

# Optimierung des Geräusch- und Vibrationsverhaltens von Nutzfahrzeugen

Daniel Hermyt

# Innovationstreiber im Nutzfahrzeug-Markt...

## Gesetzliche Vorschriften und Regelungen



Lärmschutz



Abgasnormen



Höhere Sicherheitsanforderungen

## Globalisierung



Wettbewerb



Globale vs. lokale Anforderungen



Dezentrales Engineering

## Kundenorientierte Sichtweise



Erhöhte Variantenanzahl



Reduzierte Betriebskosten

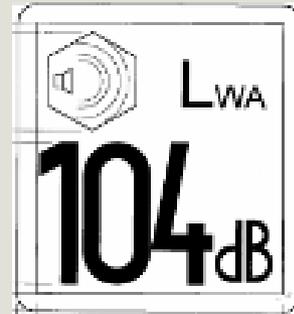


Erhöhte Produktivität

# Innovationstreiber im Nutzfahrzeug-Markt... mit Auswirkungen auf die akustische Performance

## Normen und Gesetze

- **Pass-by noise Richtlinie:** 1992/97/EC und basierend auf ISO362
- **Richtlinien zum Umgebungslärm:** 2000/14/EC und basierend auf ISO3741, ISO3744, ISO3745, ISO3746



## Kraftstoffeinsparung

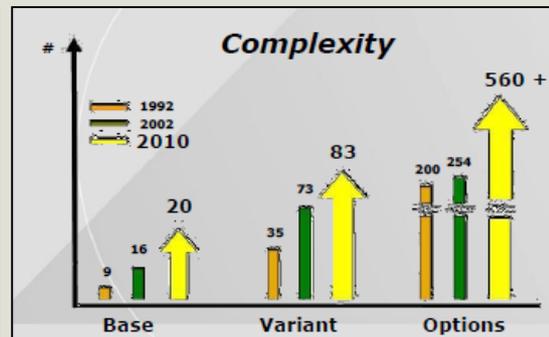
- Elektrifizierung, Hybridsysteme
- Leichtbauweise wo möglich



## Konfigurations-Komplexität



Quelle: John Deere, Annual report June 2011



## Komfort für den Bediener

- Gutes Geräuschverhalten, auch über die Anforderungen hinaus, ist ein Vorteil!



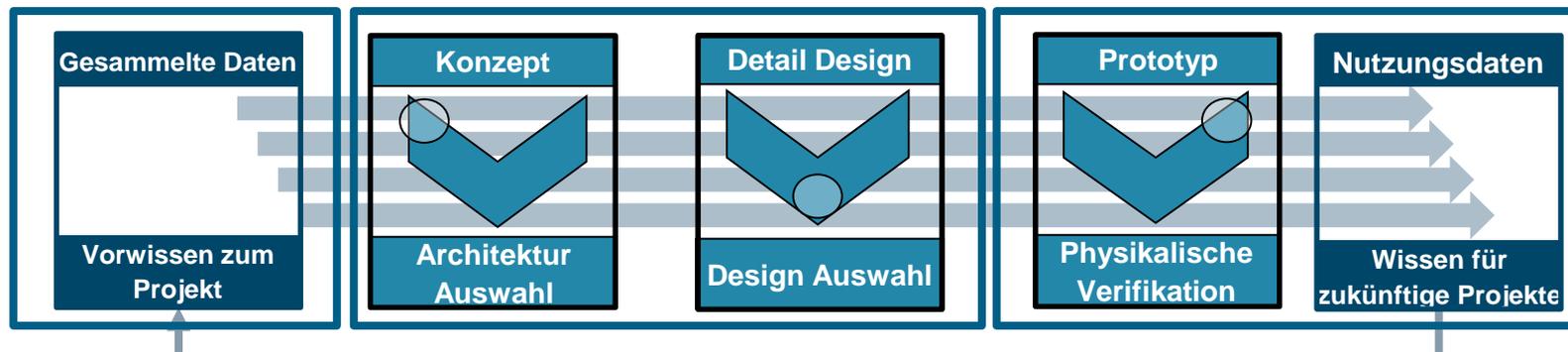
Quelle: Cat® K Series Wheel Loaders | Quiet & Comfortable | Testimonials, [https://www.youtube.com/watch?v=MORgGKfe\\_rk](https://www.youtube.com/watch?v=MORgGKfe_rk)

# Lösungen: Prozess-Übersicht

## Geräusche und Vibrationen

### Geräusche & Vibrationen & Fahrkomfort

### ISO Zertifizierung



# Herausforderungen im Bereich Geräusche und Vibrationen getrieben von Vorschriften und Kundenanforderungen

Vorschriften und Normen

NVH Engineering

**Außengeräusche**  
Richtlinie 2000/14/EC



**Innengeräusche**  
Richtlinie 2003/10/EC

**Vibrationen**  
Richtlinie 2002/44/EC

Minimierung der Geräusch-  
und Vibrationsübertragung

Hydraulik-  
system

Kabinen-  
geräusch

Kühlsystem

Getriebe/  
Achsen

Motor



Reifen

# Herausforderungen im Bereich Geräusche und Vibrationen getrieben von Vorschriften und Kundenanforderungen

Vorschriften und Normen

NVH Engineering

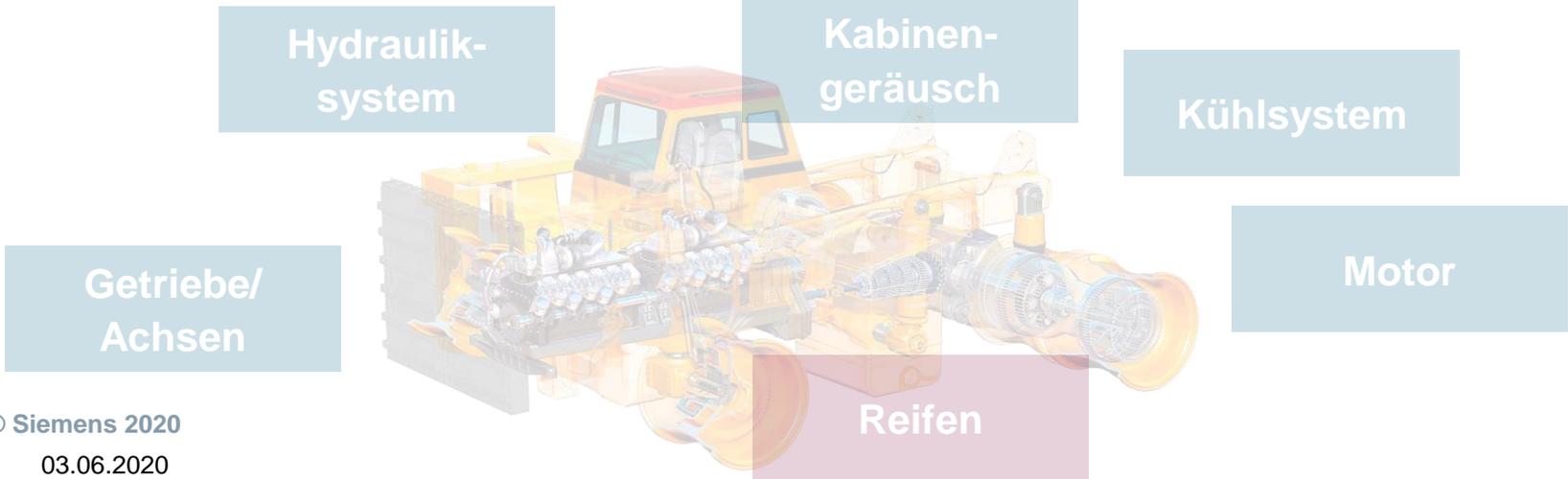
**Außengeräusche**  
Richtlinie 2000/14/EC  
*Reduzierung der Umweltbelastung*



**Innengeräusche**  
Richtlinie 2003/10/EC  
*Schutz des Bedieners*

**Vibrationen**  
Richtlinie 2002/44/EC  
*Komfort des Bedieners*

Minimierung der Geräusch-  
und Vibrationsübertragung



# Warum Zertifizierungsprüfungen?

**SIEMENS**  
*Ingenuity for life*



Stellen Sie sicher,  
dass Sie Ihre  
Produkte weiterhin  
verkaufen können !



# Produktzertifizierung für Nutzfahrzeuge

Simcenter unterstützt alle spezifischen Geräusch- und Vibrationsstandards

**SIEMENS**

*Ingenuity for life*



**Außengeräusche**

**Schalleistungspegel**

- Richtlinie 2000/14/EC: EU-Richtlinie für Lärmemissionen
- ISO 6393 -stationäre Bedingungen
- ISO 6395 -dynamische Bedingungen

**Kabinengeräusch**

**Schalldruckpegel**

- Richtlinie 2000/14/EC: EU-Richtlinie für Lärmemissionen
- ISO 6394 -stationäre Bedingungen
- ISO 6396 -dynamische Bedingungen

**Körperschwingung**

**Körperschwingung**

- Richtlinie 2002/44/EC: EU-Richtlinie über Humanschwingungen
- ISO 2631 -Ganzkörper-schwingungen

**Vorbeifahrt-Geräusch**

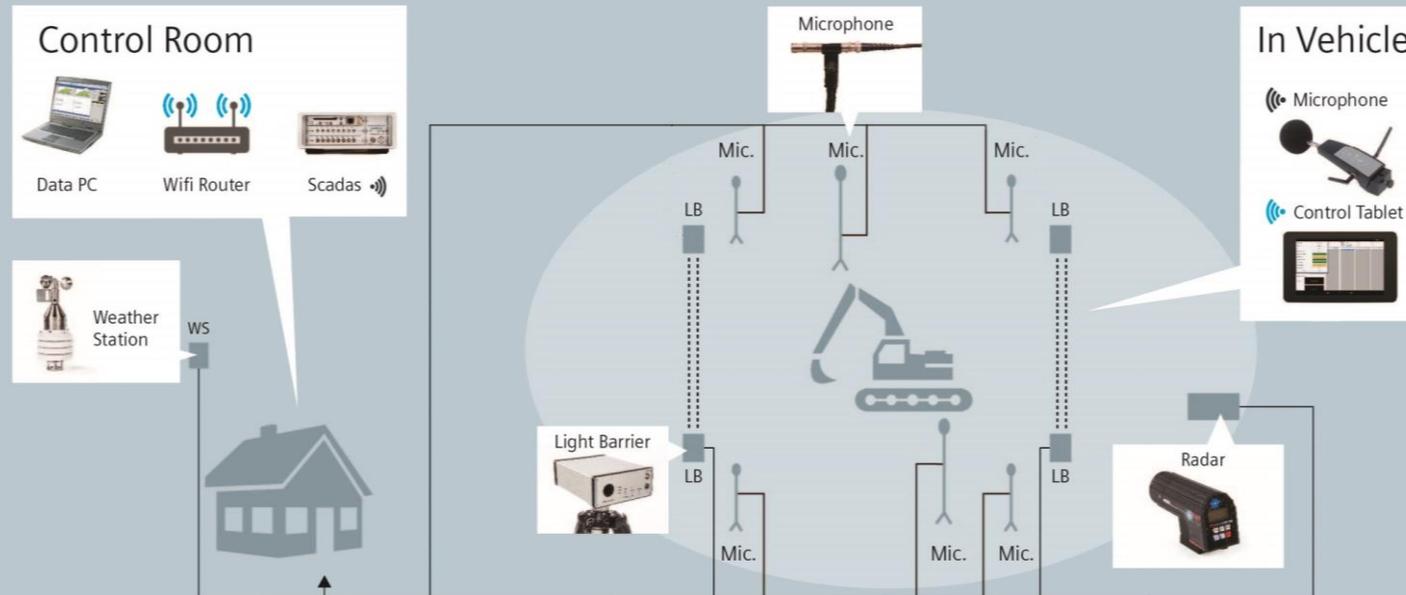
**Vorbeifahrt-Geräusch**

- Richtlinie ECE-R51.03: EU-Richtlinie über Lärmemissionen von Fahrzeugen der Klassen M und N
- ISO 362 -emittierter Lärm von beschleunigenden Fahrzeugen

# Siemens Off-highway Sound Power & Cabin Noise Certification

## Erhöhung der Testeffizienz und Kostensenkung

**SIEMENS**  
*Ingenuity for life*



### Test Effizienz:

- **Kostensparnis:** reduzierte Testzeit
- **Einsparung von Arbeitskräften:** System mit nur einem Bediener
- **Durchsatz erhöhen:** optimale Nutzung der Zeit auf der Prüfstrecke

### Benutzerfreundlich:

Der Bediener konzentriert sich voll auf das Fahren des Fahrzeugs

### Flexibles System:

Eine Plattform - Hardware & Software - für Betriebsfestigkeit, Geräusch & Vibration und ISO-Zertifizierung

Außengeräusche  
Kabinengeräusch



## Eine Plattform

- Hardware & Software für Betriebsfestigkeit
- Geräusch & Vibration
- ISO-Zertifizierung

Test & Analyse

"Unsere Simcenter-**Betriebsfestigkeits**-Lösung ist sehr vielseitig. Sogar unser NVH-Team verwendet sie zur Durchführung von Humanschwingungs-Messungen und zur Bestätigung der ISO-Konformität für Schalleistung. Die Simcenter-Lösungen haben uns wirklich geholfen, unsere Ziele in Bezug auf Betriebsfestigkeit, Leistung und Ergonomie zu übertreffen".

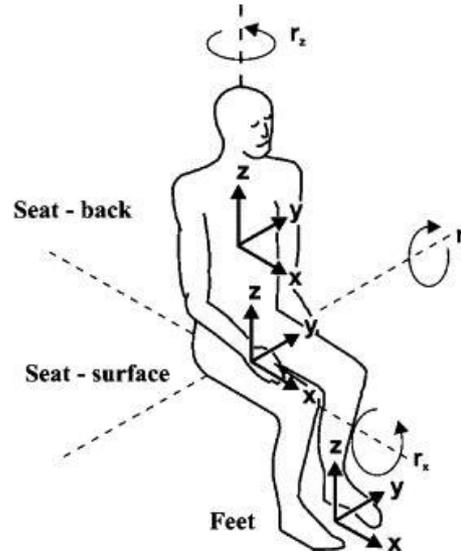
**Mr. Ferhan Ficici, R&D Director Hidromek**

# Bewertung der Körperschwingungen in Nutzfahrzeugen

Simcenter unterstützt alle spezifischen Körperschwingungsmetriken



Körperschwingung

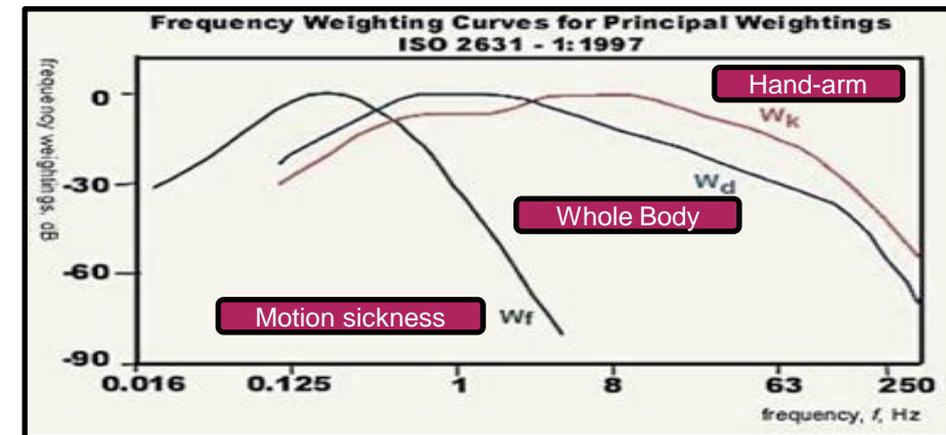


## Beispiel Belastungen Steinbruch

Machine	Daily exposure ranges in the three directions of vibration		
	X (fore and aft vibration)	Y (side-to-side vibration)	Z (vertical vibration)
Hauling – articulated dump trucks	0.4 – 0.6 m/s <sup>2</sup> A(8)	0.6 – 0.8 m/s <sup>2</sup> A(8)	0.5 – 0.7 m/s <sup>2</sup> A(8)
Hauling – rigid dump trucks	~0.4 m/s <sup>2</sup> A(8)	~0.4 m/s <sup>2</sup> A(8)	0.4 – 0.6 m/s <sup>2</sup> A(8)
Loading – wheeled loaders	0.6 – 0.9 m/s <sup>2</sup> A(8)	0.5 – 0.7 m/s <sup>2</sup> A(8)	0.3 – 0.5 m/s <sup>2</sup> A(8)



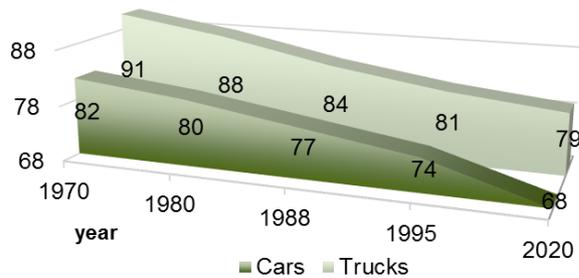
- Bewertung des Komforts und der Gesundheit im Zusammenhang mit lang andauernder Vibrations-Belastung
- Unterstützung von Ganzkörperschwingungen (ISO 2631) und Hand-Arm-Vibrationen (ISO5349)
- Unterstützung der in ISO2631 definierten spezifischen Gewichtungsfunktionen



# Von Pass-by Noise Test zu Pass-by Noise Engineering

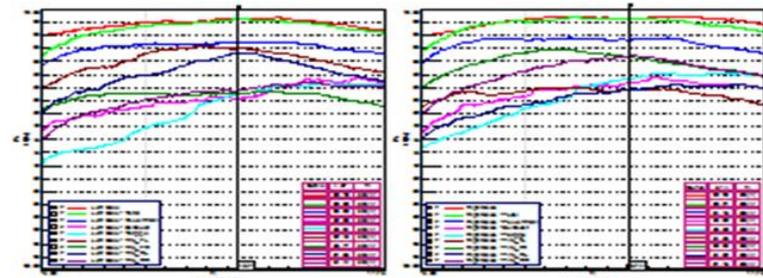
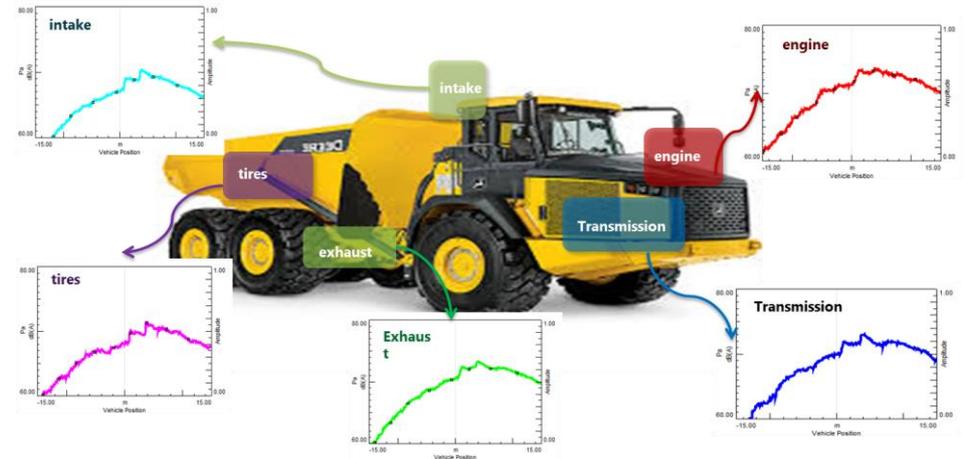
## Außenbereich Pass-by Noise

Effiziente Pass-by Noise Tests und Zertifizierung



## Pass-by Noise Engineering

Verständnis von Subsystem-Beiträgen



# Herausforderungen im Bereich Geräusche und Vibrationen getrieben von Vorschriften und Kundenanforderungen

**Außengeräusche**  
Richtlinie 2000/14/EC  
*Reduzierung der  
Umweltbelastung*



**Innengeräusche**  
Richtlinie 2003/10/EC  
*Schutz des Bedieners*



**Vibrationen**  
Richtlinie 2002/44/EC  
*Komfort des Bedieners*

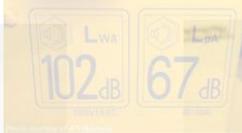
Minimierung der Geräusch-  
und Vibrationsübertragung

- Simcenter-Testlösungen decken alle Anforderungen der Geräusch- und Schwingungsvorschriften ab
- Simcenter-Testlösungen sind über die Homologierung hinaus universell einsetzbar und umfassen NVH und Betriebsfestigkeits-Engineering während der gesamten Maschinenentwicklung

# Herausforderungen im Bereich Geräusche und Vibrationen getrieben von Vorschriften und Kundenanforderungen

Vorschriften und Normen

**Außengeräusche**  
Richtlinie 2000/14/EC



**Innengeräusche**  
Richtlinie 2003/10/EC

**Vibrationen**  
Richtlinie 2002/44/EC



**Minimierung der Geräusch-  
und Vibrationsübertragung**



NVH Engineering

**Hydrauliksystem**  
*Pumpe mit geringer  
Restwelligkeit und  
niedrigem Schallpegel*

**Kabinengeräusch**  
*Leise Kabine*

**Kühlsystem**  
*Geräuscharmer  
Lüfter*

**Getriebe/Achsen**  
*Zahnradqualität und  
Gehäusedesign*

**Motor**  
*Niedrige Schall- und  
Vibrationspegel*



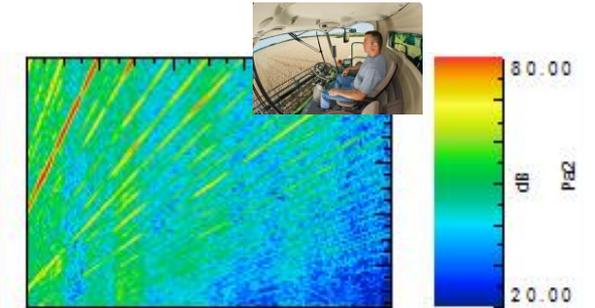
**Reifen**  
*Niedrige  
Vibrationspegel*

# System Engineering für NVH

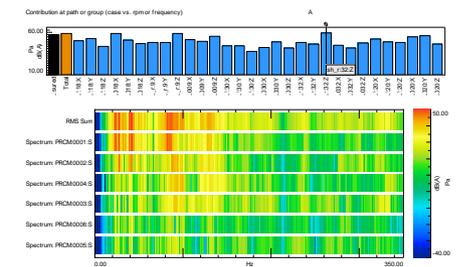
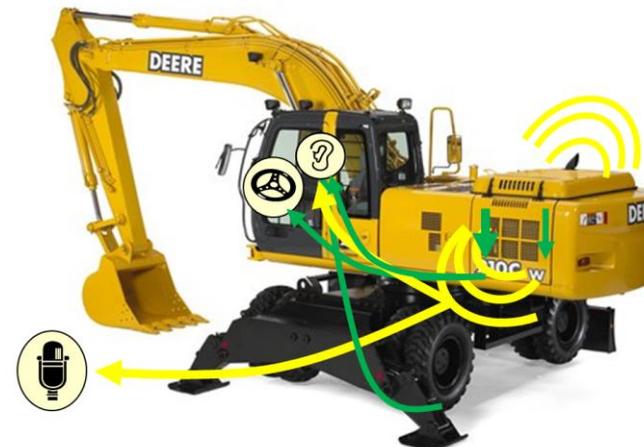
## Source-Transfer-Receiver Modell



Lenkrad-Vibrationen  
Schwingungen des Sitzes  
Geräuschprobleme



- Generische strukturierte Methode zur Analyse von NVH-Merkmalen
- Begründet in Test, sowohl in Simulation als auch in Test verwendet



# Transfer Pfad Analyse (TPA)

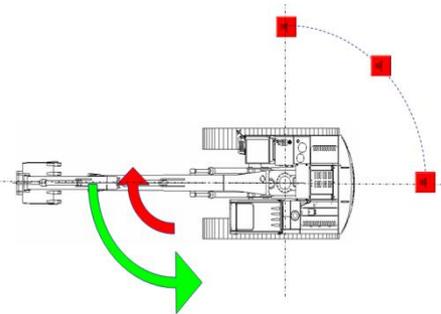
## Analyse von Bagger-Außengeräuschen

### TPA: Beitrag der Moterlager Lasterkennung an Motorlagern

- 6 Lager x 3 DOFs Identifizierung translatorischer Kräfte
- Matrix inversion von 18 Kräften x 21 Beschleunigungen



Betriebsmessungen



Vibro-acoustic reciprocity

$$H_{VA} = \frac{x_i}{Q_j} = -\frac{P_j}{F_i}$$

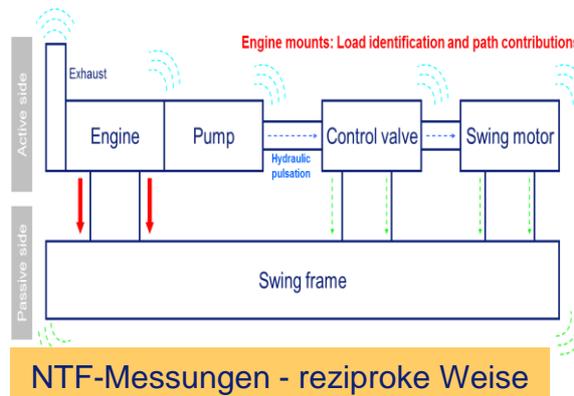
Acoustic exciters



Acoustic-acoustic reciprocity

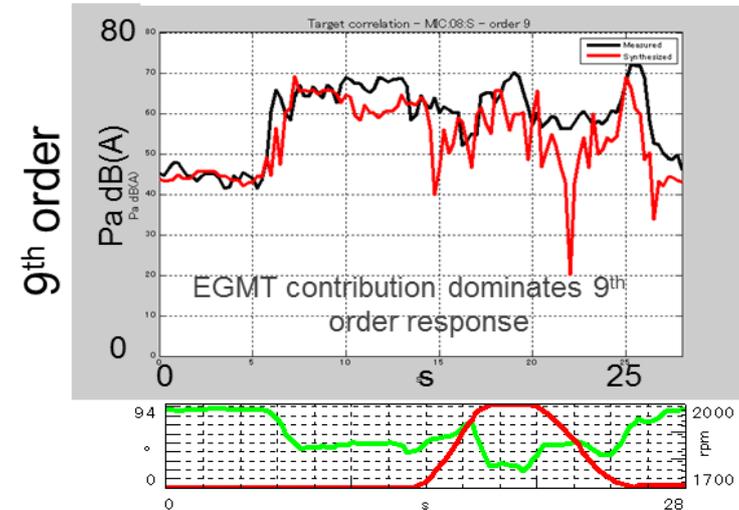
$$H_{AA} = \frac{p_i}{Q_j} = -\frac{p_j}{Q_i}$$

Acoustic excitation from ISO mic

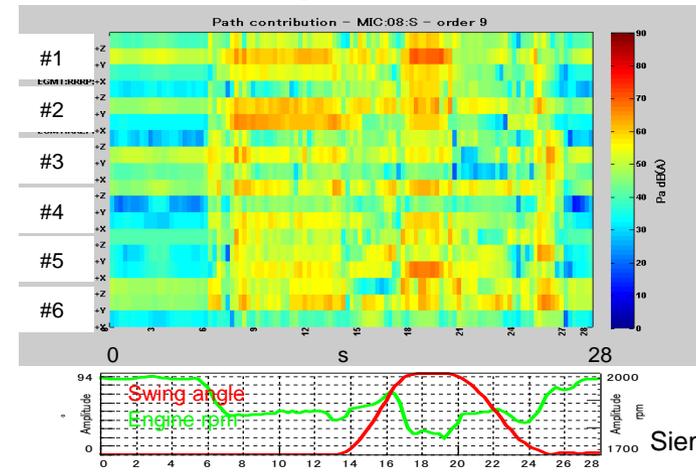


### TPA-Beitragsanalyse

### Measurement TPA: engine mount contribution



### 9th order, Original mount, MIC:8



# NVH Herausforderungen und Lösungen

## Kabinen-Komfort

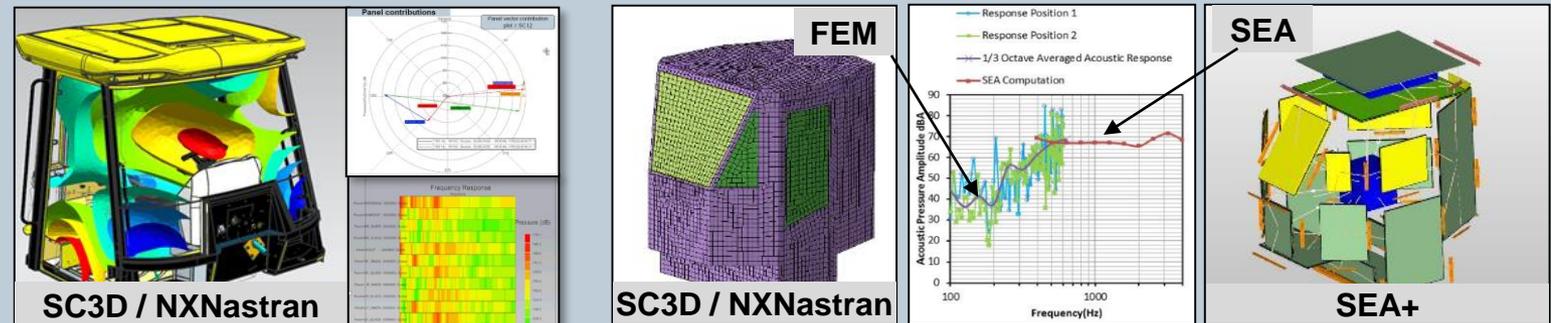
### Kabinen-Komfort

- Bedienerkomfort in Bezug auf Geräusch und Vibration
- Motor-/Zubehörbefestigung
- Befestigung der Kabine
- Bedienpanel-Design
- Kabinen-Design

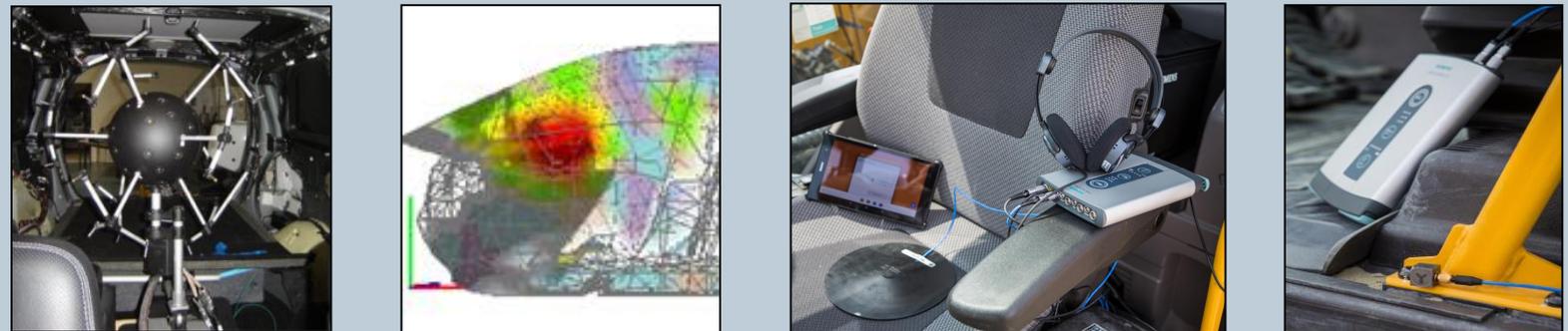


### Simcenter Lösungen

#### FEM-Vibroakustik- und SEA-Lösungen für Struktur- und Design-Optimierung



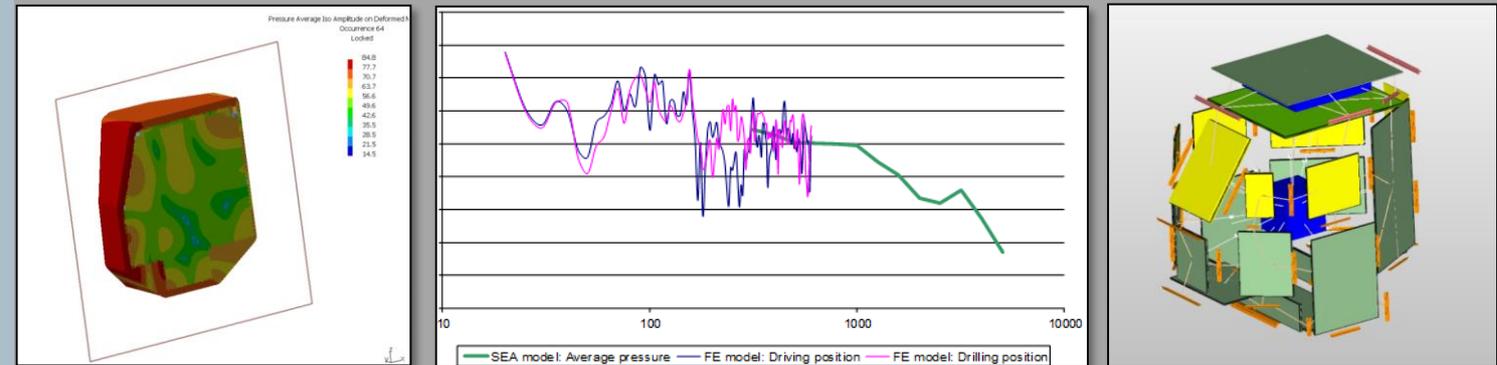
#### 3D-Akustik- und Ganzkörperschwingungsmessungen





- Untersuchung der Empfindlichkeit gegenüber Körperschall und Luftschallquellen für Kabinenschallübertragungswege
- Kombiniertes FEM- und SEA-Ansatz unterstützt einen breiten Frequenzbereich
- Einsicht in die wichtigsten Übertragungswege zu Beginn des Designzyklus

### FEM- und SEA-Vibroakustik-Analyse



Nieder- bis mittelfrequentes Geräusch mittels FEM

Mittel- bis hochfrequentes Geräusch mittels SEA

- Die Lasten für das SEA-Modell wurden aus FEM-Simulationen abgeleitet. Eine Kombination komplementärer numerischer Verfahren zur Vorhersage des Kabinengeräuschpegels über den gesamten Frequenzbereich

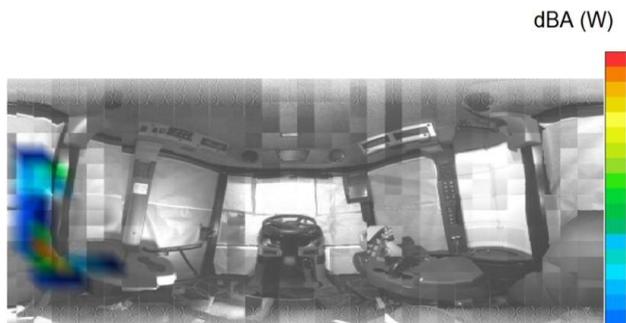
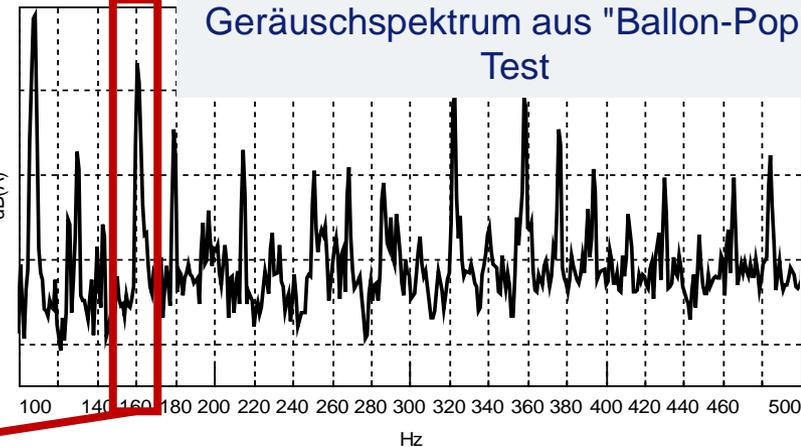
**"Die mit den beiden Verfahren berechneten Kabinengeräusche stimmen im Mittelfrequenzbereich sowohl für den Körperschall als auch für den Luftschall überein und geben Vertrauen in die Ergebnisse."**

SAE paper 2012-01-1546

# Lokalisierung von Innengeräuschen und Schallquellen

## Geräusch-Fehlersuche an landwirtschaftlicher Maschine

- Einsatz der **Simcenter 3D Akustischen Kamera** zur Fehlersuche bei der Ursache von Spitzen im Lärmspektrum innerhalb der Kabine
- 3D-Kamera deckt breiten Frequenzbereich von **100 - 6000 Hz** ab
- Niedrige Frequenzen < 1000 Hz mit ESM



Identifizierung stehender Wellen von hinterer linken Ecke zum rechten Fuß des Fahrers



Validatierung: 'Aufbrechen' der stehenden Welle: > 10 dBA niedriger



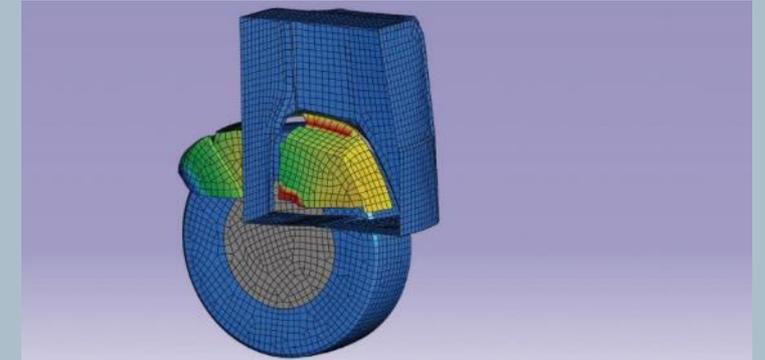


- Entwicklung eines Ansatzes zur Lösung akustischer Probleme in einem frühen Stadium des Entwicklungsprozesses
- Schnell und effizient Effekte identifizieren, die zu lauten Kabinengeräuschen führen
- Ermöglichte ein besseres Verständnis des komplexen akustischen Systems

### Experimentelle und numerische akustische Analyse



NVH-Tests



Akustik-Simulation

- Verwendung einer Kombination aus experimentellen und numerischen akustischen Analysetechniken
- Nutzung der Simcenter-Dienstleistungen und des Simcenter-Portfolios zur Identifizierung und Lösung von Problemen

**"Durch unsere Zusammenarbeit mit Siemens PLM Engineering Services konnten wir die Empfindlichkeit der verschiedenen Effekte, die zum Phänomen des Kabinenlärms beitragen, viel schneller und effizienter identifizieren.**

Dr. Ing. Christian von Holst, Group Leader, Suspension Systems

## Abstrahlungsgeräusche des Antriebsstrangs

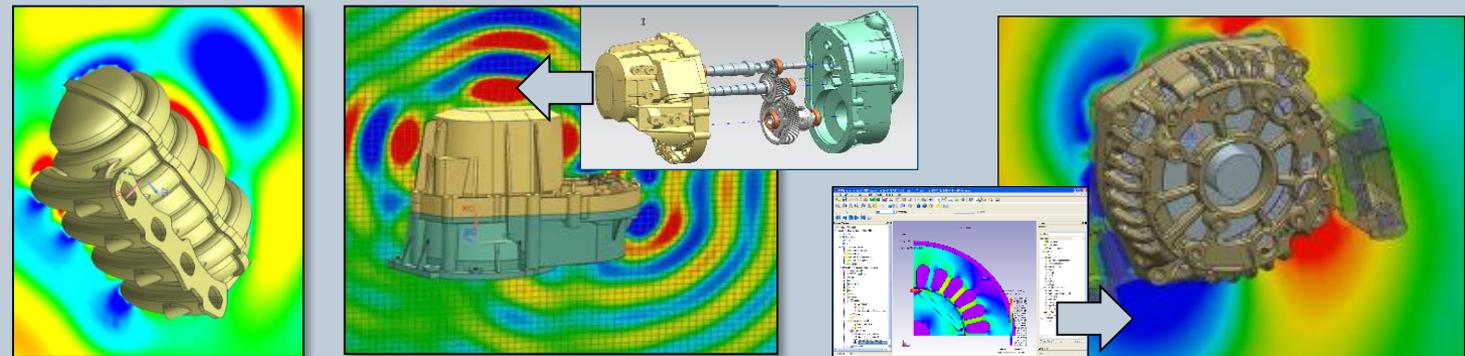
- Strukturoptimierung von **Motor/Getriebe** und potenzielle Kapselung
- Optimierung der Getriebeverluste im **Ansaug- und Abgassystem**
- **Hybrid- und Elektroantriebsstränge** stellen neue Hochfrequenz-Herausforderungen



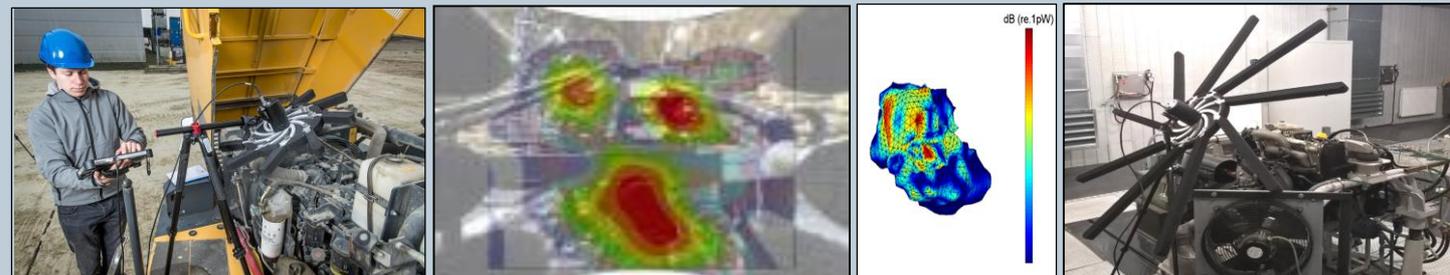
Frei verwendbar © Siemens 2020

## Simcenter Lösungen

### FEM und BEM Vibro-akustische Lösungen



### Schallquellen-Lokalisierung



## HVAC/Kühlgebläse-Geräusch

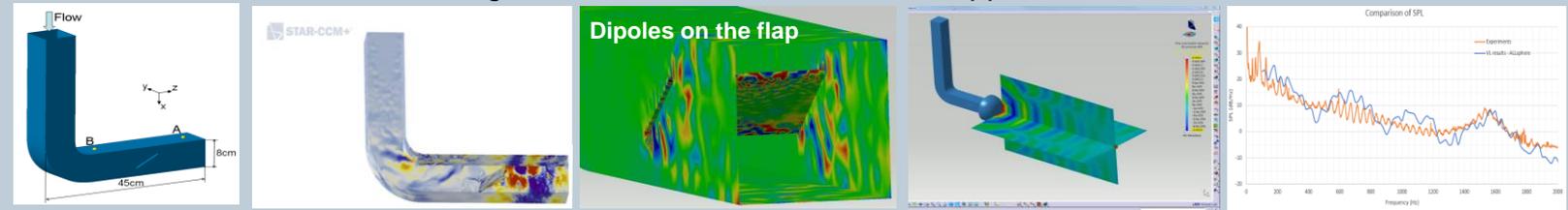
- HVAC- und Kühlsystemdesign für geringe **strömungsinduzierte** Geräusche
- **Ventilatoren** für Motor, Motorkühlung stellen besondere Herausforderungen dar
- Entwurf zur **Lärmbehandlung**: Abschirmungen, Dichtungen im Motorraum



## Simcenter Lösungen

### Aeroakustische Simulation durch Kombination von CFD und FEM (oder BEM) für Akustik

- Lüftergeräusch: tonale und breitbandige Geräusche, die direkt von den Lüfterflügeln ausgehen
- Kanallärm: Lärm durch Strömungsturbulenzen um Membranen, Klappen, Gitter usw.

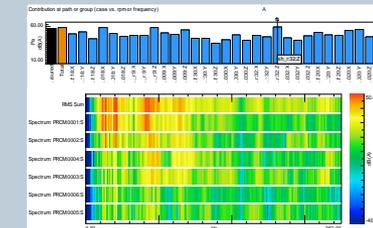
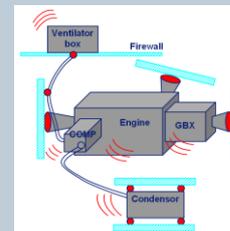


Strömungssimulation - Simcenter Star CCM+ oder 3rd Party

Druckabbildung + Aeroakustische Analogie → Akustische Quellen für Simcenter Acoustics

Akustische Antwort, Abstimmung mit Experiment Simcenter Acoustics

### Quantifizierung von Geräuschübertragungswegen in kürzerer Zeit mit Hilfe der Transfer-Pfad-Analyse



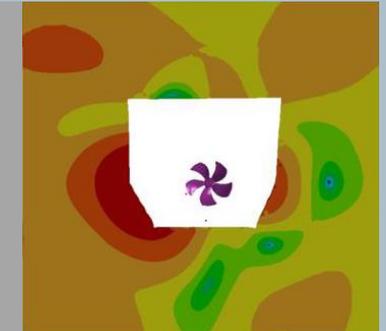
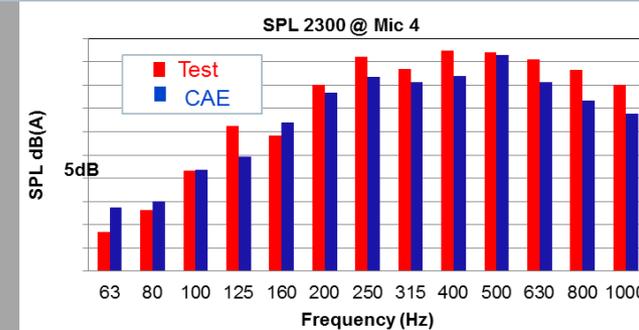
# Bobcat

## Behandlung von Lüftergeräuschen zu Beginn des Designzyklus



- Off-Highway-Fahrzeuge haben aufgrund des Kühlungsbedarfs von Motor- und Hydraulikanlagen typischerweise einen erheblichen Anteil an Lüftergeräuschen.
- Ventilator trägt zum Außenlärm und zur Belastung des Bedieners bei
- Hybrid-CFD - Akustische Simulationsmethode reduziert die Entwicklungszeit und verschafft Wettbewerbsvorteile

### Experimentelle und numerische akustische Analyse



#### Akustische Tests

#### Hybride CFD-Akustiksimulation

- Akustische Tests zur Aktualisierung der Absorptionseigenschaften des Simulationsmodells des Motorraums
- Aeroakustische Analogien übersetzen schlanke CFD-Ergebnisse schnell in äquivalente Dipolquellen für die Lärmprognose

**"Die hybride aero-akustische Methodik für Lüftergeräusche ist bereit für den Einsatz im Designprozess von Off-Highway-Fahrzeugen. Die Genauigkeit ist ausreichend, um den Gesamtgeräuschpegel vorherzusagen und die kritischen Spitzenwerte zu identifizieren."**

SAE Paper 2017-01-1834

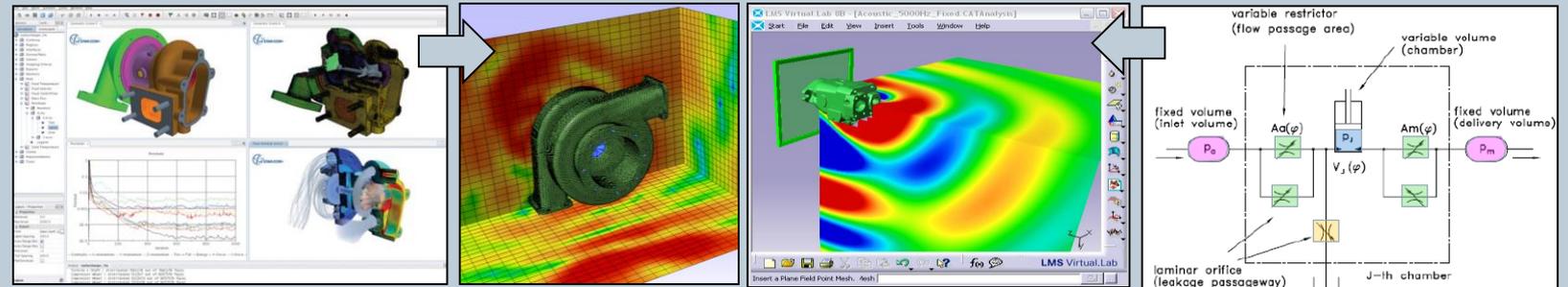
## Pumpen/ Hydraulikgeräusch

- Durch **hydraulische Strömung** induziertes Geräusch
- **Pumpenwelligkeitsschwingungen** müssen auf ein Minimum reduziert werden
- Koinzidenz struktureller Resonanzen und Welligkeitsfrequenz vermeiden
- **Lärmschutzschilde/Gehäuse-Design**

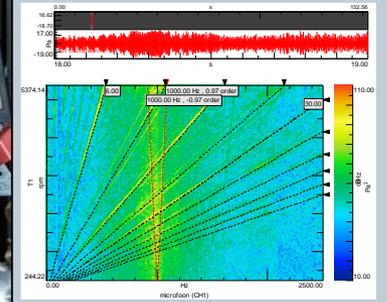
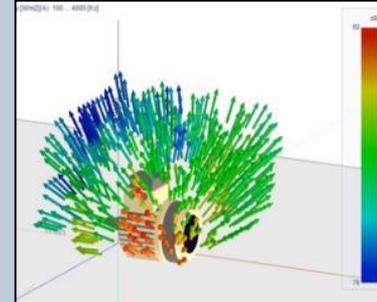


## Simcenter Akustik Simulation

- 1D- und 3D-Hydrauliksimulation für strukturelle Belastungen
- **FEM-Vibroakustik** zur Vorhersage von Gehäuseschwingungen und Außengeräuschabstrahlung



## Benutzerfreundliche Testlösungen zur Optimierung des NVH von Hilfsmitteln



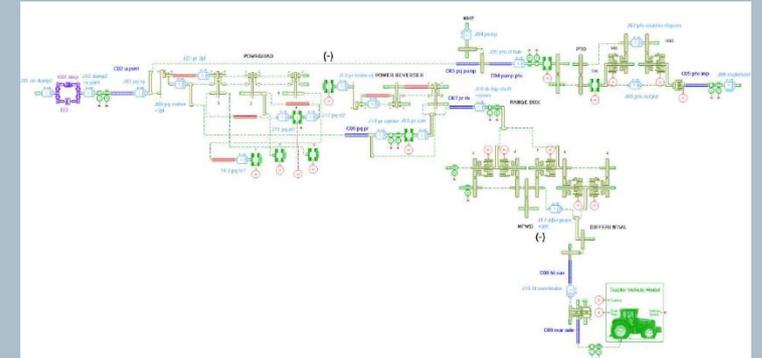
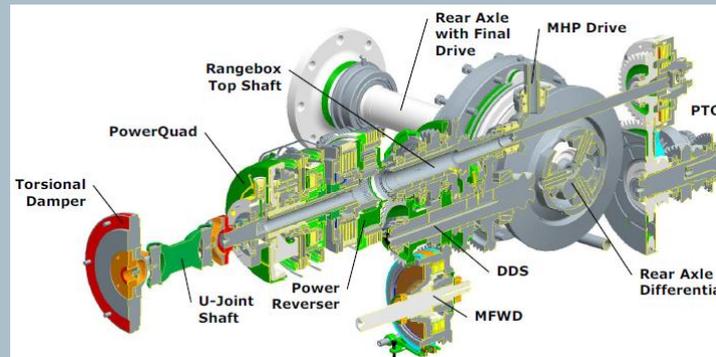
# John Deere Werke Mannheim

Verwendung von Simcenter Amesim für modellbasierten Entwurf, Systemintegration und Validierung

**SIEMENS**  
Ingenuity for life



## Simulation von Traktor-Antriebsstrang und dynamischem System



PowrQuad-Übertragung - CAD-Geometrie

Vollständiges Simcenter Amesim Modell  
Transiente & Modalanalyse

- Die Animation der Modalanalyse ist ebenso ansprechend wie die Ergebnisse anderer Simulationsmethoden
- Gutes Instrument zur Demonstration von Ergebnissen für Nicht-Analysten
- Toolbox zur Unterstützung von Arbeitsabläufen mit großen CAD-Modellen und Animation der Ergebnisse der Modalanalyse wird geschätzt

- 3D-Simulationsergebnisse (FEA, MBS oder CFD) in Verbindung mit Plots und Balkendiagrammen, die in der 1D-Systemsimulation erzielt wurden
- Untersuchung der Visualisierungsmerkmale von AMEAnimation.

**“3D visualization of tractor drive train torsional vibrations”, Mathias Klittich, John Deere Werke Mannheim**

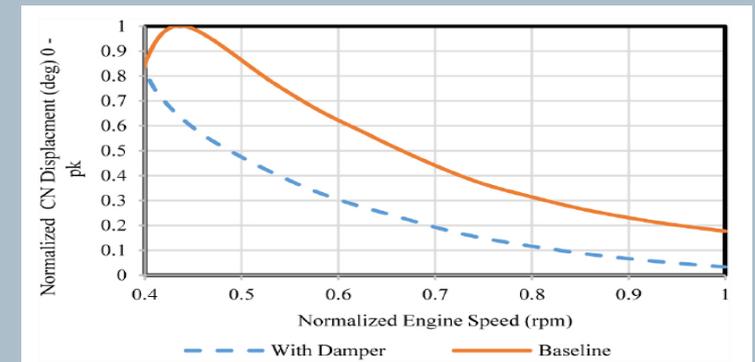
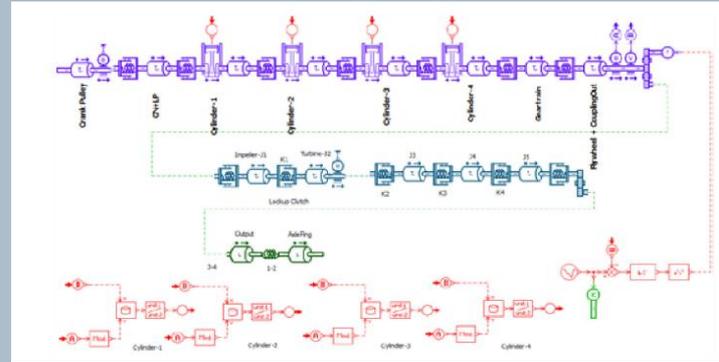
The International LMS Engineering Simulation Conference 2010

# Cummins & Allison Transmission

## Analytische Bewertung der NVH-Phänomene eines integrierten Antriebsstrangs



### Verwendung eines Modells des kompletten Antriebsstrangs



Modell des Antriebsstrangs

Auswirkungen der Integration eines Dämpfers auf die Kurbelgeräuschverschiebungen (2. Ordnung)

- Besseres Verständnis der Kupplungseffekte zwischen Motor und Getriebe
- Identifizierung der besten Lösungen zur Beseitigung von Schwingungsphänomenen

- Modell des Motors und des Getriebes in der gleichen Darstellung
- Analyse- und Optimierungswerkzeuge für den Frequenzbereich

"Das Basismodell ermöglichte einen Einblick in die Grundursache des Problems, erlaubte es den Ingenieuren, parametrische Studien durchzuführen und mögliche Gegenmaßnahmen zu evaluieren."

Rohit Saha, Cummins Inc

# Volvo Construction Equipment

## Verbesserung des akustischen Komforts



- Erhebliche Fortschritte bei der Lösung von Heulgeräuschen im Führerstand erzielt
- Entdeckte die Notwendigkeit, die Qualität der Zahnräder zu verbessern, um Vibrationen zu reduzieren
- Tiefere Einblicke durch die Durchführung von Torsionsschwingungsanalysen gewonnen

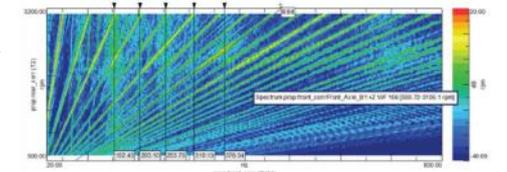
### Behandlung von NVH-Problemen



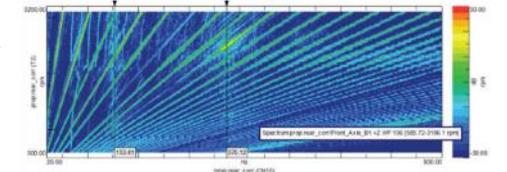
NVH-Fragen behandeln

- Hinzufügen einer Masse von etwa 10 Kilo, um die Dynamik der Welle zu verändern und das Verhalten zu verbessern  
Zeitersparnis mit einfach zu bedienenden Simcenter Testing Lösungen

In der Nähe der Vorderachs-Flansch



In der Nähe der Mittellager



Torsionsschwingung der vorderen Gelenkwelle

**“Die Lösung dieses Problems des Heulgeräuschs ist nur ein Beispiel dafür, wie Simcenter Testing Solutions von Siemens PLM Software VCE dabei hilft, seine Qualitätsverpflichtung zu erfüllen“.**

Reza Renderstedt, Team Leader, Testing NVH for loaders



### Branchenstandards übertreffen und die Marke Challenger stärken



**Konstruktion von stabilen Auslegerarmen**



**Eine ruhige Fahrt auf unebenem Gelände**

- **Optimierte Sprüher-Konstruktion für Stabilität und Produktivität**
- **Übertrifft die Industriestandards für den Variationskoeffizienten des Sprühverteilungsmusters**
- **Erheblicher Mehrwert für die Marke Challenger**

- Modellierung des Sprühsystems mittels Mehrkörpersimulation
- Einsatz von Vibrationstests und -analysen zur Validierung physikalischer Prototypen

**“Wenn wir eine Materialliste haben, die mit der Konstruktion des Produkts beginnt, können wir vergleichen und überprüfen, ob alle erforderlichen Informationen und Materialien vorhanden sind, ohne dass eine einzige Komponente fehlt”.**

Roberto Castrillo, Product Engineering Manager

# Herausforderungen im Bereich Geräusche und Vibrationen getrieben von Vorschriften und Kundenanforderungen

Vorschriften und Normen

NVH Engineering

**Außengeräusche**  
Richtlinie 2000/14/EC  
*Reduzierung der Umweltbelastung*



**Innengeräusche**  
Richtlinie 2003/10/EC  
*Schutz des Bedieners*



**Vibrationen**  
Richtlinie 2002/44/EC  
*Komfort des Bedieners*

Minimierung der Geräusch-  
und Vibrationsübertragung

**Hydrauliksystem**  
*Pumpe mit geringer Restwelligkeit und niedrigem Schallpegel*

**Kabinengeräusch**  
*Leise Kabine*

**Kühlsystem**  
*Geräuscharmer Lüfter*

**Getriebe/Achsen**  
*Zahnradqualität und Gehäusedesign*

**Motor**  
*Niedrige Schall- und Vibrationspegel*

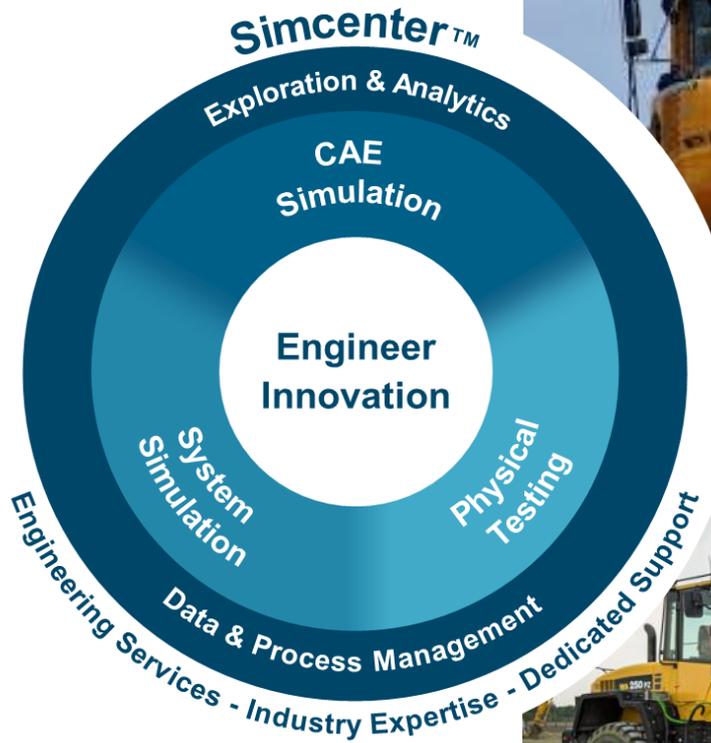


**Reifen**  
*Niedrige Vibrationspegel*

# Simcenter™ Portfolio

## Noise & Vibration Engineering

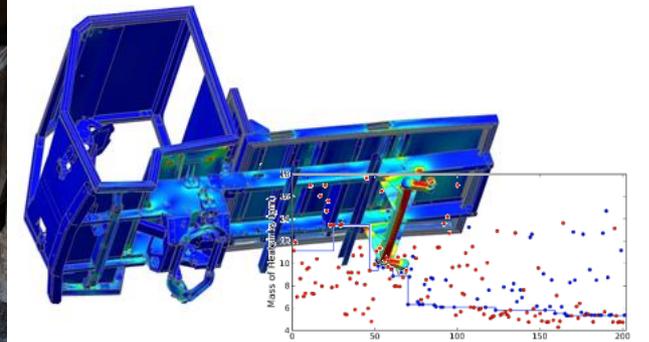
**SIEMENS**  
Ingenuity for life



**Hardware**

**Software**

**Services**



# Die neue Ära der Geräusch- und Vibrationstechnik

## Herausragende NVH-Leistung in kürzerer Zeit liefern

**SIEMENS**  
*Ingenuity for life*

### HERAUSFORDERUNGEN

- Strenge Vorschriften für Geräuschemissionen und Wohlbefinden der Fahrer
- Zunehmende Maschinenkomplexität und –vielfalt
- NVH-Leistung als Marktunterscheidungsmerkmal

### LÖSUNGEN

- Effiziente Testlösungen für eine schnellere Zertifizierung und Fehlerbehebung
- Einsatz universell einsetzbarer NVH-Analysemethoden vom Konzept bis zur Validierung
- Virtuelles Prototyping und intelligente Kombination mit Test - Entwurfsuntersuchung

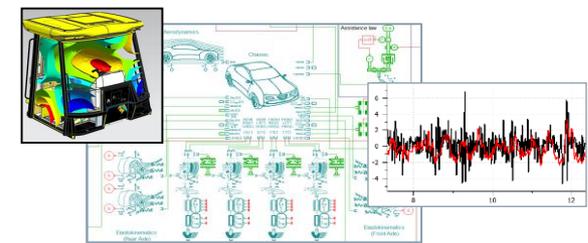
#### Effiziente Zertifizierung



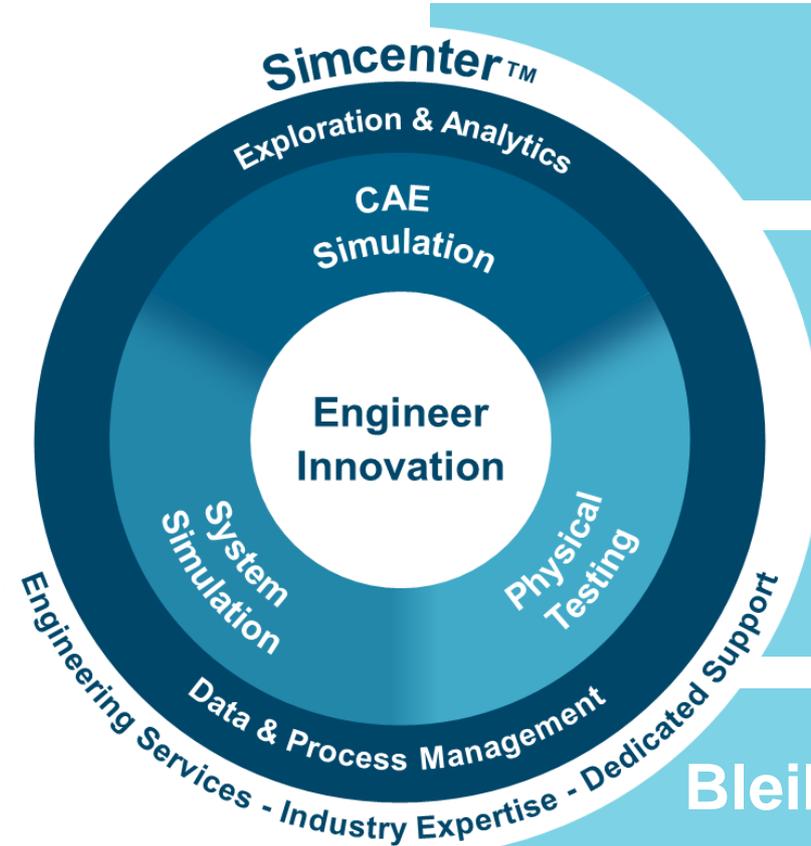
#### Source-Transfer-Receiver



#### Virtueller Prototypenbau



Erfahren Sie, wie Simcenter Ihnen helfen kann, Designs zu optimieren und Innovationen schneller und mit mehr Sicherheit zu liefern.



Lesen Sie mehr auf unserer Website



Werden Sie Teil unserer Community



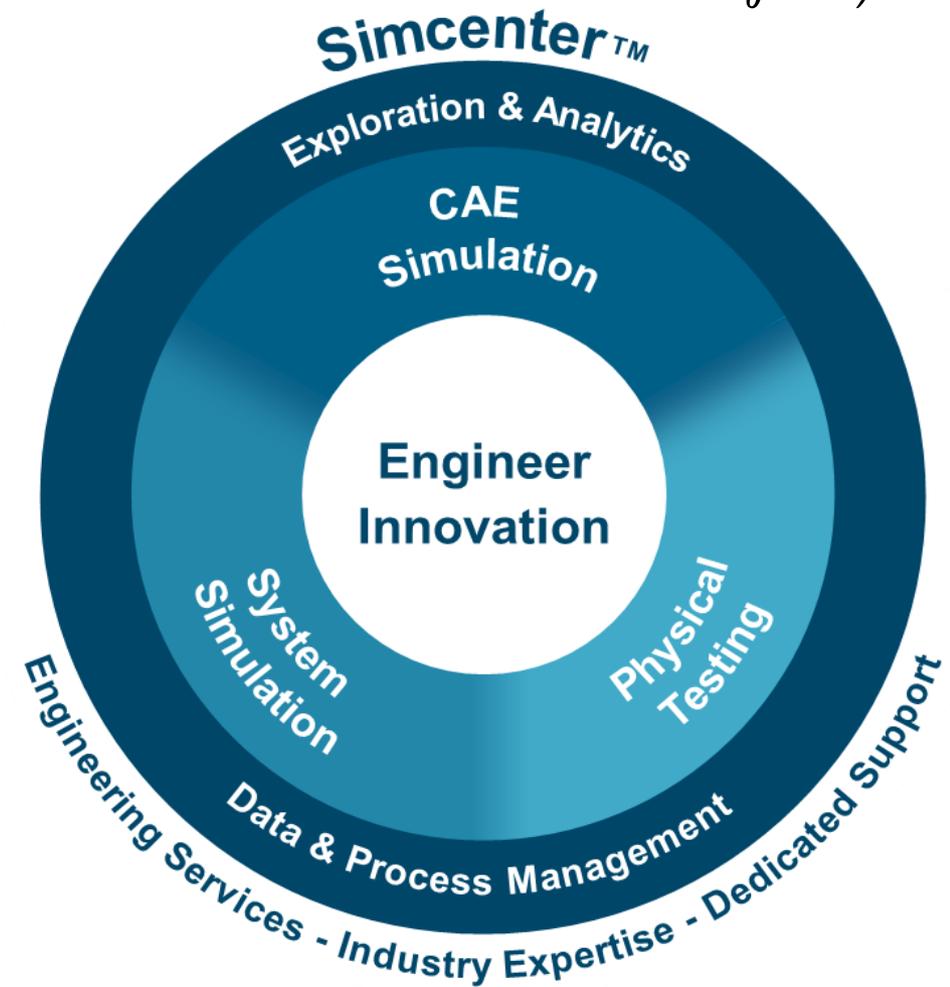
Folgen Sie uns auf YouTube



Bleiben Sie auf dem Laufenden über LinkedIn



# Fragen & Antworten



[www.siemens.com/plm/simcenter](http://www.siemens.com/plm/simcenter)

[www.siemens.com/plm/community/simcenter](http://www.siemens.com/plm/community/simcenter)

# Kontaktinformationen



Daniel Hermyt  
Portfolio Development Heavy Industries

Siemens Industry Software GmbH  
Franz-Geuer-Straße 10  
50823 Köln, Germany  
Mobile :+49 (172) 4343927  
[daniel.hermyt@siemens.com](mailto:daniel.hermyt@siemens.com)