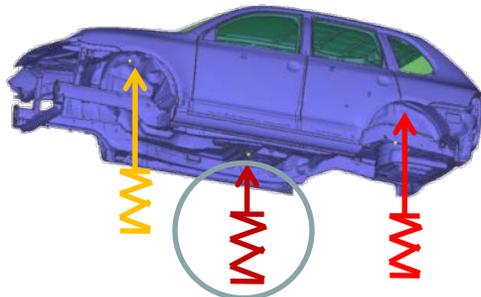
v/F Response in frequency domain [Hz]

— BIW
— TRIM

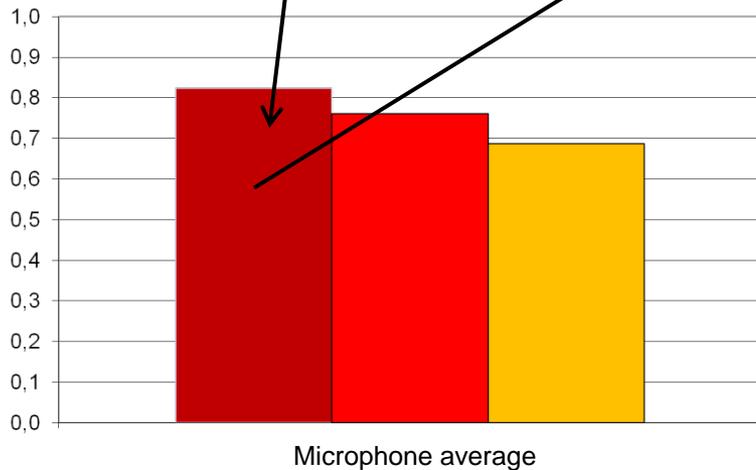
FRAC



Strukturanregungen

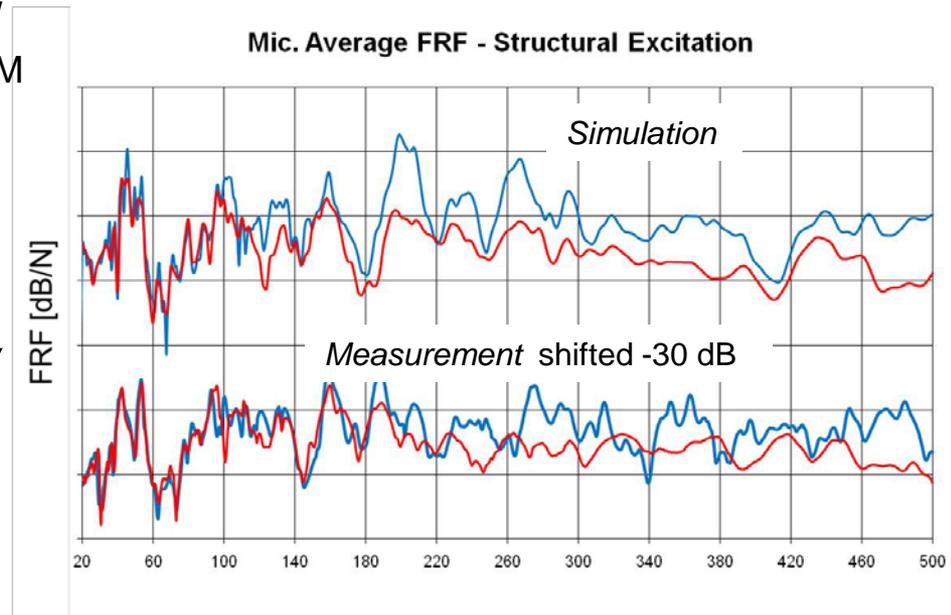


FRAC

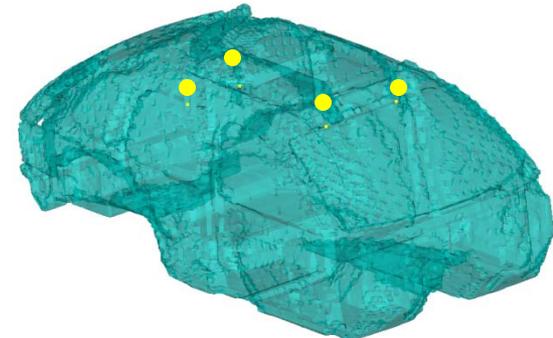


p/F Response in frequency domain [Hz]

— BIW
— TRIM



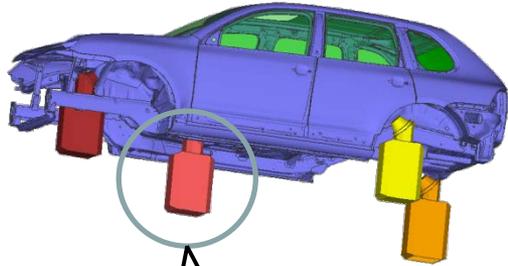
Mikrofone



Vergleich Luftschall TB Messung/Berechnung



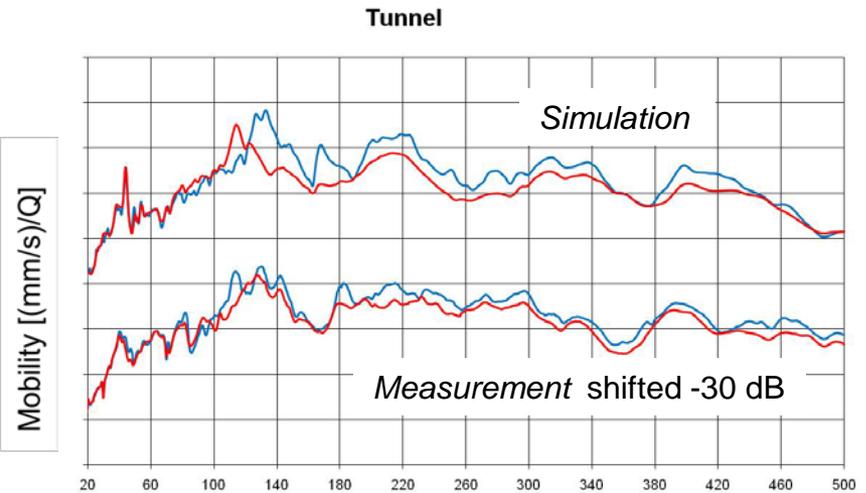
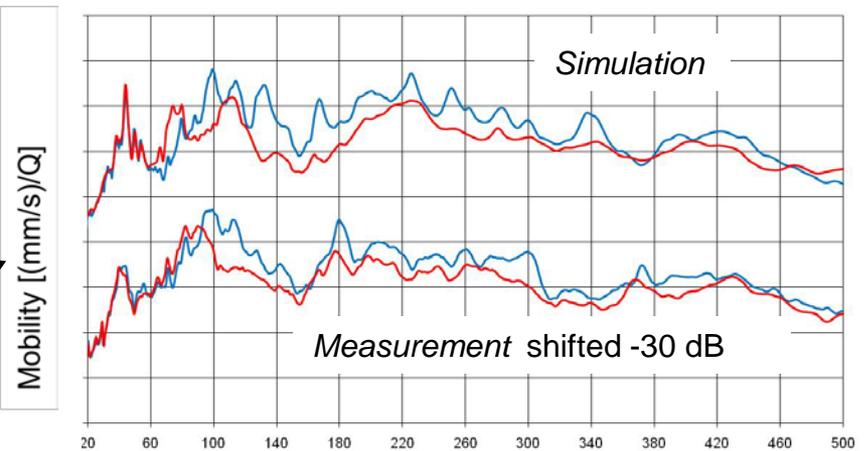
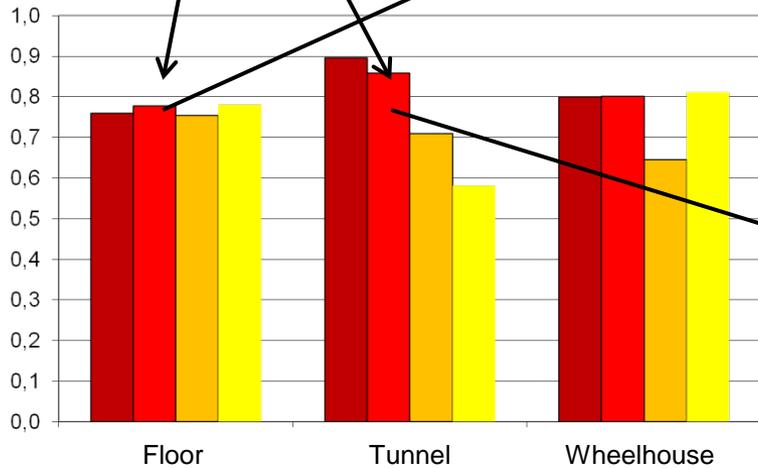
Schallanregungen



FRAC

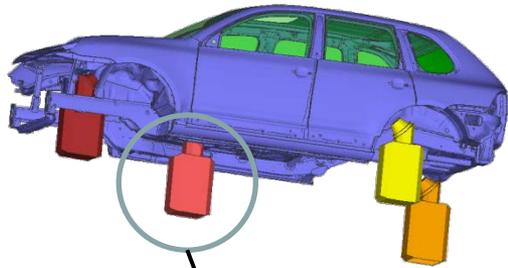
v/Q Response in frequency domain [Hz]

— BIW
— TRIM



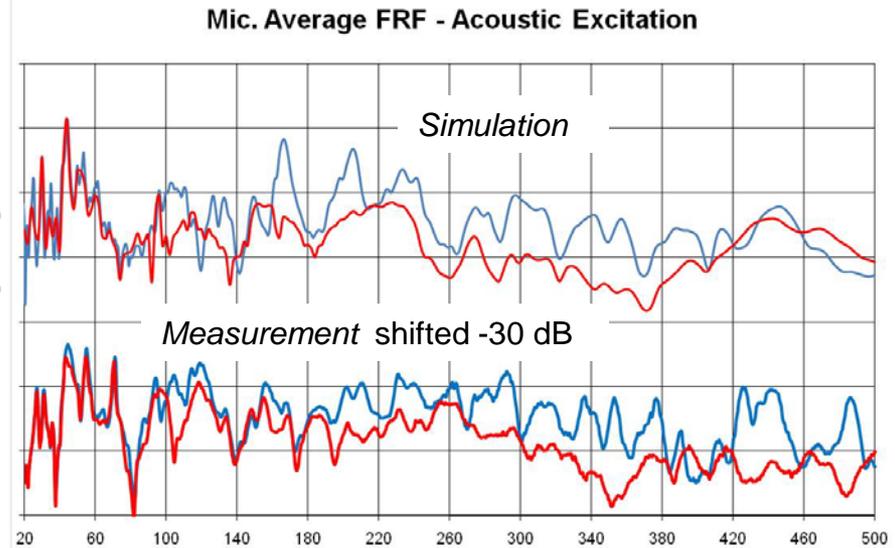
Vergleich Luftschall TB Messung/Berechnung

Schallanregungen

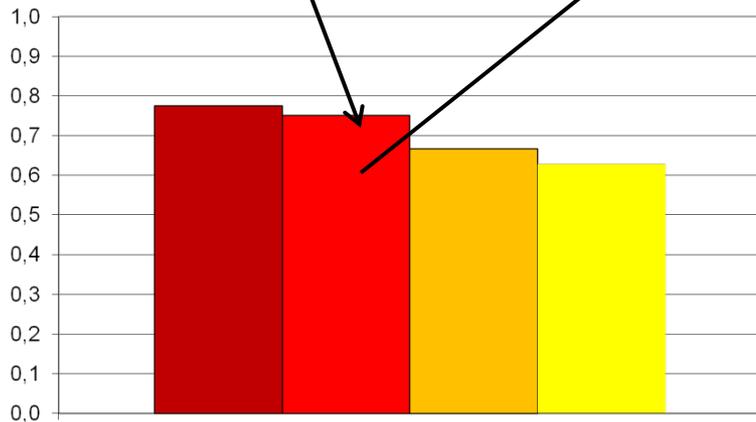


p/Q Response in frequency domain [Hz]

— BIW
— TRIM

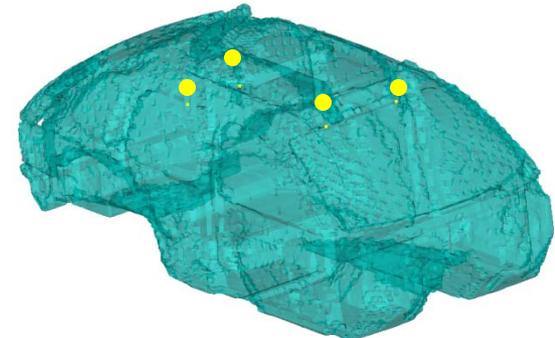


FRAC



Microphone average

Mikrofone



- Akustik als Erweiterung der Strukturdynamik
- durch eine bidirektionale Kopplung von Druck- und Verschiebungsfreiheitsgraden
- für alle Fluide (Gase und Flüssigkeiten)
- Direkte und effiziente Ermittlung der gekoppelten reellen Eigenwerte und Eigenformen
- Dynamische Kondensation auf Verschiebungsfreiheitsgrade („trockene“ Kondensation) z.B. für MKS-Berechnungen
- Modale und direkte Verfahren für die dynamische Antwort im Zeit- und Frequenzbereich
- Innen- und Außenfluid in einem Modell, damit direkte Schalldurchgangsberechnungen