



# Magna Steyr

## Zukünftige Herausforderungen im NVH-Entwicklungsprozess für elektrisch betriebene Fahrzeuge

Dr. Thorsten Bartosch / Klaus Kauermann, 16. ÖAMTC- Symposium, 26.03.2019

## ➤ Zukünftige Herausforderungen im NVH-Entwicklungsprozess für elektrisch betriebene Fahrzeuge

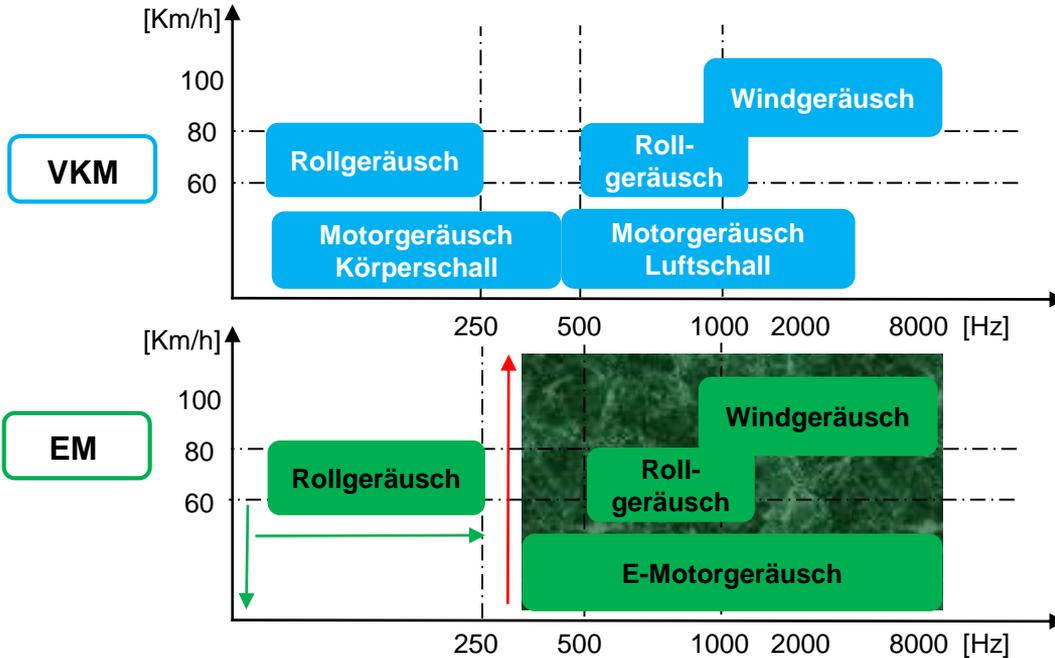
Bei rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen, die derzeit im Fokus sind, fehlen die klassischen Motor/Getriebeanregungsmechanismen, die das Roll- und Windgeräusch orchestrieren und teilweise maskieren. Neue Geräuschkomponenten im Frequenz- und Zeitbereich kommen hinzu. Das Ergebnis ist ein völlig neues Klangerlebnis im Fahrzeug über das Geschwindigkeitsspektrum.

Die neuen Herausforderungen heißen also:

- Reduktion von Roll- und Windgeräusch mit verbesserten virtuellen und hybriden Entwicklungsmethoden.
  - Windgeräusch: Aeroakustik-Simulation und Optimierung mittels aeroakustischen Ton Modellen im Windkanal
  - Rollgeräusch: Anwendung der kraftbasierten Transferpfadanalyse (kbTPA) und der Kraft-Iterations-Methode (KIM)
- Simulation der Anregungsmechanismen der elektrischen Komponenten und einer Motorgeräuschsynthese mittels physikalischer Modellierung.
  - NVH E-Motorsimulation & Motorgeräusch-Synthese,

Das Ziel:

Dem Fahrer soll auch bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ein klares und komfortables akustisches Feedback gegeben werden, das ihm die Kontrolle über das Fahrzeug in optimaler Weise erlaubt und ihm gleichzeitig einen hohen Qualitätseindruck vermittelt.



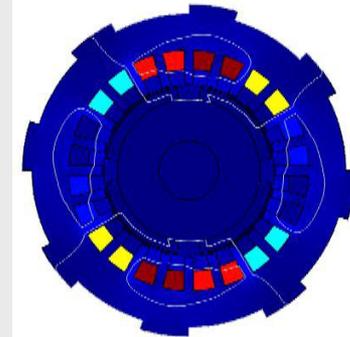
- ↑ Roll/Windgeräuschwahrnehmung steigt aufgrund wegfallender Maskierung durch VKM.
- ↓ Gesamtgeräuschpegel sinkt aufgrund Abwesenheit VKM.

## Wesentliche Herausforderungen des reinen E-Antriebs:

- Höherfrequente Anregungen ( $> 300\text{Hz}$ )
- Risiko von Wind- und Rollgeräusch aufgrund fehlender Maskierung durch VKM

## Generisches PMSM (permanentmagnetisches Synchronmaschinen Modell) zur Berechnung der elektromagnetischen Kräfte:

- Anzahl der Pol-Paare
- Anzahl der Stator/Rotor Nuten
- Geometrie magnetischer Kreis (z.B. Kühlschächte, Luftspalt...)
- Ansteuerung E-Maschine & Sättigungsverhalten

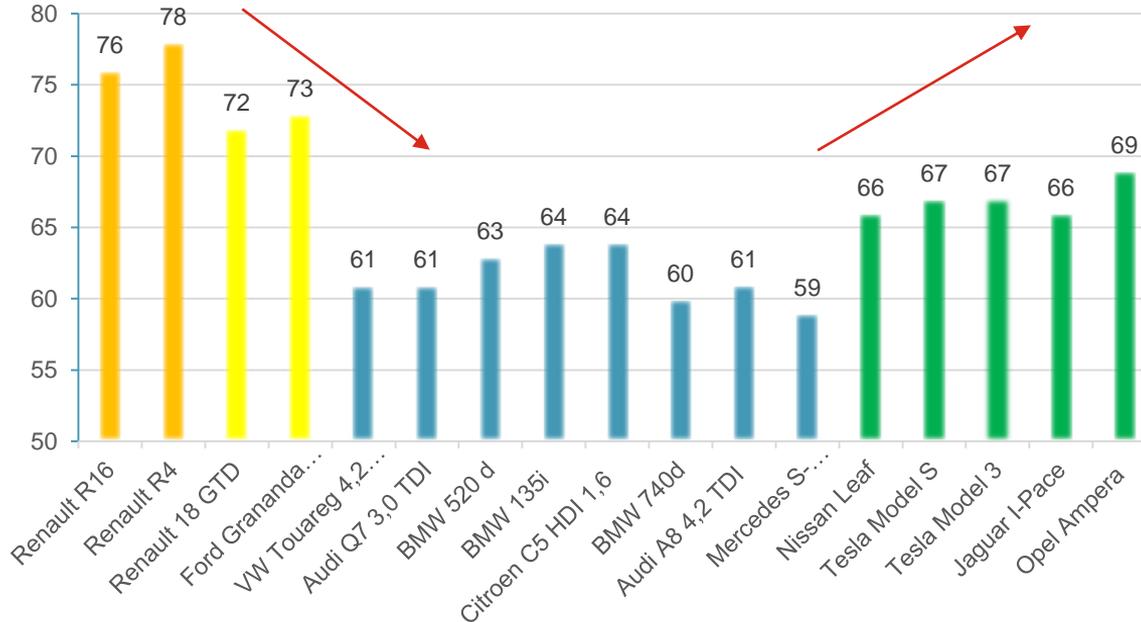


# Entwicklung Wind/Rollgeräusch seid 1975

Fahrzeug-Innengeräusch bei 100km/h in dB(A) // Mikrophon Fahrerohr links

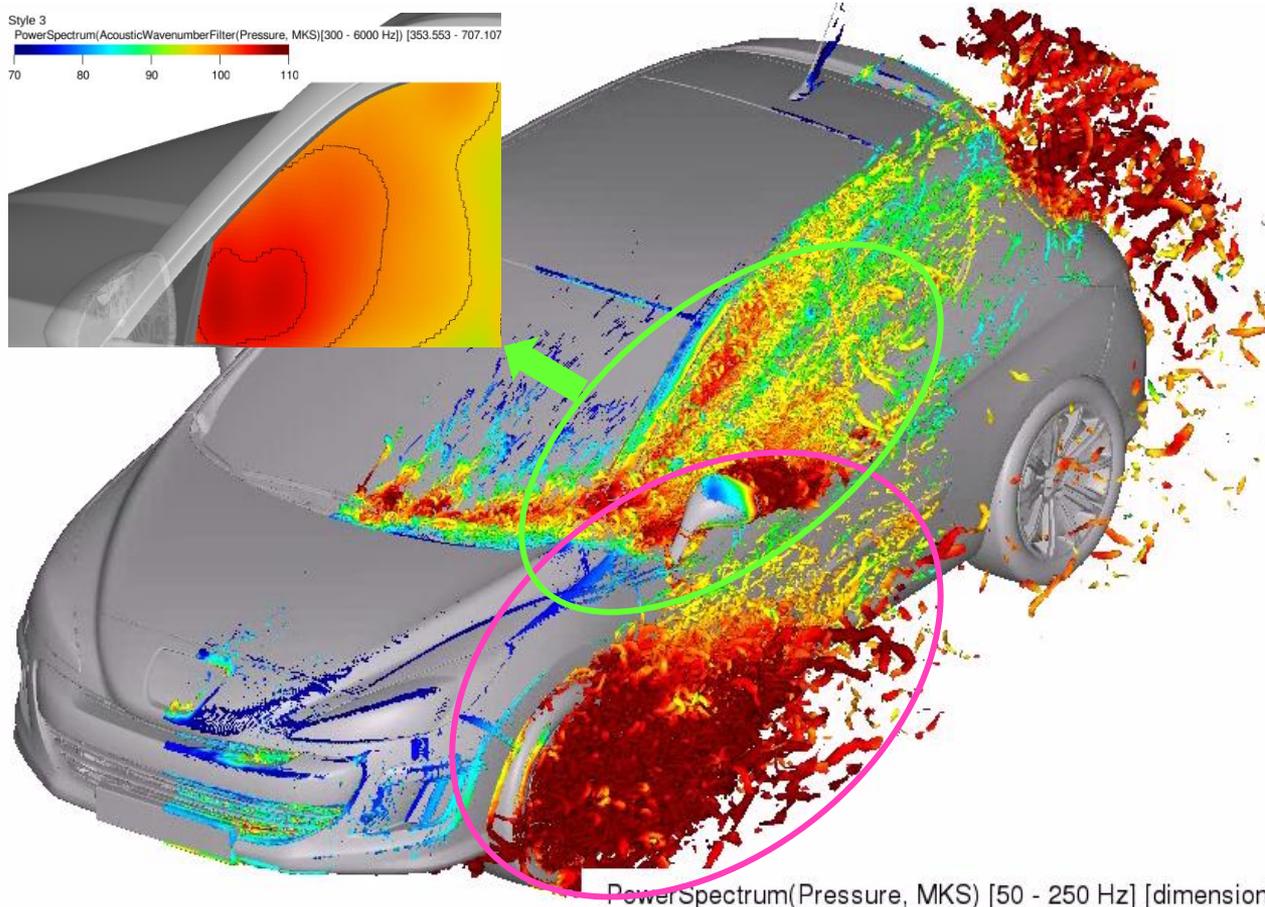
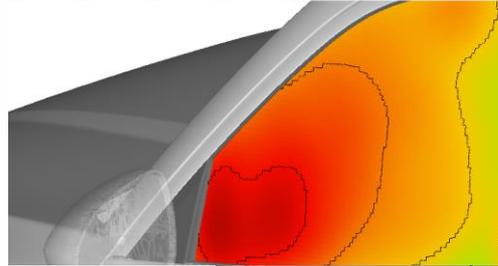
- █ Bj vor 1980
- █ Bj 1980 -1990
- █ Bj nach 2000
- █ E- Fahrzeuge ab 2017

Fazit: E-Fahrzeuge sind lauter als gedacht



vehicle	year of manufacture	noise level Driver's ear left in dB(A)
Renault R16; 55 PS	1975	75
Renault R4; 34 PS	1978	77
Renault 18 GTD	1981	72
Ford Grananda 2,1 D	1981	73
VW Touareg 4,2 TDI	2012	61
Audi Q7 3,0 TDI	2014	61
BMW 520 d	2014	63
Touring		
BMW 135i	2013	64
Cabrio		
Citroen C5 HDI 1,6	2012	64
Exclusive Kombi		
BMW 740d	2012	59
X-Drive		
Audi A8 4,2 TDI	2012	60
quattro		
Mercedes S-Klasse	2018	59
350d		
Nissan Leaf e-drive	2018	66 Rolling noise dominant
Opel Ampera e-drive	2018	69 Rolling noise dominant
Tesla Model S e-drive	2017	67 Rolling noise dominant
Tesla Model 3 e-drive	2018	67 Rolling noise dominant
Jaguar I-Pace e-drive	2018	66 Rolling noise dominant

Style 3  
PowerSpectrum(AcousticWavenumberFilter(Pressure, MKS)[300 - 6000 Hz]) [353.553 - 707.107]



PowerSpectrum(Pressure, MKS) [50 - 250 Hz] [dimensionl

## Strömungsturbulenzen und herausgerechnete Akusik bei 140km/h

- Dominant für das Innengeräusch;**  
Optimierung durch
  - Dicke der Seitenscheibe, Akustikscheibe
  - Geometrie A-Säule, Spiegel, Spiegelfuß
- Dominant für das Außengeräusch;**  
Verstärkt durch die Rollgeräuschmechanismen Reifen-Fahrbahnkontakt.

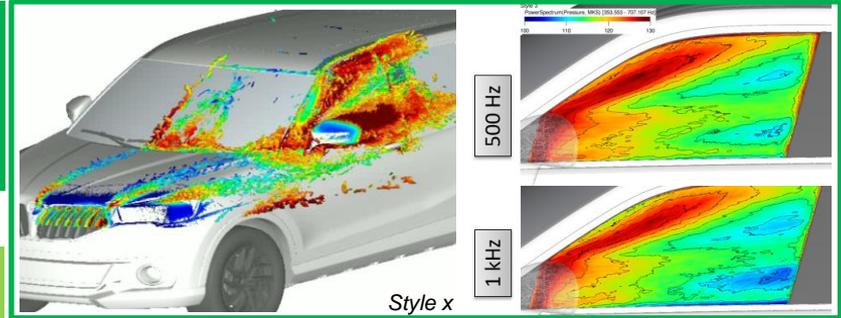
# Aero-akustischer Entwicklungsprozess mit Fokus auf den Einsatz eines adaptierten Ton-Modells (advanced clay model)

- Aeroakustischer Prozess
- Spezifikationen & Aufbau Ton Modell
- Test Equipment
- Quellenidentifikation
- Auswertungen Varianten
- Korrelation Schwinggeschwindigkeit an der Seitenscheibe zum Schallpegel am Fahrerohr
- Relativon  $L_p - L_v - L_{v/p}$
- Optimierungsergebnis am Ton-Modell und Vergleich Messung - Berechnung
- Vergleich zum Benchmark

## 1 CAA Simulation

### CAA Simulation:

Suche nach aero-akustischen Hot Spots. Designoptimierung in früher Entwicklungsphase mit Vorschlägen für Styling-Änderungen.



## 2 Windkanal Messung mit Ton Modell

### Ton-Modell Messung im Windkanal:

Innengeräuschmessung mit Mikrophon auf Fahrerohrposition, Beschleunigungssensoren an der Seitenscheibe innen, Oberflächenmikrofone auf Anfrage

#### Kommentar:

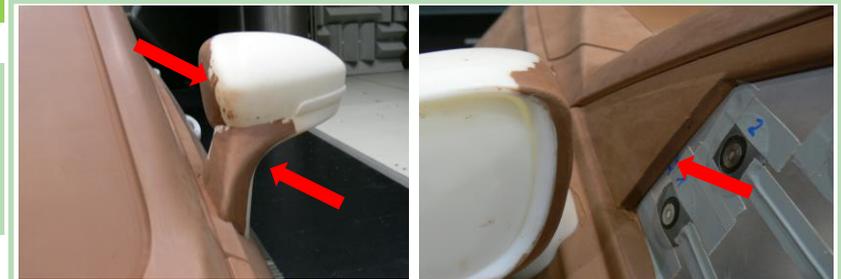
*Oberflächenmikrofon-Messergebnisse haben nur eine untergeordnete Bedeutung hinsichtlich der Korrelation zum SPL am Fahrerohr, verändern aber das Anströmverhalten und damit die Windgeräusch-Anregung signifikant.*



## 3 Optimierungs- potentiale

### Schnelle Varianten-Studien:

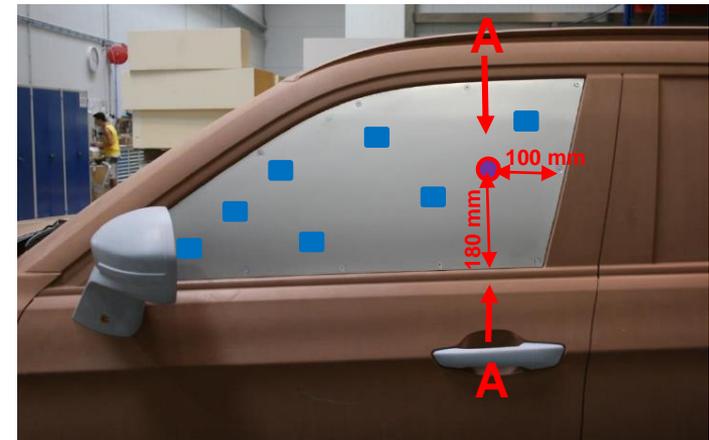
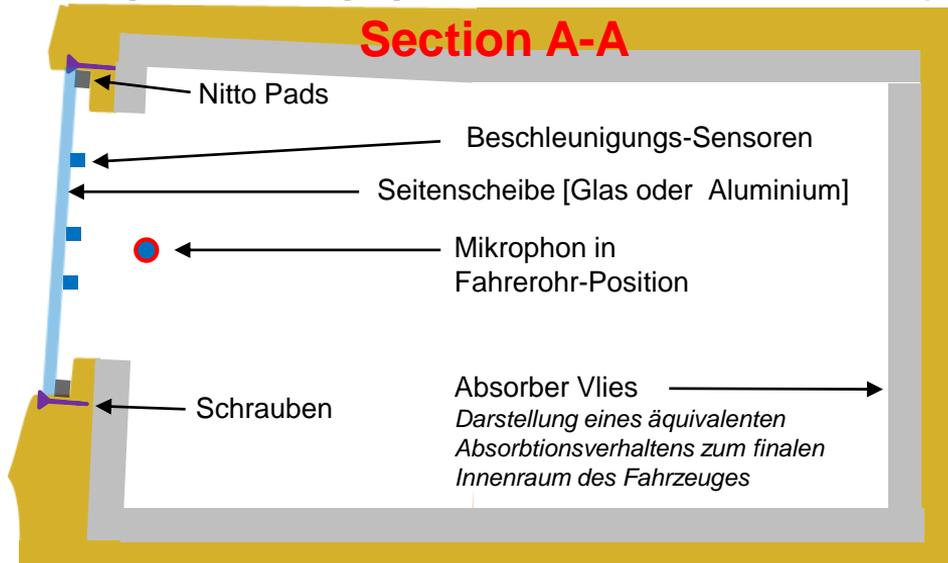
Messkampagne mit vielen Designs in kurzer Zeit möglich.  
[bis zu 60 Designs an einem Mess-Tag im Windkanal]



## Aufbau eines Ton-Modells zur Beurteilung des Einflusses von Styling-Modifikationen auf den Innenschallpegel über die Messung der Scheibenvibrationen

- Erzeugung eines Hohlraums innerhalb des Ton-Modelles so ähnlich wie möglich zum endgültigen Fahrgastraum.
- Einsetzen eines Scheiben-Dummies [Glas-oder Aluminiumplatte (mit ca. gleicher Form & Dicke wie die finale Seitenscheibe)]
- Einschrauben des Scheiben-Dummies auf dem Scheibenrahmen mittels Kitt+Nitto-Pads.
- Aufbringen von 6 gleichmäßig verteilten, leichten monoaxialen Beschleunigungssensoren auf der Seitenscheibe.

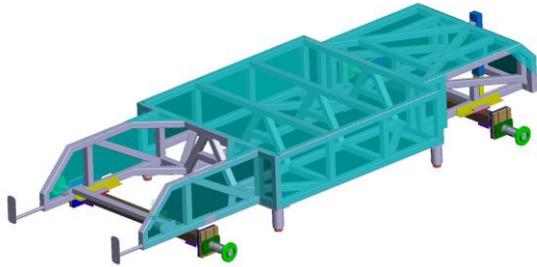
### Platzierung der Beschleunigungs-Sensoren auf der Seitenscheibe & Mikrophon an der Fahrerohr-Position



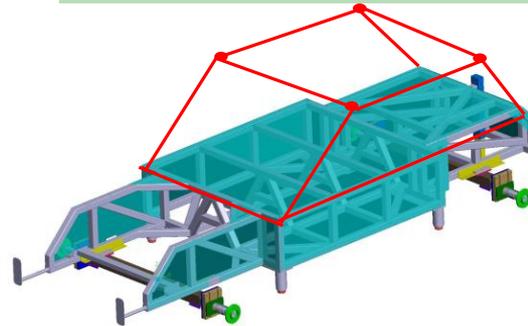
- 1 Fahrerohr-Mikrophon
- 7 Beschleunigungs-Sensoren

# Aufbau-Stufen eines Ton-Modells

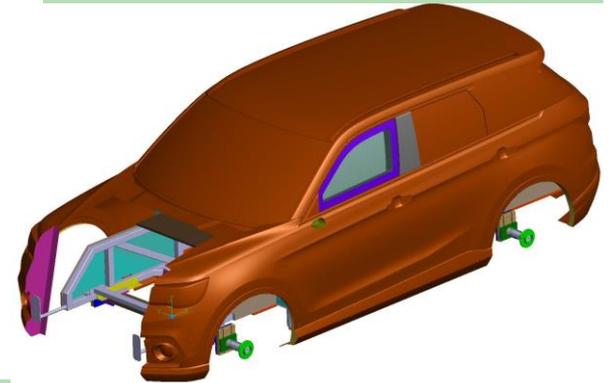
Basis Rahmen-Design



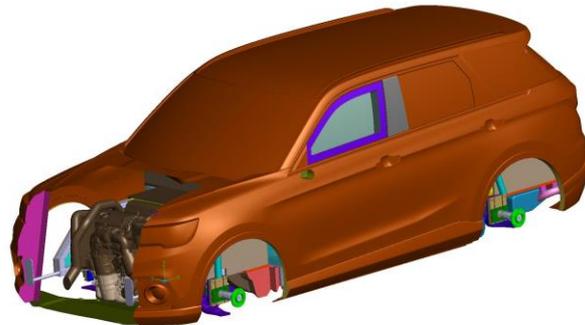
Basis Rahmen + Innenraum-Kontur



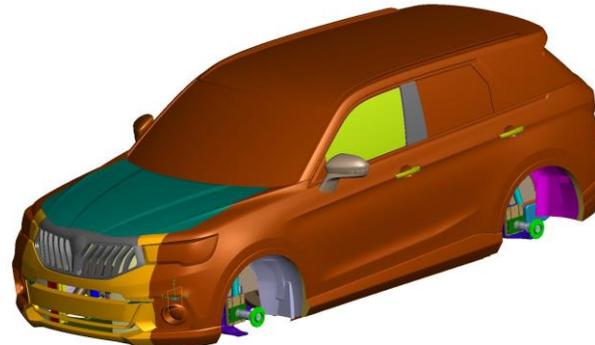
Basis Rahmen + Außendesign



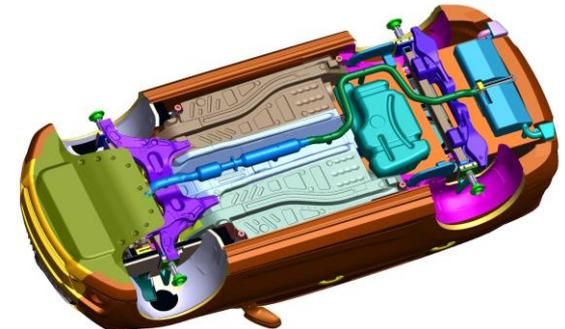
Außendesign + Fahrwerk + Antriebstrang



Außendesign + Frontend mit komp. ausgestattetem + Add-On Parts



Komplette Unterbodenstruktur mit Tank, Fahrwerk und Abgasanlage



# Aufbau-Stufen eines Ton-Modells

Karosserie  
(PU-Schaum – unterfütterung)



Karosserie mit grober Tonauflage



1. Konturfräsung (grob)



2. Konturfräsung (fein)



Glättung & Finishing



Motorraum + Motor-Dummy



# Aufbau-Stufen eines Ton-Modells

Unterboden + Abgasanlage



Kühl-Paket



Frontschürze + Frontgrill



Radhaus + Fahrwerks-Dummy



Aufbau Aluminium-Seitenscheibe



Alu-Seitenscheibe + Seitenspiegel



# Aufbau-Stufen eines Ton-Modells



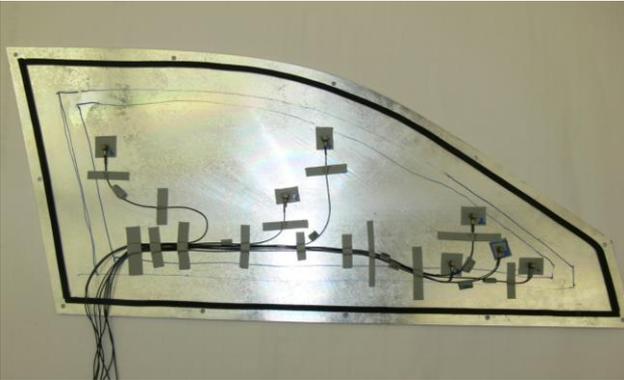
Fertiges Ton-Modell mit Scheibenwischern und Motorhaube



Photometrische Messung



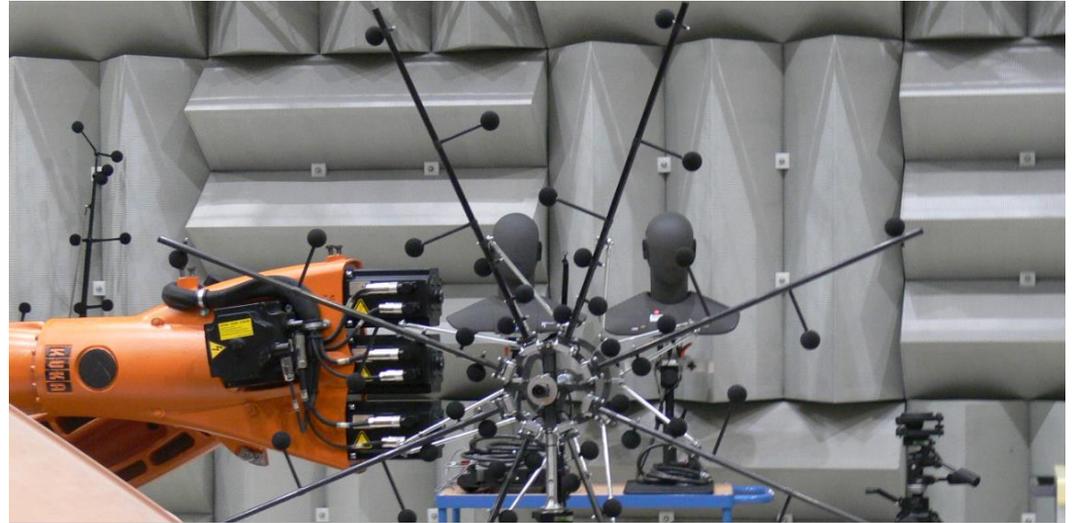
**Alu-Seitenscheibe  
mit Beschleunigungs-Sensoren innen**



**Clay model with surface microphones**



**Mikrofon-Array  
und Beamforming Technologie**

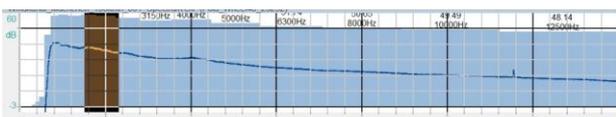


**Meßprinzip:**

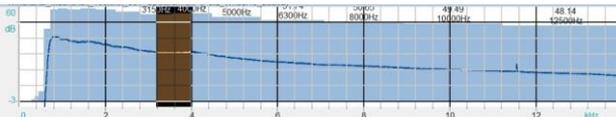
- Mikrofonarray fokussiert auf relevante Objektpunkte mittels Zeitverschiebung aufgrund Laufzeitunterschieden der erfassten Signale .
- Die zeitkorrigierten Signale aller Mikrofone werden summiert (verstärkt) und dem relevanten Objektpunkt zugeordnet
- Der Schall von Quellen an anderen Positionen wird dabei gedämpft (keine Zeitkorrektur)
- Je größer das Array, je niedriger die Grenzfrequenz
- Digitale Filter optimieren das Ergebnis

## Beamforming Ergebnisse in verschiedenen Frequenzbereichen

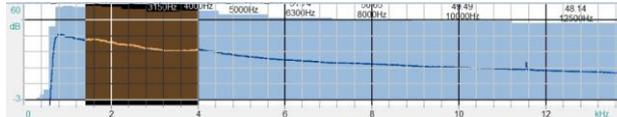
### Ton Modell im Windtunnel



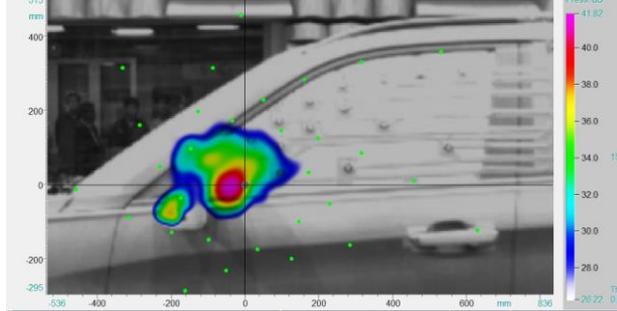
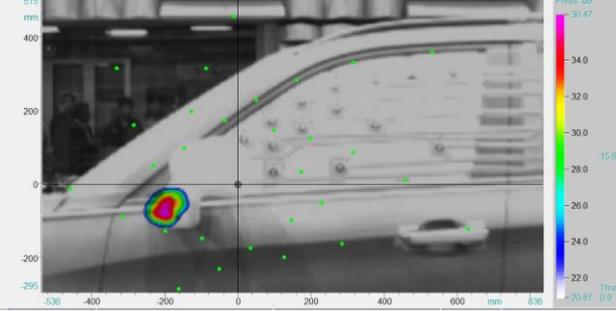
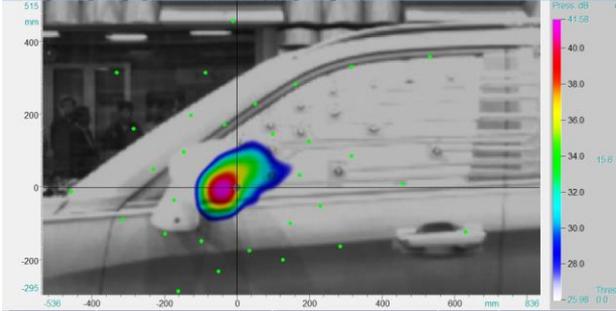
Group: ArrayMic; Samplingrate: 96.0 kHz; Time domain (16.000 s) from 0.000 to 16.000 s; Mask: all channels from 1.503 to 2.306 kHz; Eff.: 23.003 mPa (61.2 dB); Max: Windkanal\_Muenchen\_100km\_001\_SpectralProzD0-1400-4000.asp (F0d\_Wheel48\_23232)



Group: ArrayMic; Samplingrate: 96.0 kHz; Time domain (16.000 s) from 0.000 to 16.000 s; Mask: all channels from 3.173 to 3.976 kHz; Eff.: 11.834 mPa (55.4 dB); Max: Windkanal\_Muenchen\_100km\_001\_SpectralProzD0-1400-4000.asp (F0d\_Wheel48\_23232)



Group: ArrayMic; Samplingrate: 96.0 kHz; Time domain (16.000 s) from 0.000 to 16.000 s; Mask: all channels from 1.400 to 3.999 kHz; Eff.: 31.811 mPa (64.0 dB); Max: Windkanal\_Muenchen\_100km\_001\_SpectralProzD0-1400-4000.asp (F0d\_Wheel48\_23232)



## scharfe Ecken/Kanten vs geglättete



## Unterschiedliche Design-Gestaltung des Seitenspiegels und Spiegelfußes



## Test mit/ohne Unterboden Strömungsblocker

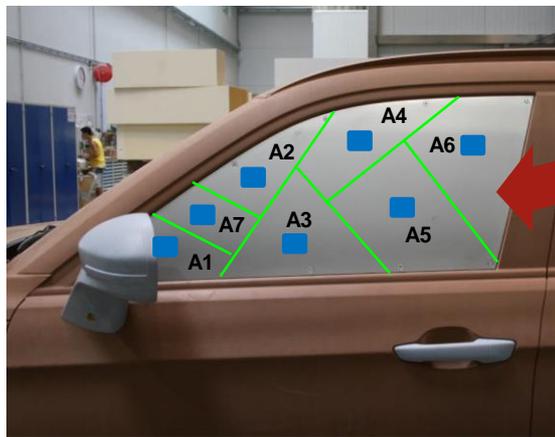
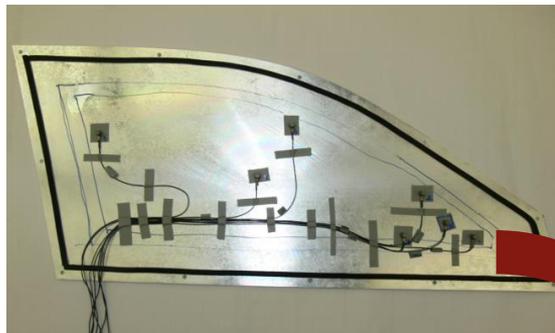


## Einfluß vorderes Radhaus



## Einfluss Oberflächen-Mikrophone





$A_i$  -- weighted areas  
■ -- accelerometers

### Prognose Schallpegel Fahrerohr über Kenntnis Schwinggeschwindigkeitspegels Seitenscheibe

- 1) Berechnung des flächengewichteten Gesamtgeschwindigkeitspegels  $L_{V[dB]}$  für jede 1/3 Octave mit Kenntnis der gemessenen  $V_i[m/s]$  and  $A_i [m^2]$  unter Verwendung von:

$$L_{V1/3Oct} = 10 * \log \sum_{i=1}^x [(v_i^2/v_0^2) * A_i]$$

- 2) Berechnung von  $L_V [dB]$  mit Kenntnis von  $L_{V/P}$  aus den Benchmarkmessungen oder SEA-Simulation unter Verwendung von:

$$L_V = 10 * \log \sum 10^{0,1 L_{V1/3Oct}}$$

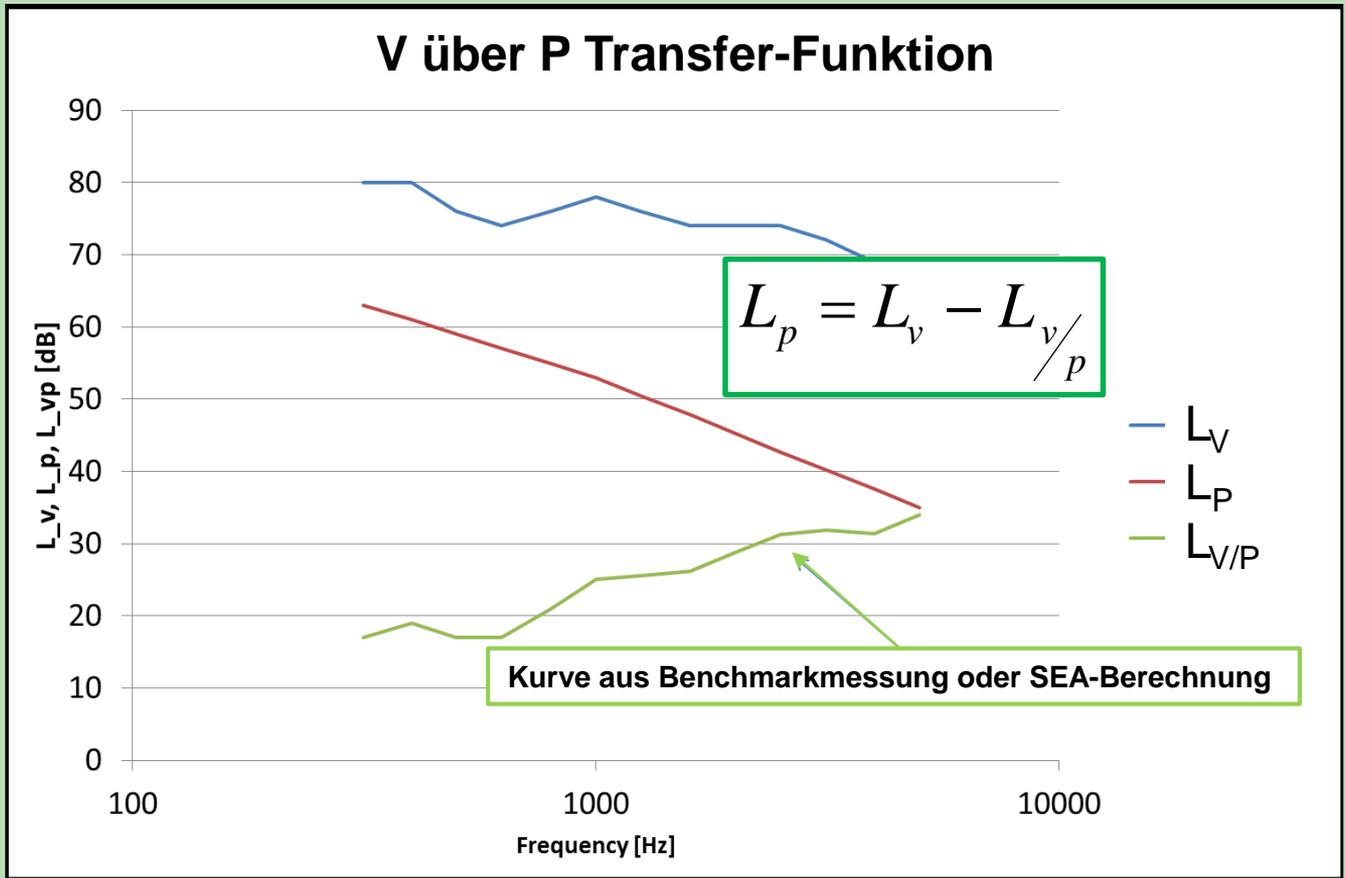
- 3) Prognose Innengeräusch durch Berechnung von  $L_P [dB(A)]$  unter Verwendung von:

$$L_P = L_V - L_{V/P} - L_{(A\text{-Filter})}$$

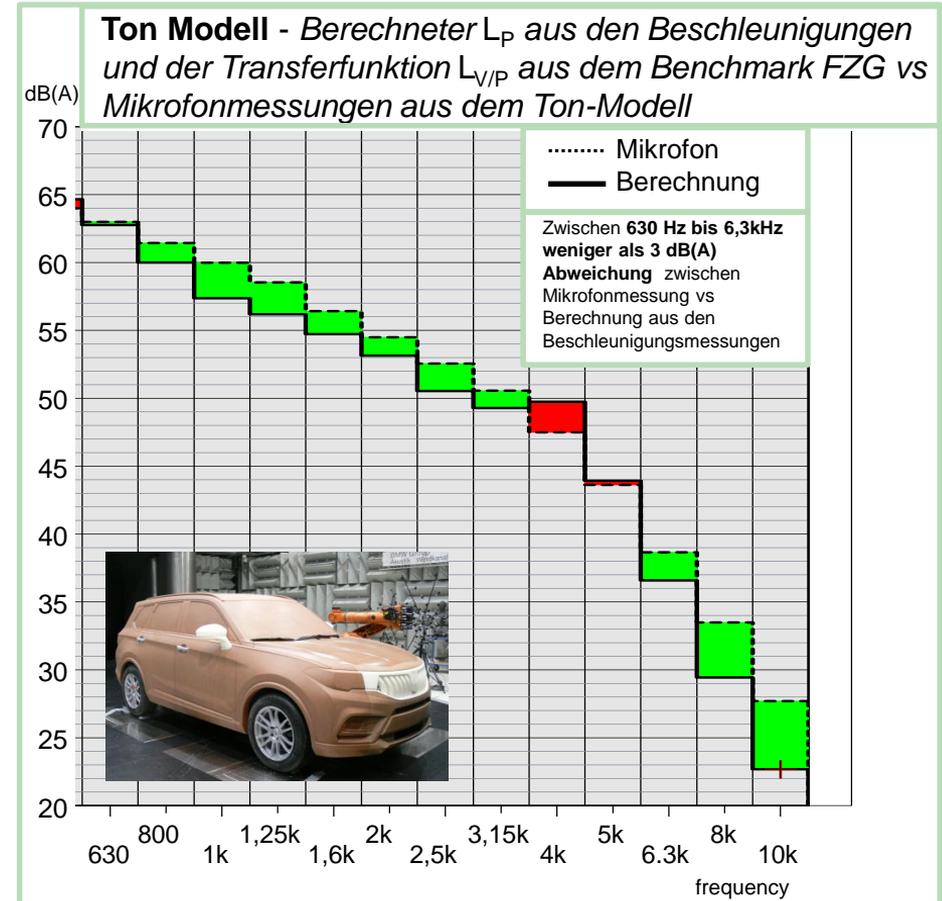
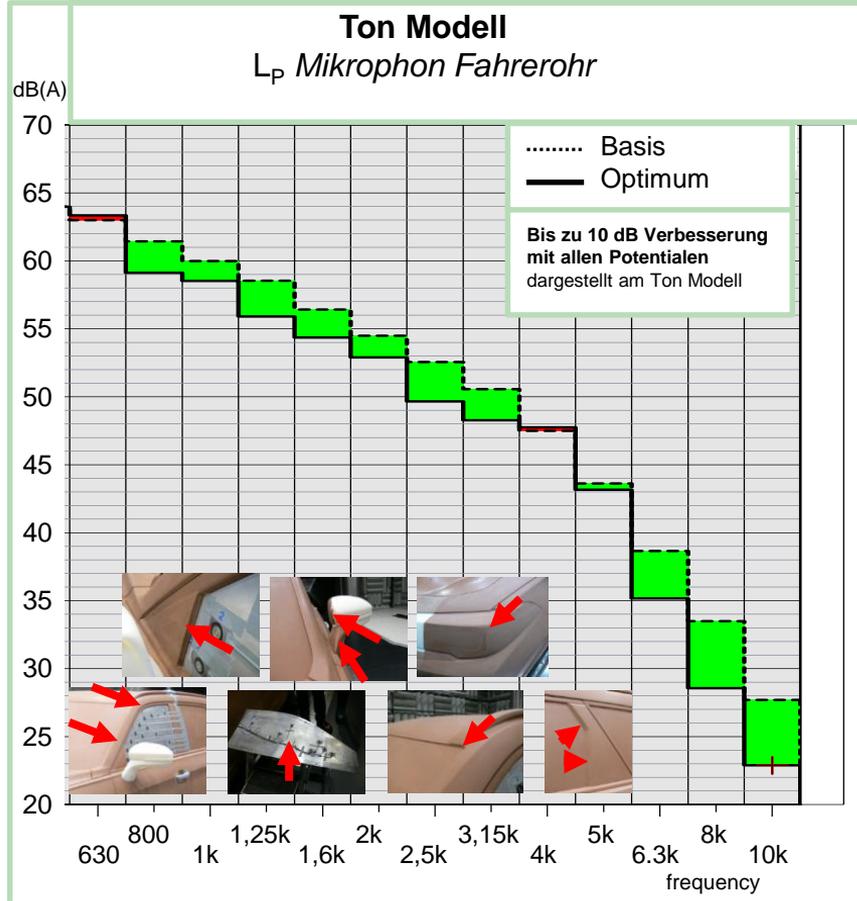
#### Anmerkungen:

- Für die Bestimmung der Transferfunktion  $L_{V/P}$  aus Messungen im Benchmarkfahrzeug sollten folgende Eigenschaften zwischen Benchmark und Entwicklungsfahrzeug ähnlich sein:
- akustische Impedanz; Oberfläche und durchschnittliche Absorption des Fahrgastraumes; finaler Leakage-Zustand; Fensterscheibendicke.
- Anstatt Benchmark-Messungen kann auch eine SEA-Berechnung verwendet werden.
- $V_i$  ist die Integration aus der Beschleunigungsmessung  $a_i$ .
- Die Ergebnisse sind valide oberhalb 600Hz

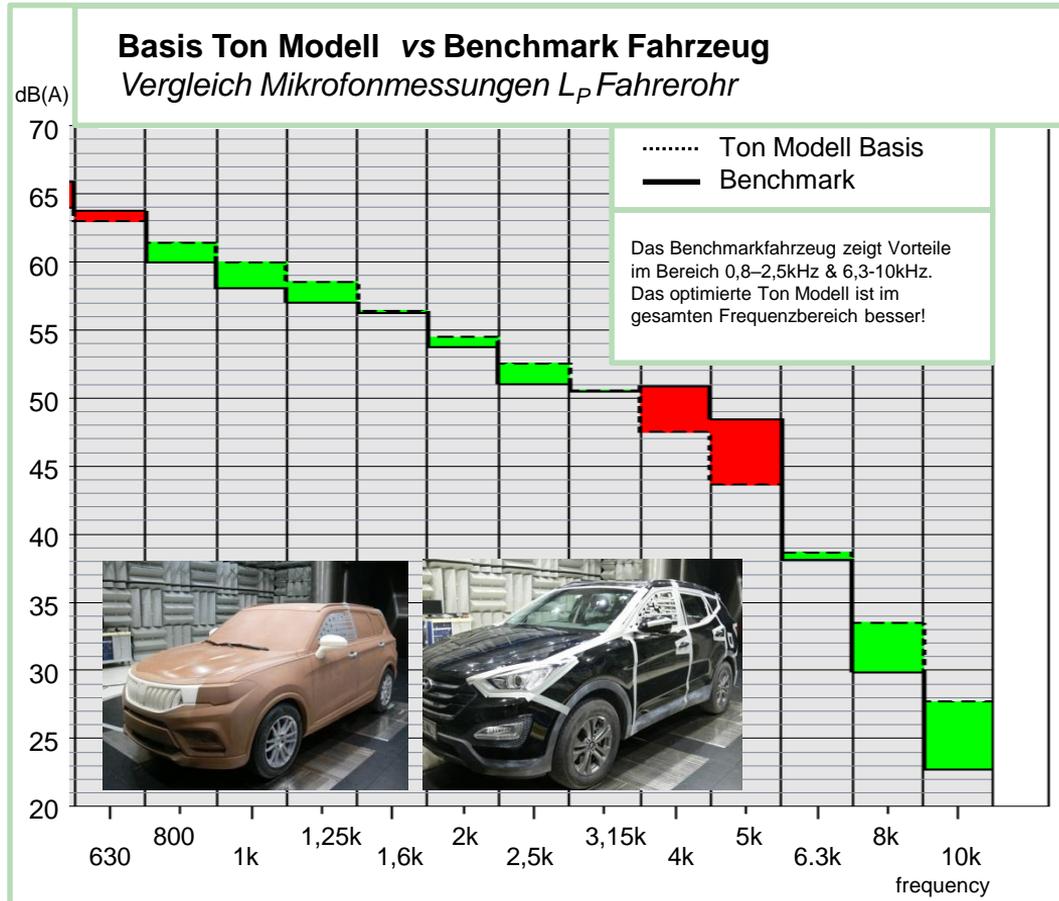
# Zusammenhang von $L_P$ - $L_V$ - $L_{V/P}$ (Beispiel)



# Optimierungs-Ergebnisse am Ton Modell & Vergleich Messung vs Berechnung



# Vergleich Ton-Modell vs Benchmarkfahrzeug



# Rollgeräusch Optimierung

- Rollgeräuschoptimierung - Herangehensweise
- Rollgeräuschoptimierung mittels kraftbasierender TPA ( $k_b\text{TPA}$ ) & Kraft-Iterationsmethode (KIM)
- RollgeräuschTPA: Ablaufbeschreibung
- Kraftmessrad; Shakeranregung; Beschleunigungsmesspunkte
- Kraftmessrad & Shakeranregung
- Vergleich der gemessenen und iterierten Kräfte
- Gemessene Kräfte Radträger hinten rechts
- Innengeräuschergebnisse

## Erwartetes Ergebnis:

- Bestimmung der Haupteinflüsse im Übertragungspfad vom Reifen zum Fahrerohr bezüglich Rollgeräusch

## Die Herangehensweise:

- Bestimmung der vibro-akustischen Komfortmaße (insbesondere Schalldruck Innenraum) mittels der kraftbasierten Transferpfadanalyse ( kbTPA) in Kombination mit der Kraft-Iterationsmethode (KIM)
- Simulation der Transferpfade bis zum Fahrerohr mittels MKS und FEM
- Validierung mittels direkt (Modalhammer)und reziprok (Innenschallquelle) gemessnen FRF´s
- Optimierung der Transferpfade simulatorisch und Überprüfung des Ergebnisses auf dem Prüfstand mittels Shakeranregung (aus der KIM) und auf der Straße

KIM mit 3 Shakern



Kraftmess-Rad



Volumenschallquelle LMS



Magna Teststrecke



Modalhammer



Anregekräfte

# Rollgeräuschoptimierung mittels kraftbasierender TPA (kbTPA) & Kraft-Iterationsmethode (KIM)

## Vorbereitung & Messung



Teststrecke und Manöver-Wahl



Messung Körper- und Luftschall im Fahrzeug



Messung Radträgerkräfte



Messung direkte FRF's



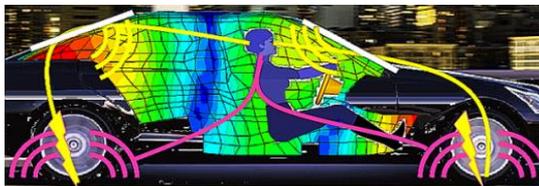
Messung reziproke FRF's



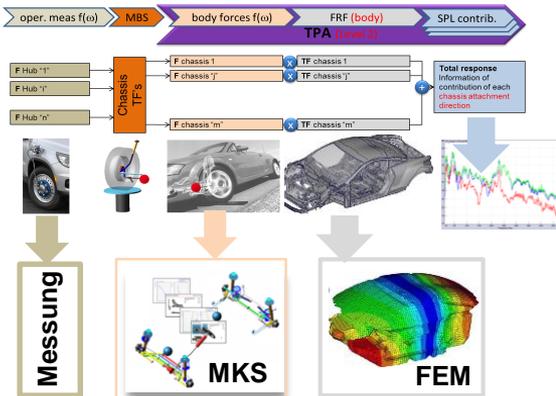
## Prozess / Transferfunktion

Geräusch Transferfunktion

- Reziproke Anregung mit Volumenschallquelle
- Direkte Anregung mit Modalhammer

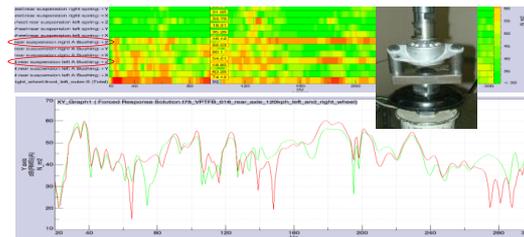


Hybride Bestimmung der Transferfunktionen alle relevanten Geräuschpfade

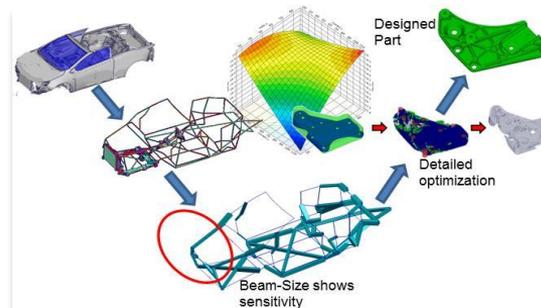


## Ergebnis & Optimierung

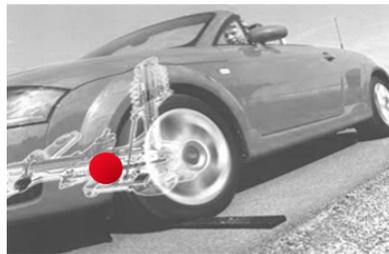
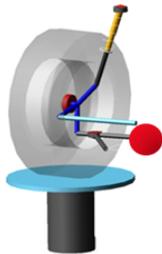
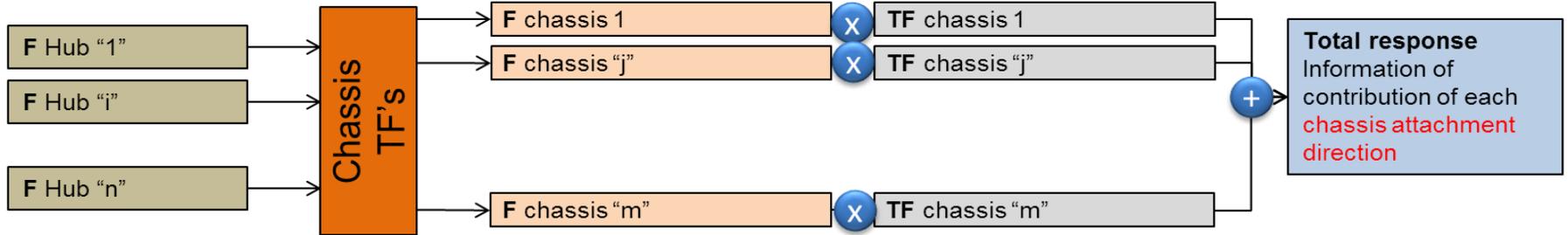
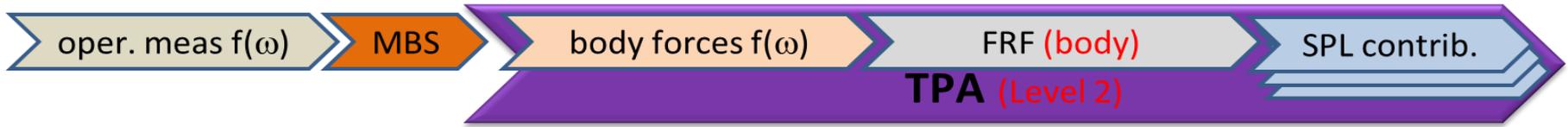
Bestimmung der Pfade mit dem hauptsächlichsten Beitrag zum Rollgeräusch



Optimierung der Struktur in den ermittelten Beitragspfaden mittels FEM-Simulation



## Hybride Bestimmung der Transferfunktionen aller relevanten Geräuschpfade

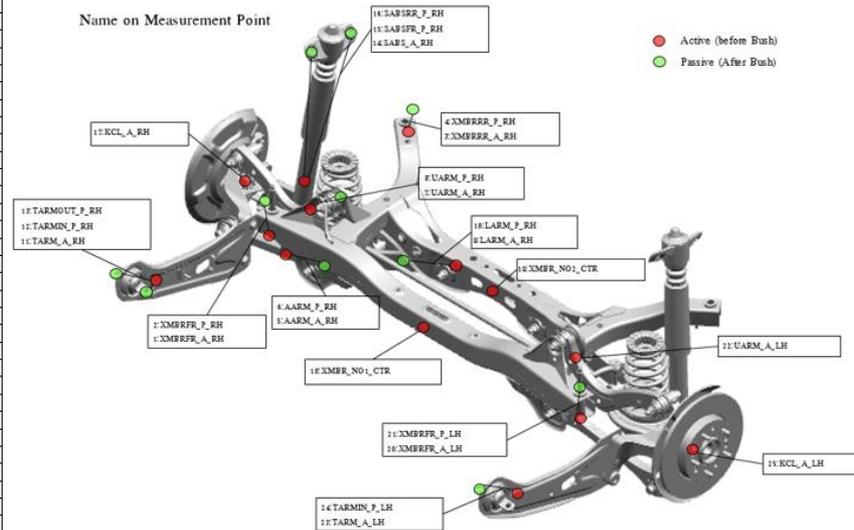


**Step 1: from measurement**  
**Step 2: from validated simulation model**

## Messpunkte:

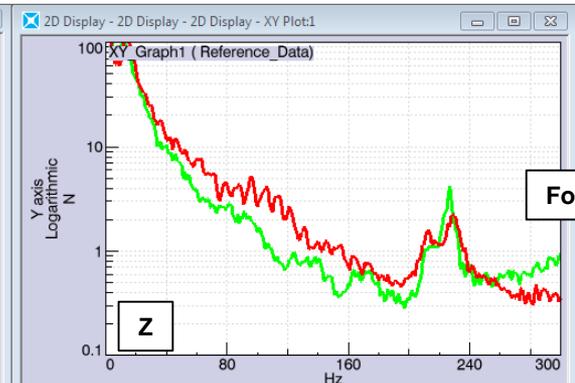
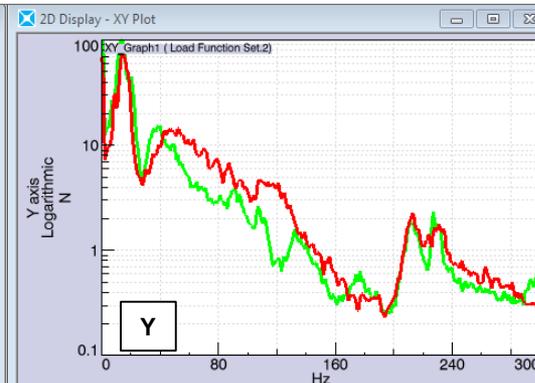
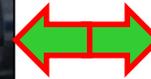
- 25 Beschleunigungs-Sensoren an der Hinterachse
- 3 Shaker in 3 Raumrichtungen (X/Y/Z) mit entsprechenden Kraftsensoren
- 1 Kraftmessrad
- Reference Spektrum Rauhasphalt 60kph

point ID	user channel ID
Shaker X	SH_1
Shaker Y	SH_2
Shaker Z	SH_3
Microphone Rear middle (Passenger)	M I: RMP_middle
Crossmember front right-hand-side active	XMBR:FR_A_RH
Crossmember front right-hand-side passive	XMBR:FR_P_RH
Crossmember rear right-hand-side active	XMBR:RR_A_RH
Crossmember rear right-hand-side passive	XMBR:RR_P_RH
Assist Arm right-hand-side active	AARM:A_RH
Assist Arm right-hand-side passive	AARM:P_RH
Upper Arm right-hand-side active	UARM:A_RH
Upper Arm right-hand-side passive	UARM:P_RH
Lower Arm right-hand-side active	LARM:A_RH
Lower Arm right-hand-side passive	LARM:P_RH
Trailing Arm right-hand-side active	TARM:A_RH
Trailing Arm inside right-hand-side passive	TARM:IN_P_RH
Trailing Arm outside right-hand-side passive	TARM:OUT_P_RH
Shock Absorber right-hand-side active	SABS:A_RH
Shock Absorber front right-hand-side passive	SABS:FR_P_RH
Shock Absorber rear right-hand-side passive	SABS:RR_P_RH
Knuckle (rear achsel) right-hand-side	KNL:A_RH
Knuckle (rear achsel) left-hand-side	KNL:A_LH
Crossmember center beam of NO.1 (front)	XMBR:NO1_CTR
Crossmember center beam of NO.2 (front)	XMBR:NO2_CTR
Crossmember front left-hand-side active	XMBR:FR_A_LH
Crossmember front left-hand-side passive	XMBR:FR_P_LH
Upper Arm left-hand-side active	UARM:A_LH
Trailing Arm left-hand-side active	TARM:A_LH
Trailing Arm inside left-hand-side passive	TARM:IN_P_LH
Shaker X	SH_1_acc

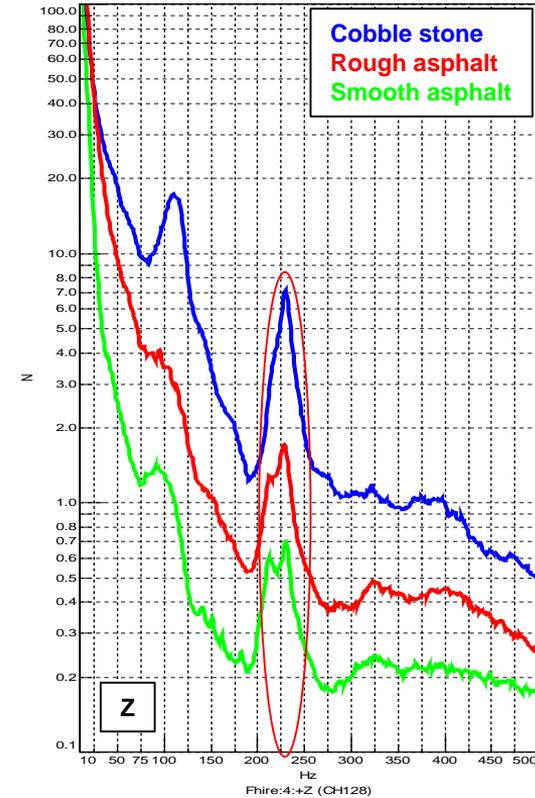
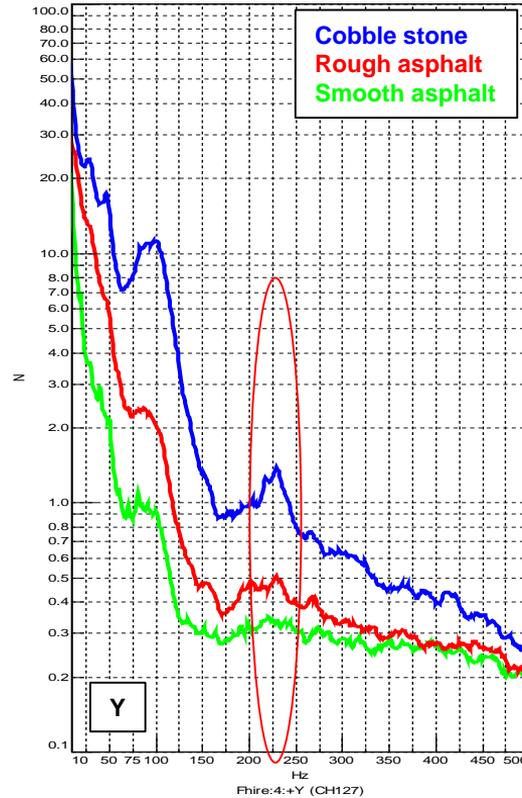
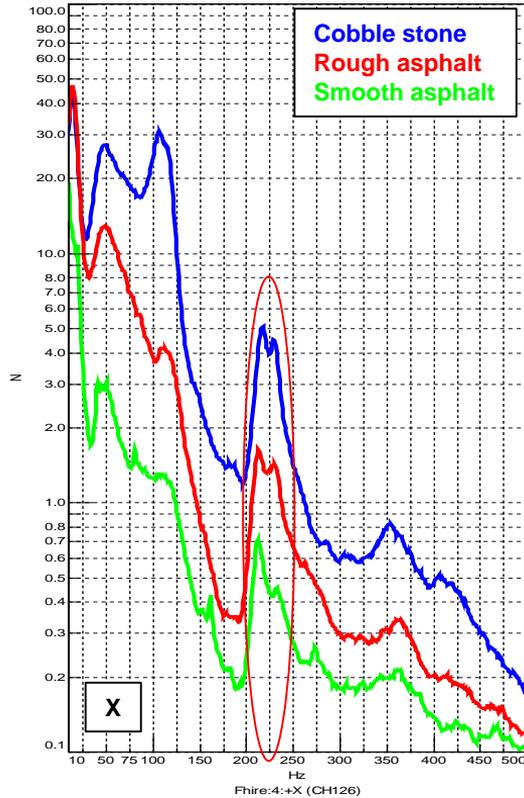


# Vergleich der gemessenen und iterierten Kräfte

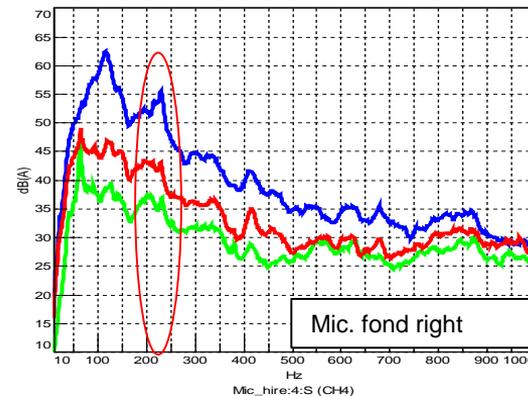
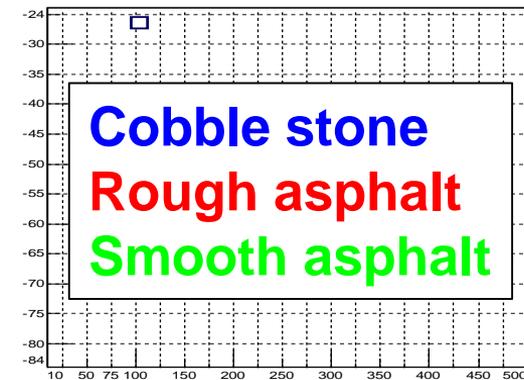
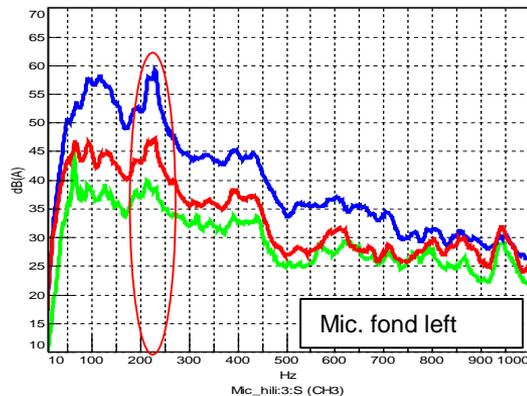
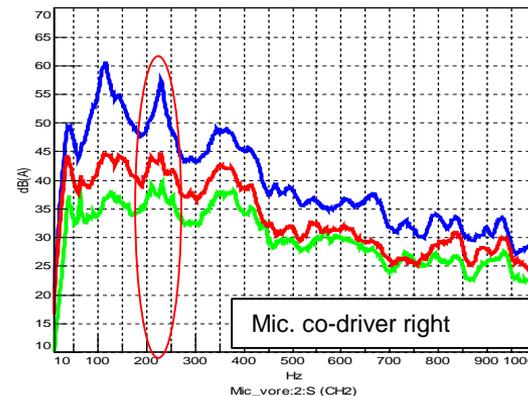
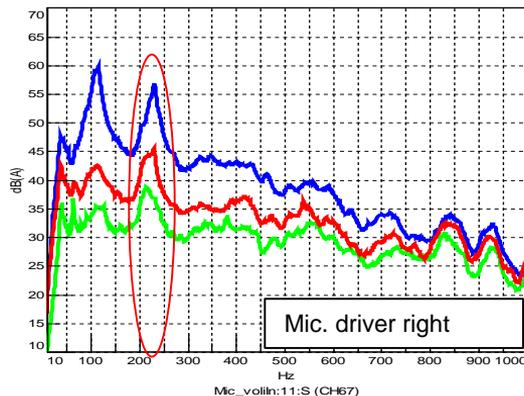
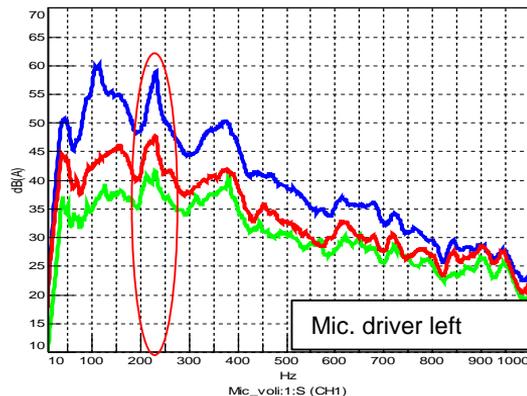
- Kraftspektrum X/Y/Z
- Rauhasphalt 60kph
- ❖ iterierte Kraft —
- ❖ gemessene Kraft —



## Vergleich Glattasphalt, Rauhasphalt, Kopfsteinpflaster



## Vergleich Glattasphalt, Rauhasphalt, Kopfsteinpflaster



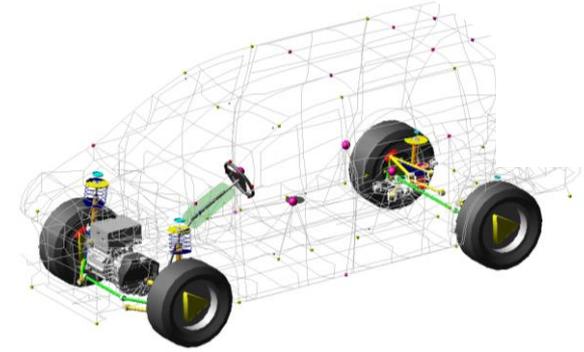
# NVH Simulation eines elektrischen Antriebs und Sound-Designs mittels Active Noise

- **NVH E-Motor Simulation**
  - NVH Simulation zur E-motor Fahrzeugintegration
  - Quasi-stationäre Simulation der elektromagnetischen Kräfte
  - Kopplung der Statorkräfte
  - FDOM: Analyse bei Problemfrequenzen
- **Motorgeräusch Synthese - Physikalische Modellierung**
  - Motorensoundgenerator mittels physikalischem VKM Modell
  - Sound Design Prozess
  - **Soundbeispiel**

## Fahrkomfort (< 30Hz)

MBS Modell für Antriebsstrang und Fahrwerk und Karosserie als „flex-body“ Modell

- Fahrbahnerregter Schwingungen (z.B. DT Koppelmoden und Rotationmoden, Abstimmung mit „modaler Landschaft“)
- Jerking (Schwingungen der Regelstrecke)

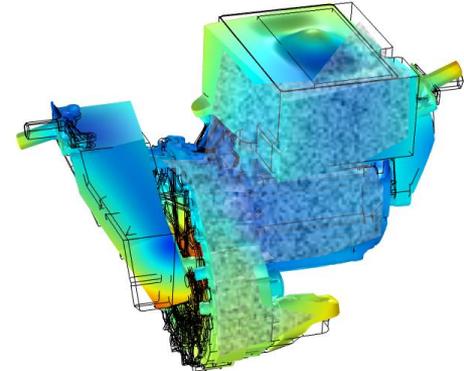


Eigenfrequency=744.38+0.031847i Hz Surface: Total displacement (m)

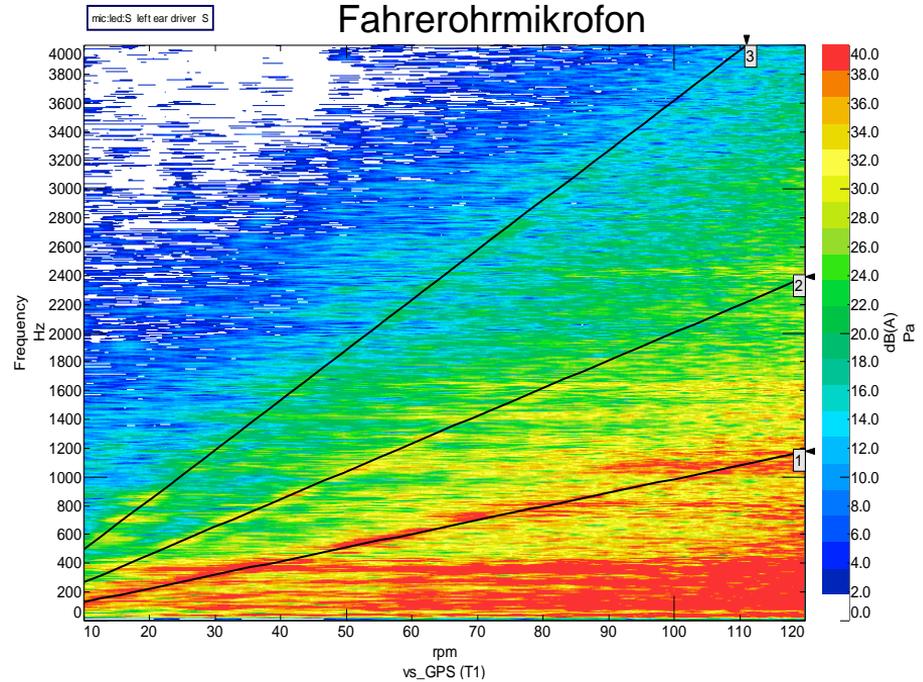
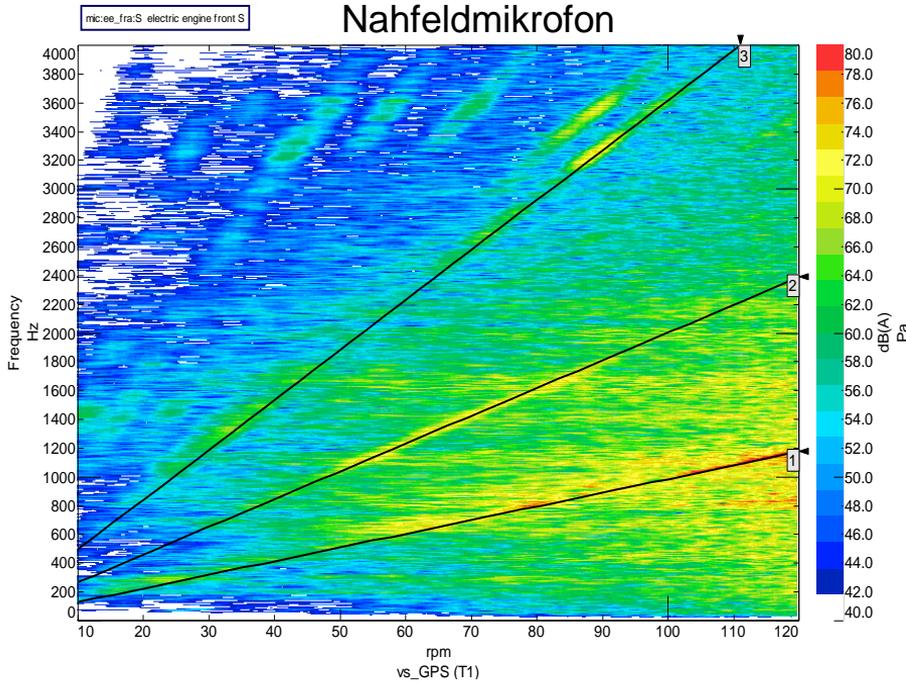
## Heulgeräusche (>300Hz)

Multiphysics FE-Modell des Motorantriebsstrangs

- Akustischer Pfad: Abstrahlung durch Gehäuse und Bracket → Durchschallung der Karosserie
- Strukturpfad: Körperschalleintrag in Karosserie an Lagerstellen → resonante Abstrahlung an Fahrerkabine

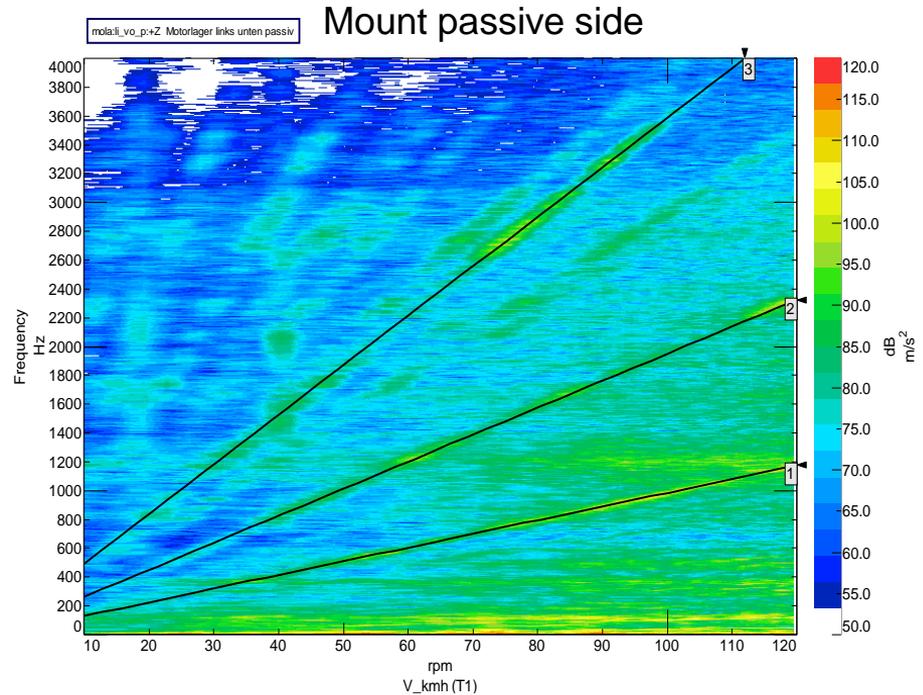
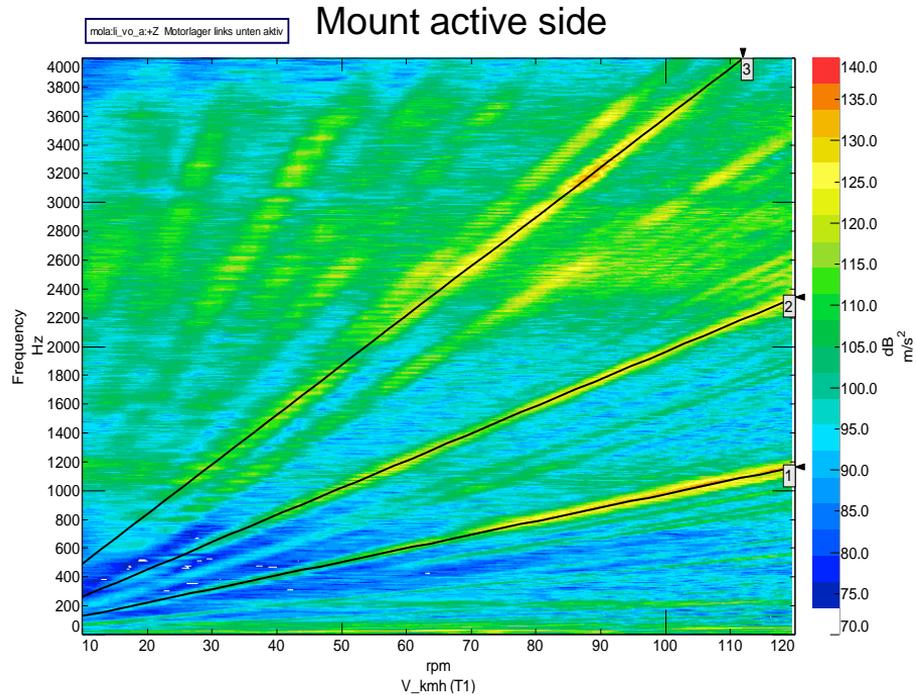


# E-motor Heulgeräusche: WOT Benchmark



- Nahfeldmikrofon zeigt 3 kritische Ordnungen
- Fahrerohr SPL zeigt insbesondere 1-te kritische Ordnung, aber höher tonale Ordnungen sind auch ~20dB unterhalb des Hintergrundpegels hörbar. Gemessene Isolation im Bereich ~40dB

**Durchschallungspfad kann für tiefe Frequenzen nicht ausgeschlossen werden (z.B. TL Stirnwand 20-40dB)**



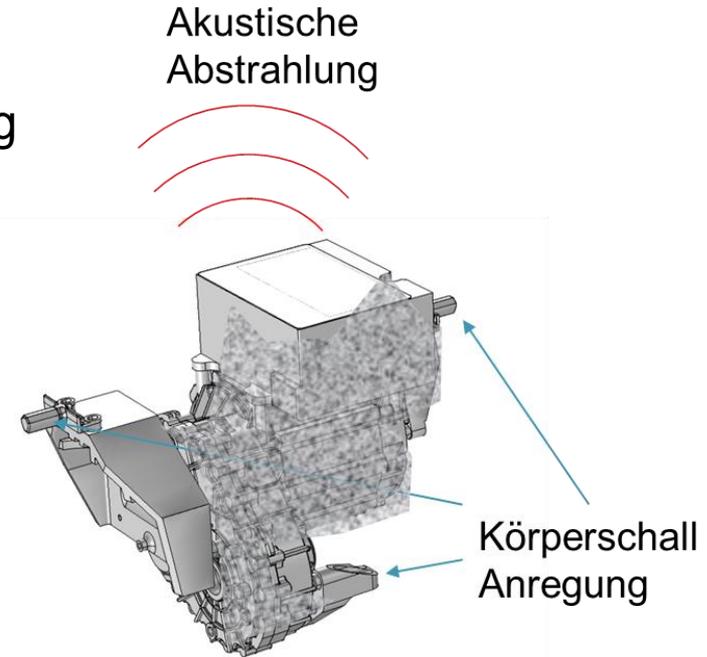
- Beschleunigungen von  $\sim 3\text{-}4 \text{ m/s}^2$  an der aktiven Lagerseite
- Isolation von 10-20dB für Ordnungen messbar. Passivseitige Beschleunigungen  $> 0.1 \text{ m/s}^2$  bis zu 3kHz vorhanden

**Resonante Abstrahlung kann hier auch nicht ausgeschlossen werden**

**→ E-motor Heulgeräusche müssen in Hinblick auf Durchschallung & resonante Abstrahlung untersucht werden**

## Ziele

- Dominanter Pfad (Abstrahlung oder Körperschall)?
  - Quantifizierung von Lagerkräften
  - Quantifizierung der abgestrahlten Leistung
- Verständnis von Anregungsmechanismen
  - Modale Gehäuse/Bracket Eigenschaften
  - Rotor/Statorgeometrieinfluß auf Quelle
  - Einfluss von Ansteuerung/Lastprofilen

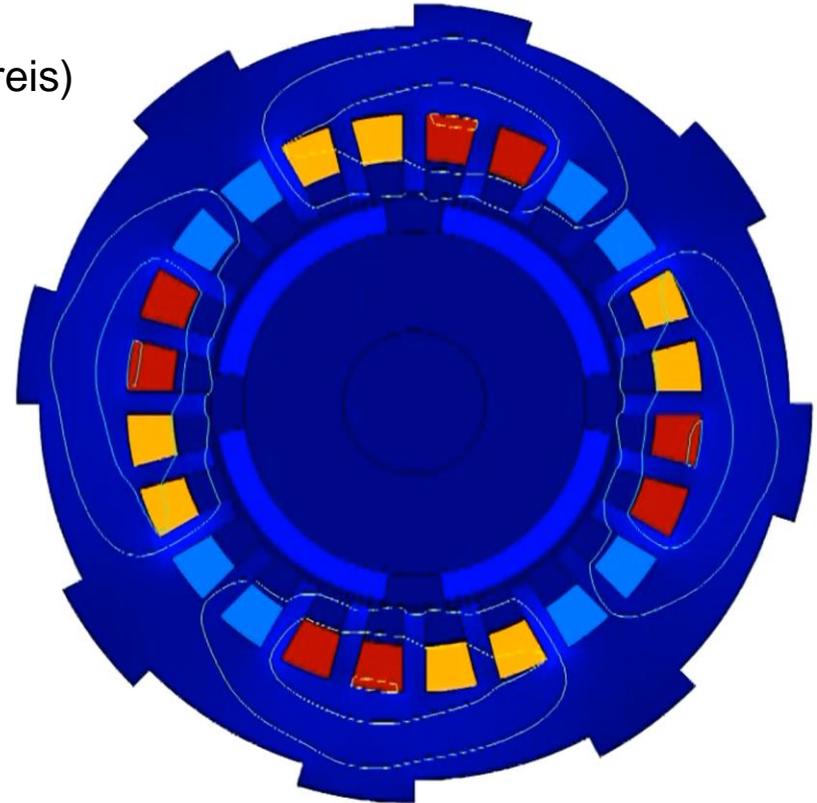


## Permanentmagnetische Synchronmaschine

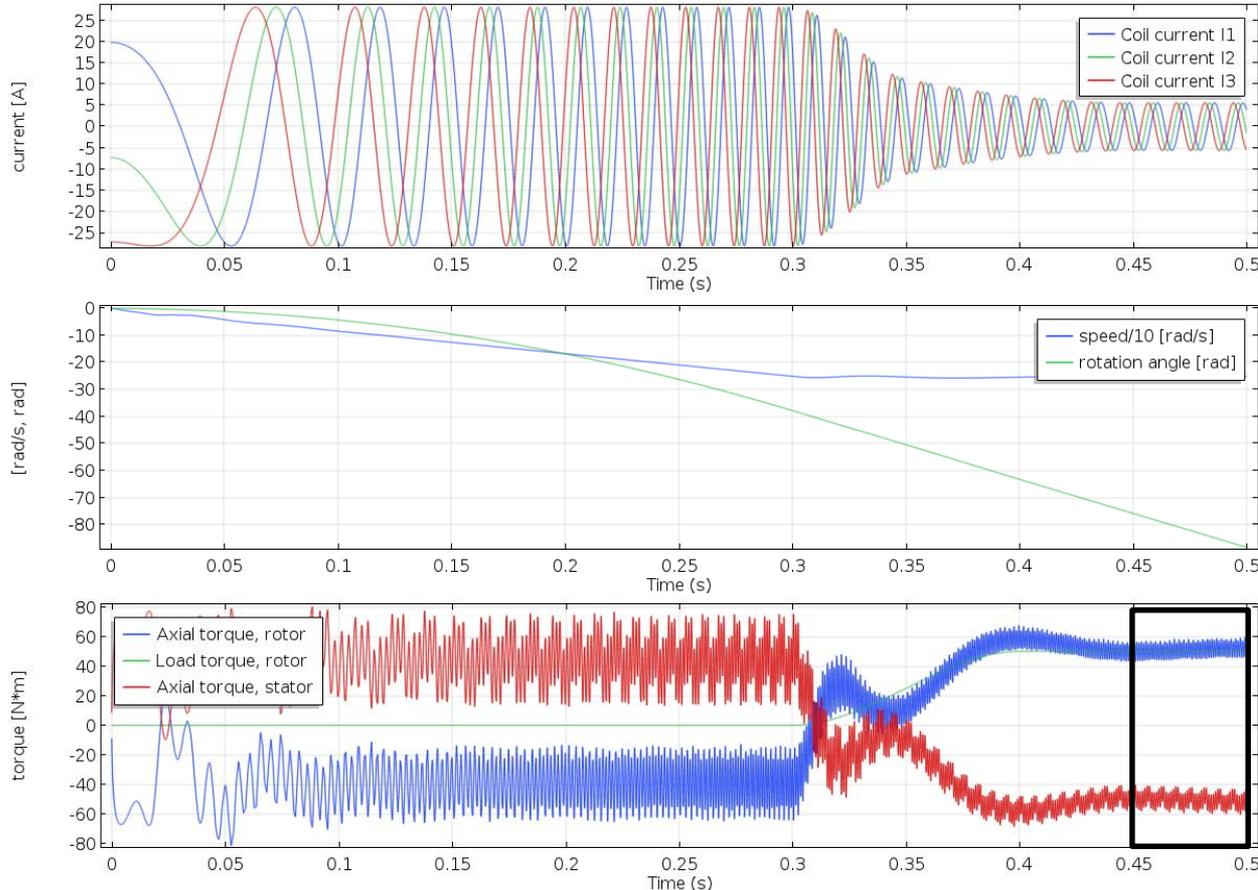
- 2D Querschnittsgeometrie (magnetischer Kreis)
  - Poolpaare (2)
  - Kühlkanäle (8)
  - Stator/Rotornuten (24/4)
- Ansteuerung über Wicklungsstrom und Drehfeldfrequenz
- Annahme dynamischer Lasten

## Simulation in 1D/2D

- ODE Modellierung der Rotationsdynamik
- Quasi-stationärer Löser im Zeitbereich
- 3D → schräge Wicklungen od. Kühlkanäle



# Quasi-stationäre Simulation im Zeitbereich



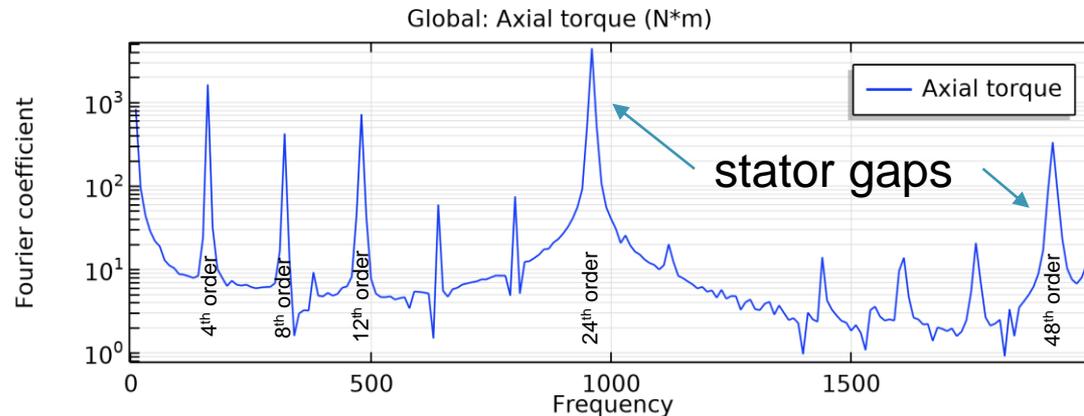
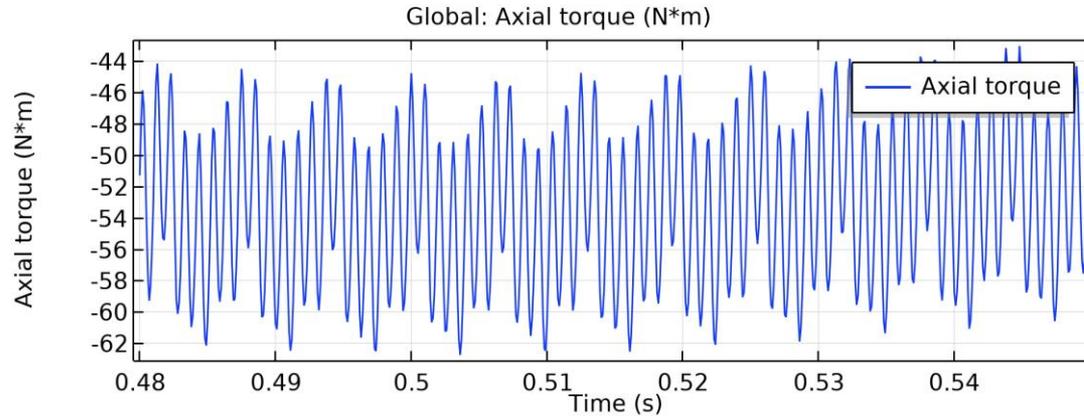
Hochlauf zur Erreichung von 2400rpm @ 0.3 s

Rotationale Trägheitsmomente glätten die Winkelgeschwindigkeit

Lastaufbringung für > 0.3 s

Drehmomente bezüglich Starrkörper

Fokus der Analyse > 0.45 s

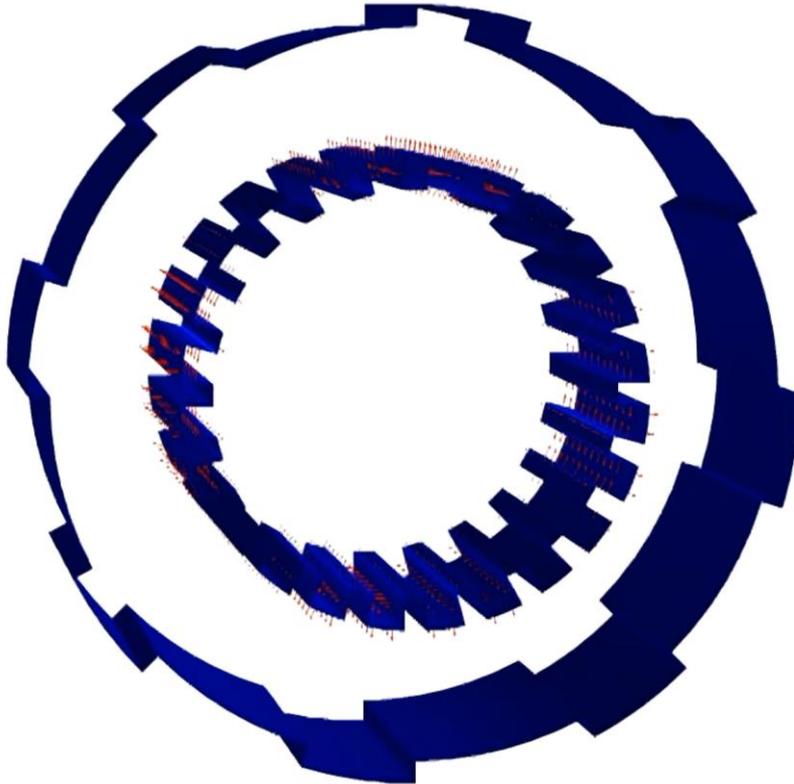


Ungleichförmigkeit / Umdrehung

- 4 Pole/Polnuten
- 8 Kühlschächte
- 24 Statornuten

Geometrische  
Ungleichförmigkeiten sind nicht  
simuliert

Höhere Ordnungen von  
Ungleichförmigkeiten überlagern  
sich → Trennung schwierig

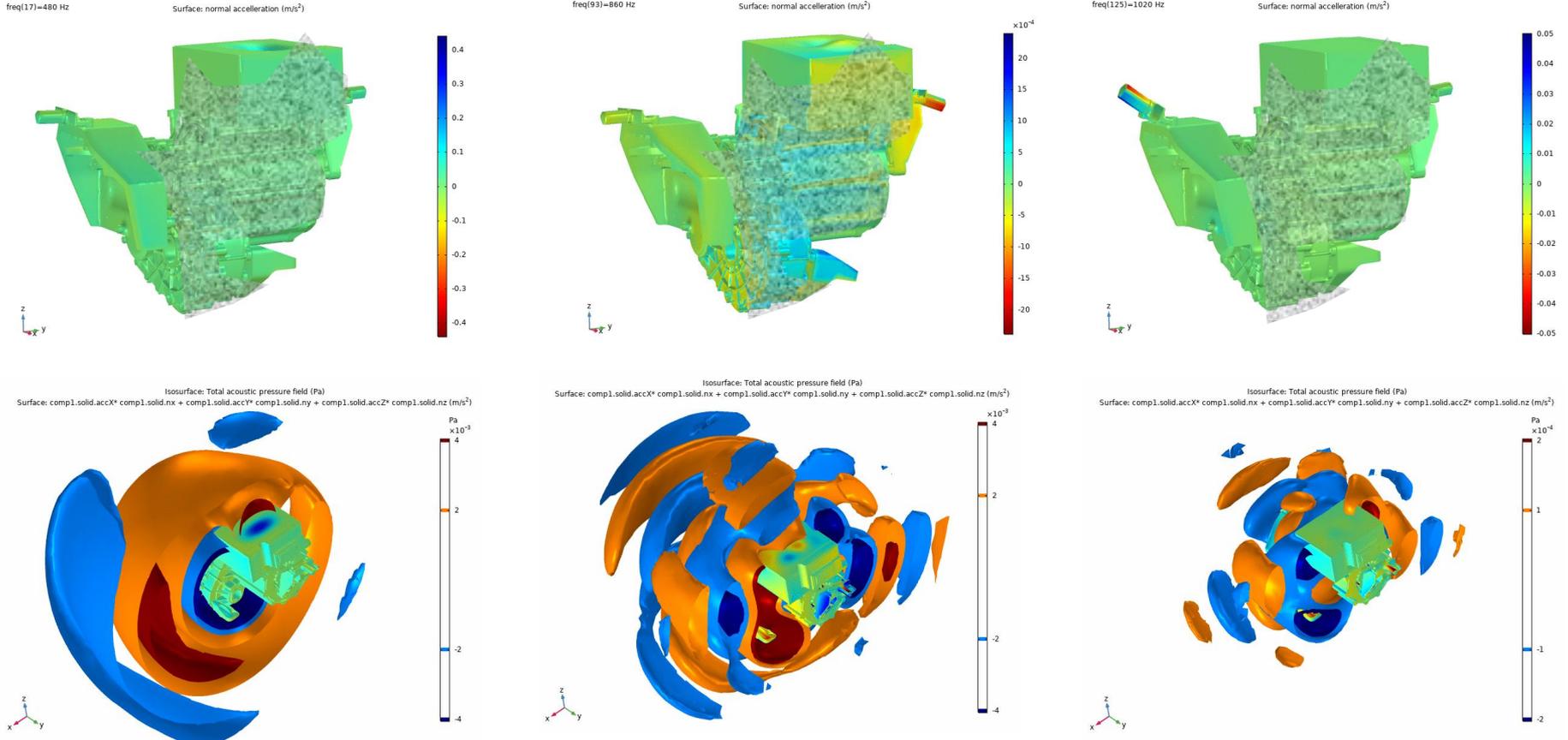


Radialkräfte stellen  
Hauptkomponente dar.

$$\sum F_{rad} = 0$$

$$\sum F_{tan} \neq 0$$

# FDOM: Analyse bei Problemfrequenzen

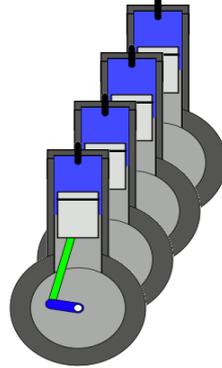


## Probleme für E-Fahrzeuge mit geringer akustischer Motorabstrahlung

- Außengeräusch  
Homologationsanforderung für AVAS (Automotive Vehicle Alert System)  
(Europe, Japan: UN-R 138-00, US: FMVSS 141)
- Innengeräusch
  - einerseits mangelndes Motorfeedback
  - andererseits kein Motorgeräusch zur Maskierung von z.B. Nebenaggregatsgeräuschen

## Verbrennung

Finites Differenzenmodell für den Verbrennungsdruck

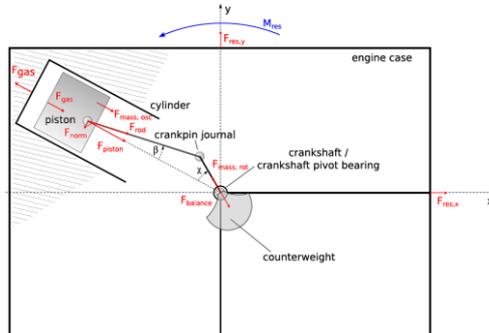


## Rohrakustik für Zylinder

Digitale Wellenleiter Synthese

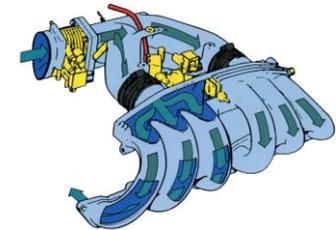
## Körperschall

Einfaches Motorlager-Modell



## Rohrakustik für:

## Ansaugung



## Krümmen



## Abgasanlage



## TORCS racing simulation



Open source racing simulation  
UDP sender for rpm and throttle

WLAN



## Road parametrization



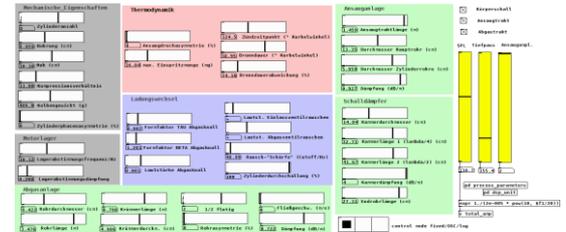
UDP sender for rpm and throttle

WLAN



## Physical Engine Model

WLAN

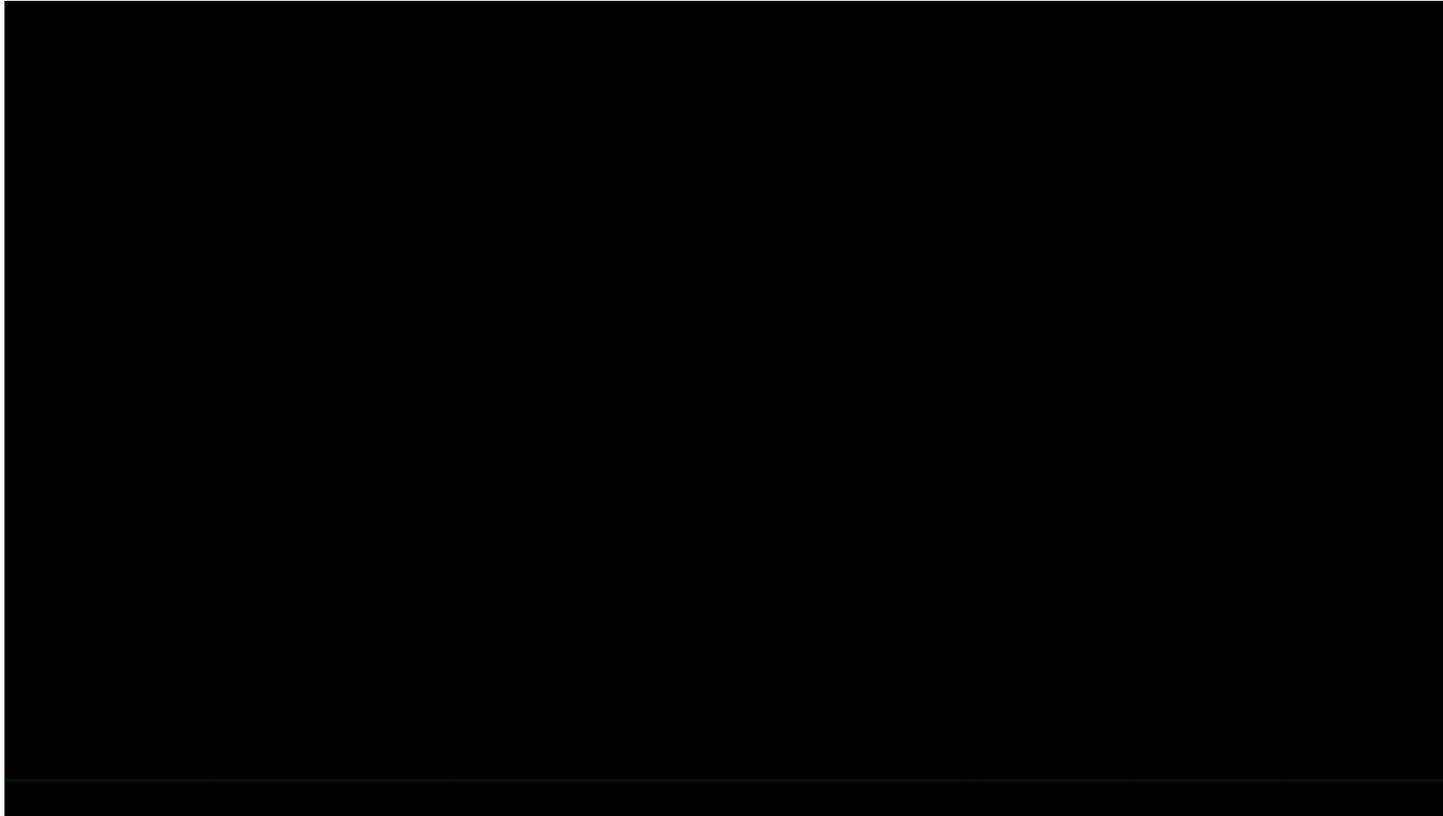


## Vehicle implementation

Efficient sound synthesis algorithm for low cost ECUs



# PD - Implementierung eines physikalischen VKM Soundgenerators

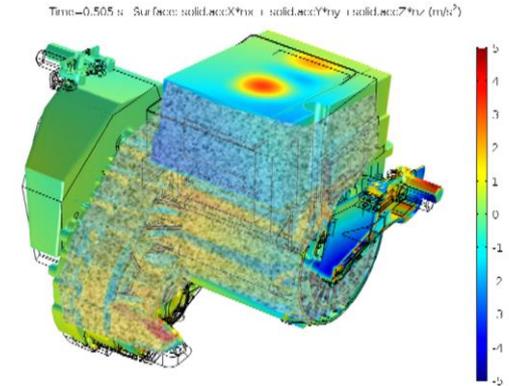


## E-Motor

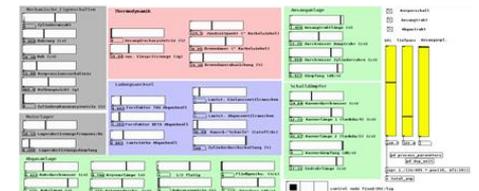
- Modellierung elektromechanischer Belastungen
  - Welligkeit Drehmoment (torque ripple)
  - Statorkräfte (relevant für Abstrahlung)
- Beziehung zwischen Körper-und Luftschallgeräuschpfaden

## Motorgeräusch Synthese

- Physikalische Sound-Design Modellierung VKM
- Anwendung für Fahrzeug Innen-und Außen Sound
- Maskierung von Nebenaggregatgeräuschen



WLAN





DRIVING **EXCELLENCE.**  
INSPIRING **INNOVATION.**