

Der virtuelle Zug – Zusammenwirken von Mehrkörperdynamik, Schwingungstechnik und Akustik bei der Simulation von Schienenfahrzeugen

IMR & Cm Kolloquium SoSe 2015
SAMT 2020 - Sanfte Mobilität

Prof. Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt

Universität Siegen, 2. Juni 2015

1. Der virtuelle Zug an der Professur Dynamik und Mechanismentechnik
2. Simulation im Entwicklungsprozess
3. MKS und FEM
4. Simulation im Entwicklungsprozess:
Anwendungsbeispiele

-
1. Der virtuelle Zug an der Professur Dynamik und Mechanismentechnik
 2. Simulation im Entwicklungsprozess
 3. MKS und FEM
 4. Simulation im Entwicklungsprozess:
Anwendungsbeispiele



Diplom und Dr. Maschinenwesen in München
Schwerpunkt auf Mechanik (Prof. Pfeiffer)



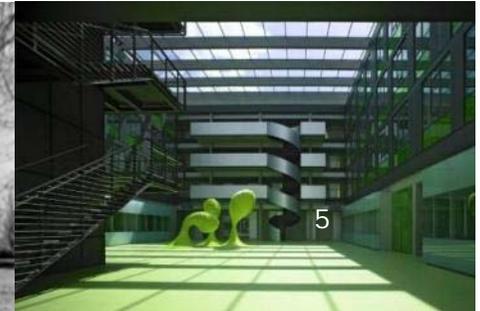
6 ½ Jahre Sulzer Innotec in Winterthur (Schweiz),
Leiter der Fachgruppe „Mechanische Systeme“



seit 2005 Professor an der TU Dresden
„Fahrzeugmodellierung und -simulation“

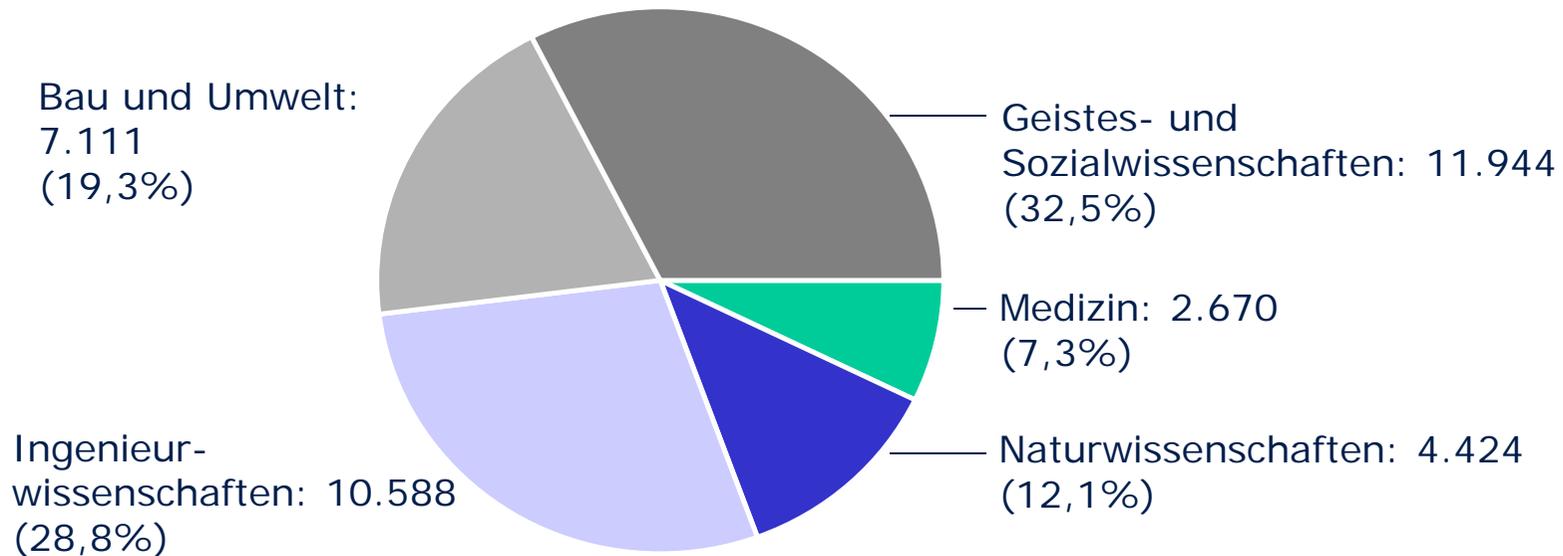
2010: Fusion mit der „Professur Maschinendynamik“ zur
„Professur für Dynamik und Mechanismentechnik“

- 1828 Gründung der Technischen Bildungsanstalt in Dresden
- 1890 Königlich Sächsische Technische Hochschule (TH)
- 1945 Fast vollständig zerstört
- 1946 Wiedereröffnung der Technische Hochschule (TH)
- 1961 Technische Universität (TU) Dresden
- 1990 Konstituierung von Fakultäten, Gesamtuniversität
- 2012 Titel der Exzellenzuniversität



- Eine der fünf größten Universitäten Deutschlands
- 4 Wissenschaftsgebiete | 14 Fakultäten, in 5 Bereichen organisiert
- Studierende: 36.737 (2014/2015)
davon Erstsemester: 9.055 (2014/2015)
- Studienfächer: 126
- Beschäftigte: 7.768
davon Drittmittelbeschäftigte: 3.436
- Drittmittelfinanzierung: 259,8 Millionen Euro (2013),
Gesamtetat: ca. 520 Millionen Euro (2013)

Studierende nach Wissenschaftsgebieten im WS 2014/15



Gesamtzahl 36.737

Stichtag: 1. Dezember 2014

Institut für Festkörpermechanik

**Professur für Nichtlineare
Festkörpermechanik**

**Professur für Dynamik und
Mechanismentechnik**

**Professur für Mechanik
multifunktionaler Strukturen**

**Arbeitsgruppe
Betriebsfestigkeit**

Professur für Dynamik und Mechanismentechnik

Mehrkörperdynamik
Fahrzeugdynamik
Modellreduktionsverfahren

Schwingungsanalyse an
Maschinen und Bauwerken

Akustik
Schwingungen und NVH
Simulation des Gehörs

Energetische Optimierung
von Fahrzeugen und Maschinen

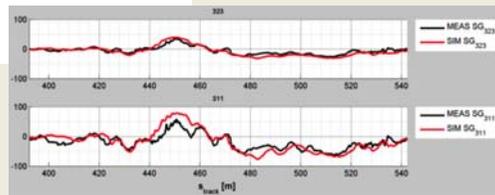
Thermomechanik und
Thermoelektrik

Getriebelehre und
Robotertechnik

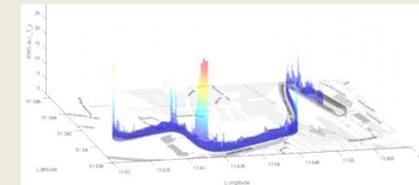
**Ziele: Spitzenforschung, Ansprechpartner und Ausbilder im
Fachbereich der Dynamik und Mechanismentechnik**



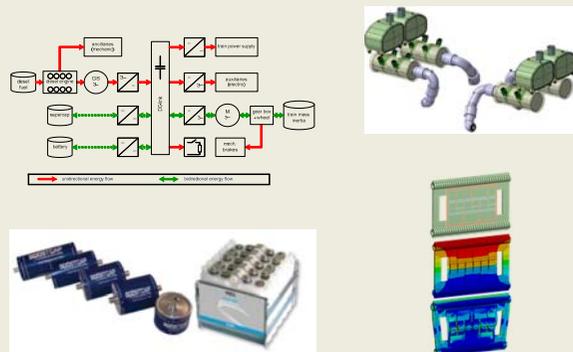
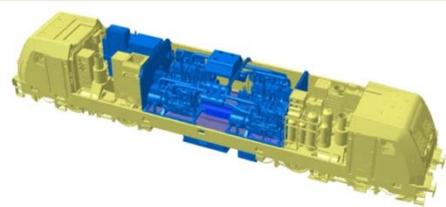
LRV-Simulation



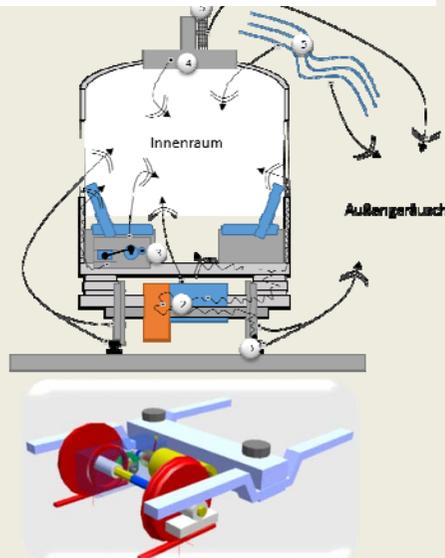
Messstraßenbahn



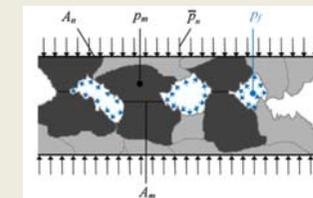
Energieeffizientes Fahren



NVH im Fahrzeugantriebsstrang



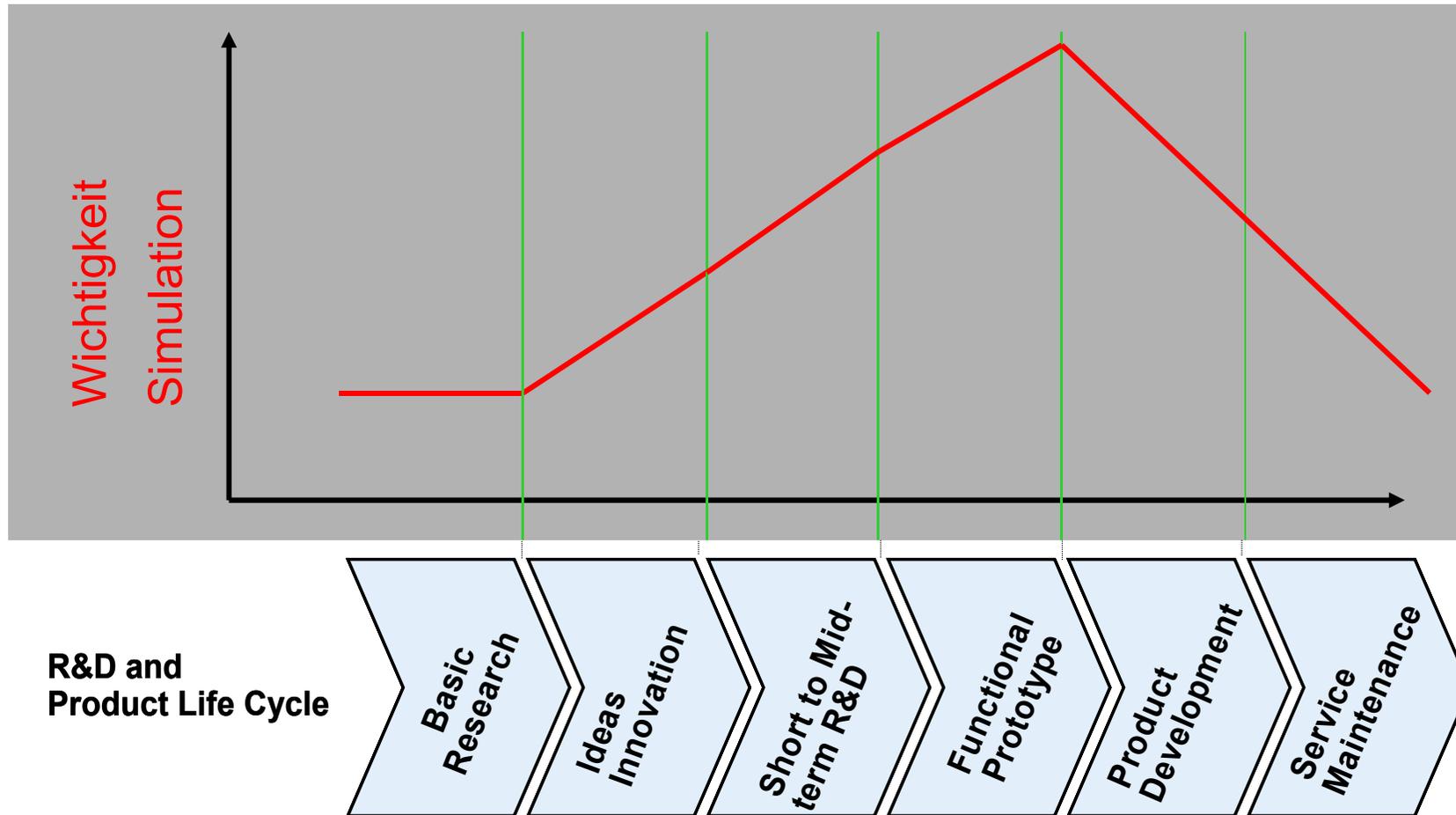
iceWEAR Radverschleiss



-
1. Der virtuelle Zug an der Professur Dynamik und Mechanismentechnik
 2. Simulation im Entwicklungsprozess
 3. MKS und FEM
 4. Simulation im Entwicklungsprozess:
Anwendungsbeispiele

Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.

simulare (lat.): vortäuschen



- Simulation des Lauf- und Schwingungsverhaltens
(Fahrsicherheit, Komfort, NVH, Lichtraum)
 - Antriebsstrang-/Längsdynamik-Simulation
 - Simulation des Antriebs (Verbrennungsprozesse, Hybrid-Simulation,
Kolbenmaschinendynamik)
 - Simulation von Fahrzyklen (Verbrauch, Emissionen)
- Crash-Simulationen
 - Festigkeitsberechnungen
 - Akustiksimulation (Innenraumakustik, Geräuschemission)
- Aerodynamik-Simulation
 - ...

MKS

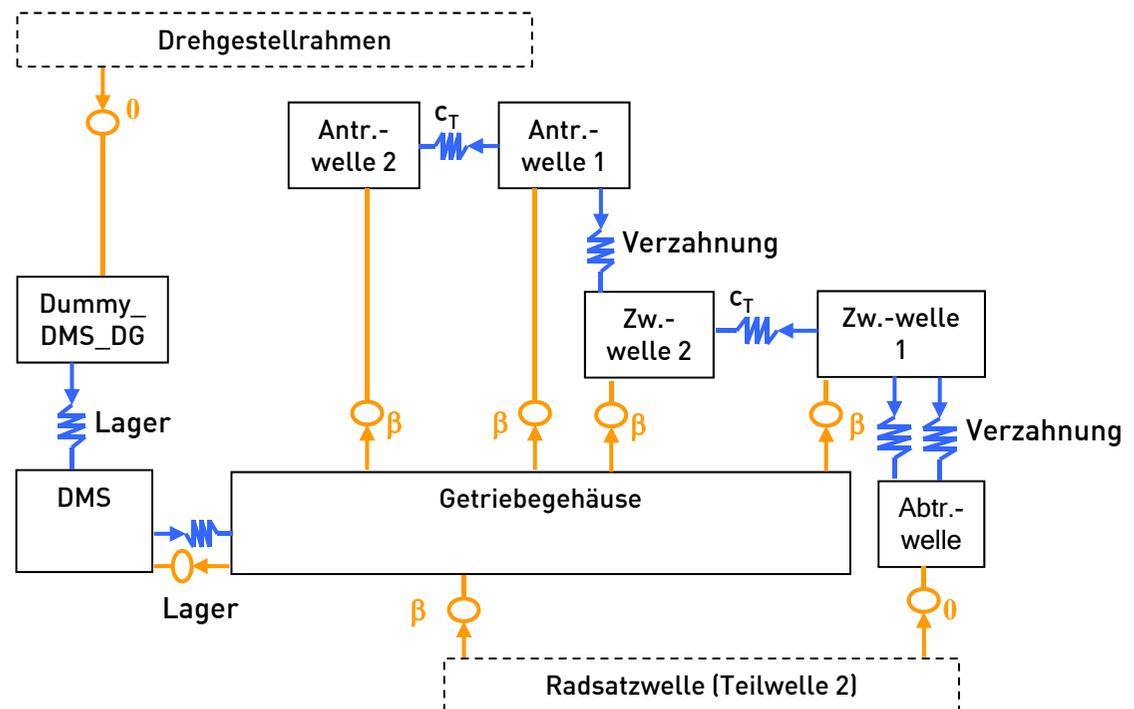
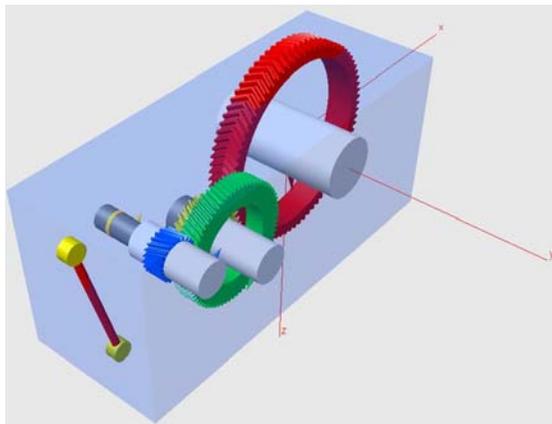
FEM

CFD

1. Der virtuelle Zug an der Professur Dynamik und Mechanismentechnik
2. Simulation im Entwicklungsprozess
3. MKS und FEM
4. Simulation im Entwicklungsprozess:
Anwendungsbeispiele

Unter einem Mehrkörpersystem (MKS) versteht man

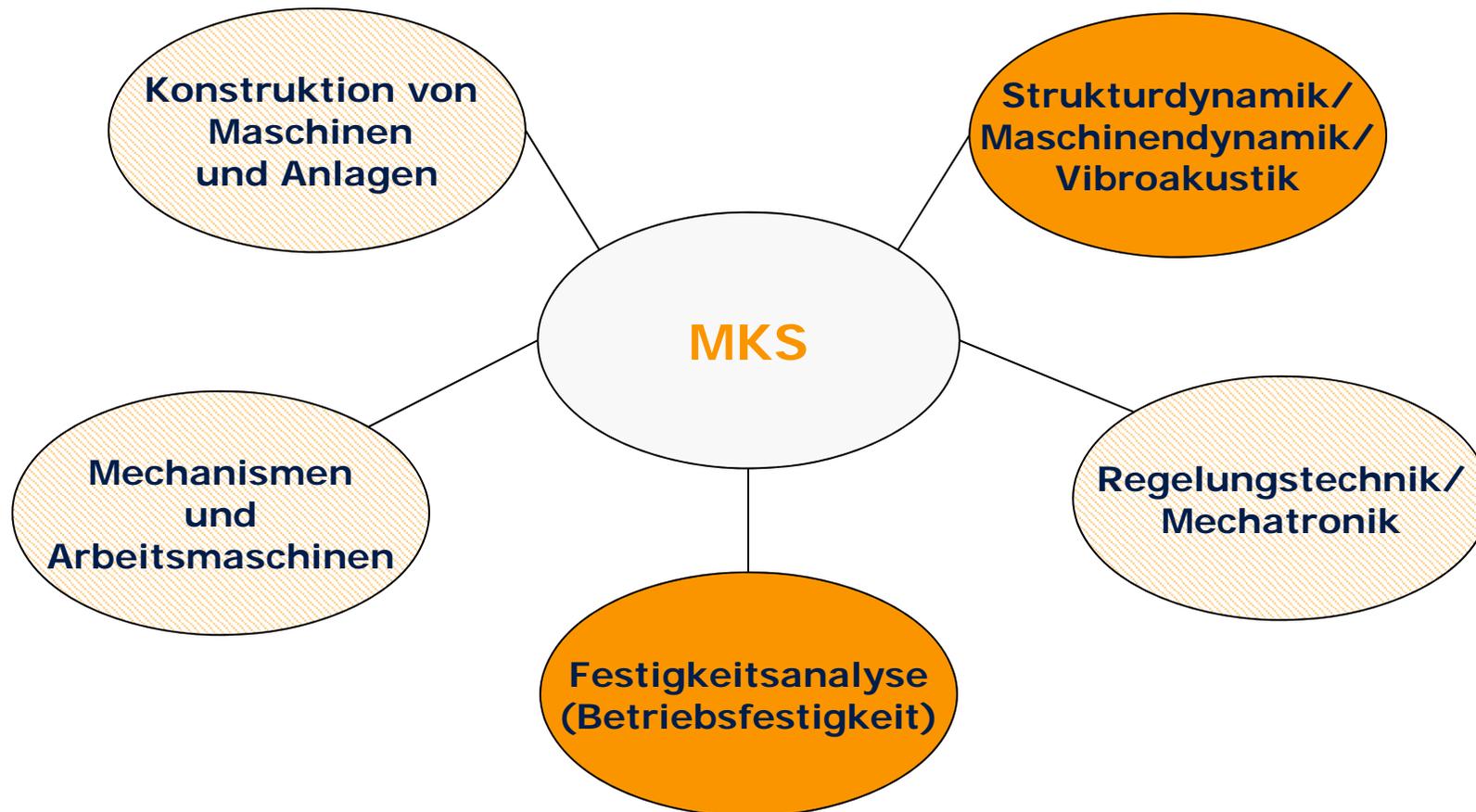
- eine endliche Anzahl starrer, d.h. nicht deformierbarer Körper,
- die untereinander durch kinematische Bindungen (Gelenke) und
- Kraftkopplungen in Wechselwirkung stehen.



Anwendungsgebiete für Mehrkörpersysteme (MKS)

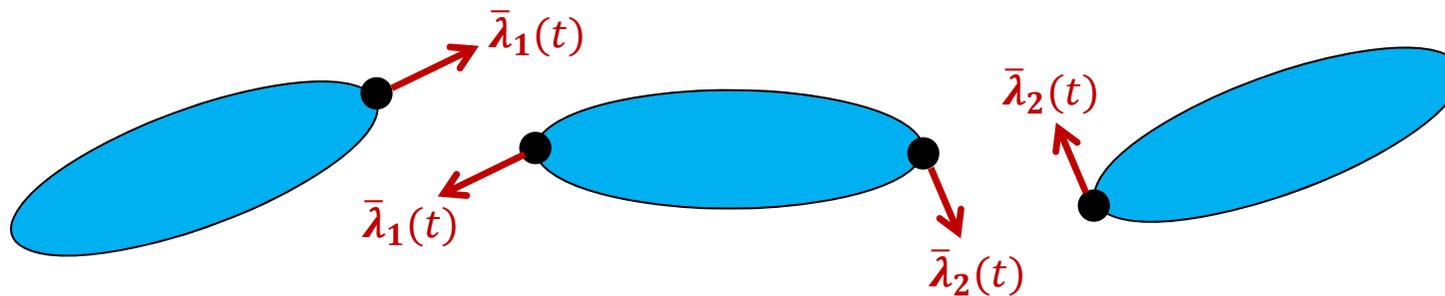


Anwendungsgebiete für **elastische** Mehrkörpersysteme (EMKS)



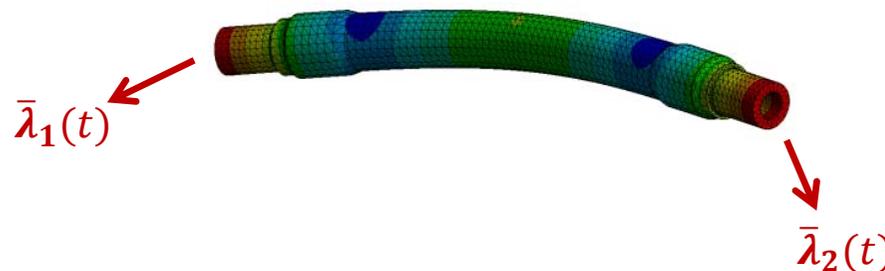
MKS / Systemdynamik

liefert Bewegungen und
dynamische Gelenkkräfte (**Bauteilbelastung / Lastkollektive**)



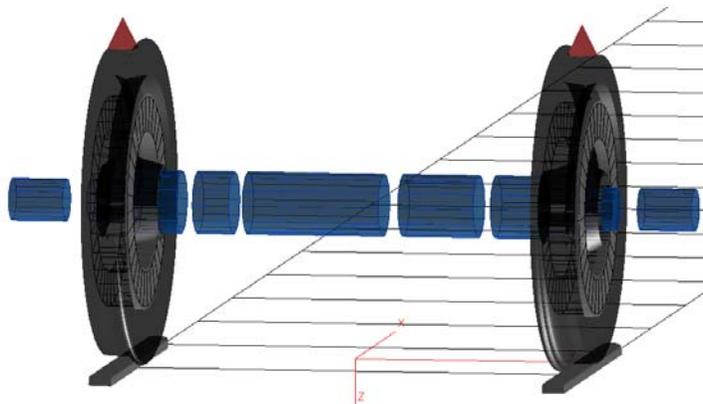
FEM / Festigkeitsanalyse

liefert Spannungen (**Bauteilbeanspruchung**) aus Bauteilbelastungen

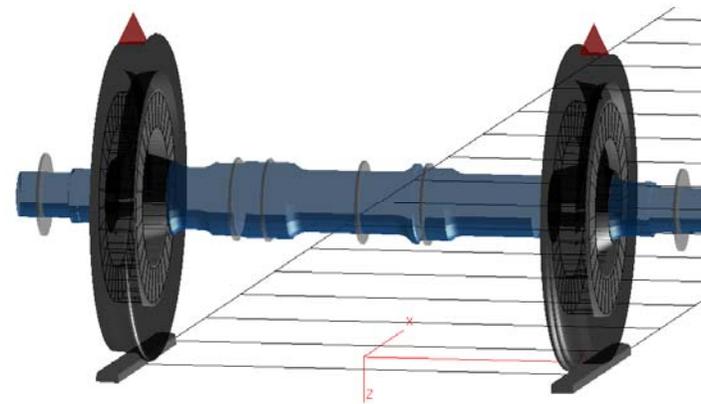


Elastische Radsatzwelle

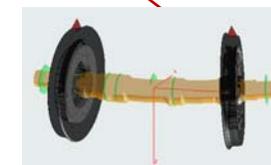
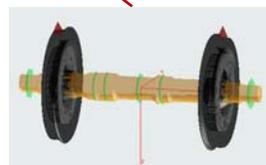
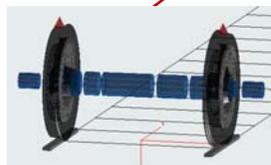
torsionselastisch
(Torsionsschwinger)



vollelastische FE-Struktur
(elastische Welle)

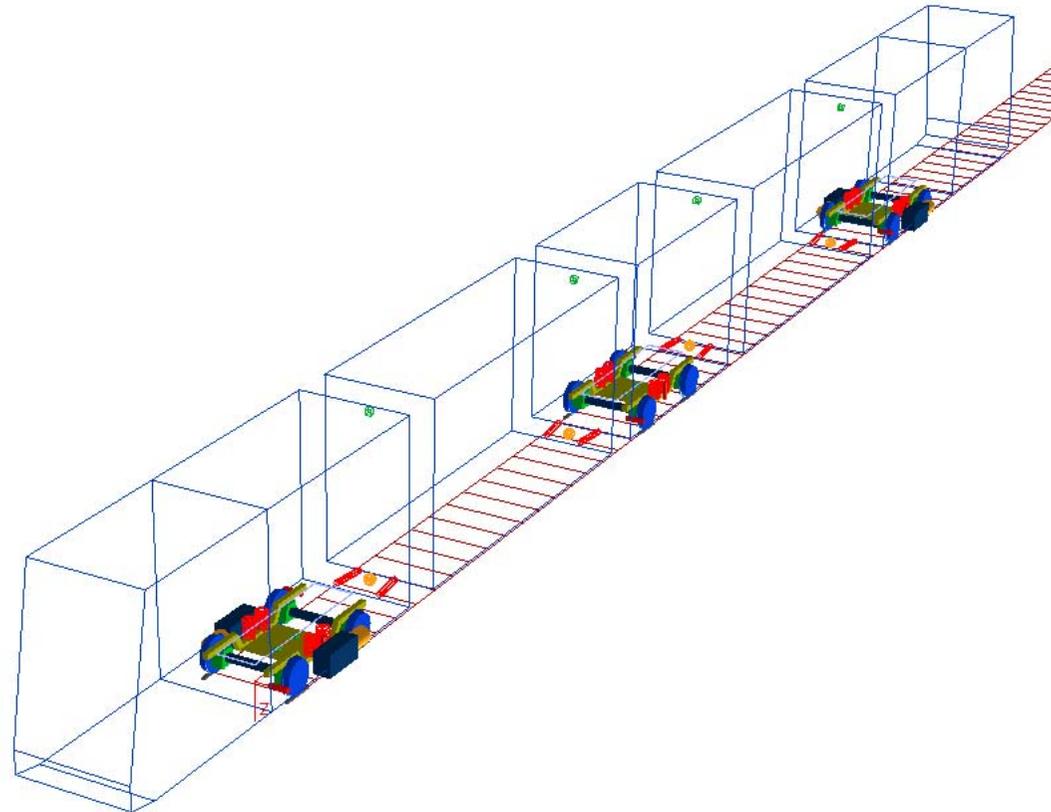


Torsionsschwinger	88	1204	2286	2519	2519	-	-	6824
elastische Welle	85	1130	1998	2923	2930	3827	4742	-



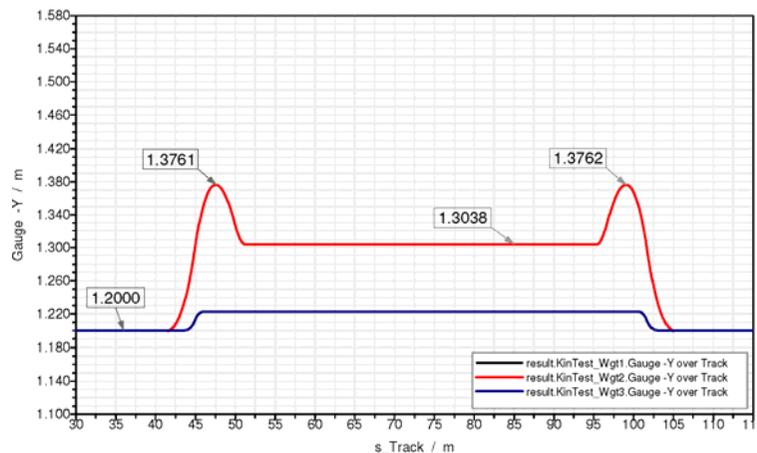
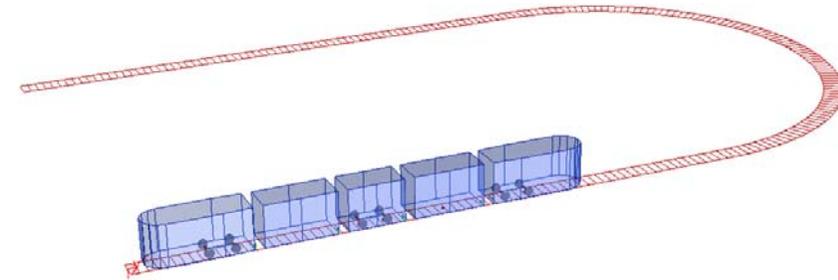
1. Der virtuelle Zug an der Professur Dynamik und Mechanismentechnik
2. Simulation im Entwicklungsprozess
3. MKS und FEM
4. Simulation im Entwicklungsprozess:
Anwendungsbeispiele

Lichtraum bei Straßenbahnen

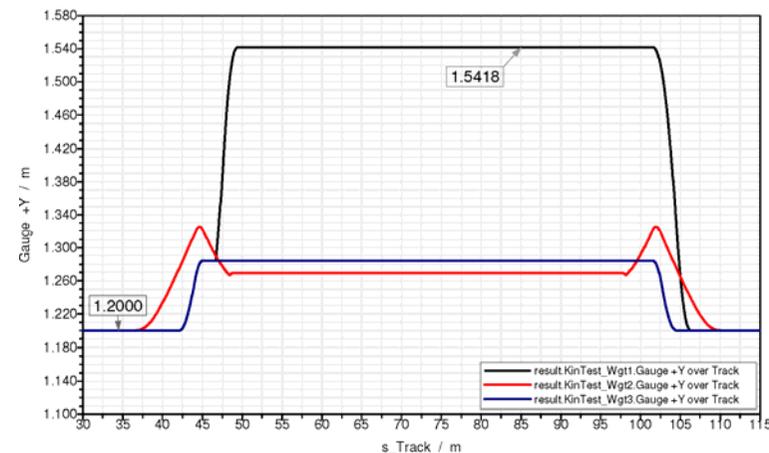


MKS-Modell einer einer Niederflurstraßenbahn

- MKS-Kinematikmodell in Fahrtrichtung
- Darstellung des Größtabstandes von der Gleismittellinie für die ersten drei Wagen
- Es kann leicht ausgewertet werden
 - welcher Wagen den größten Lichtraumbedarf hat
 - in welchem Fahrwegquerschnitt der größte Lichtraumbedarf besteht



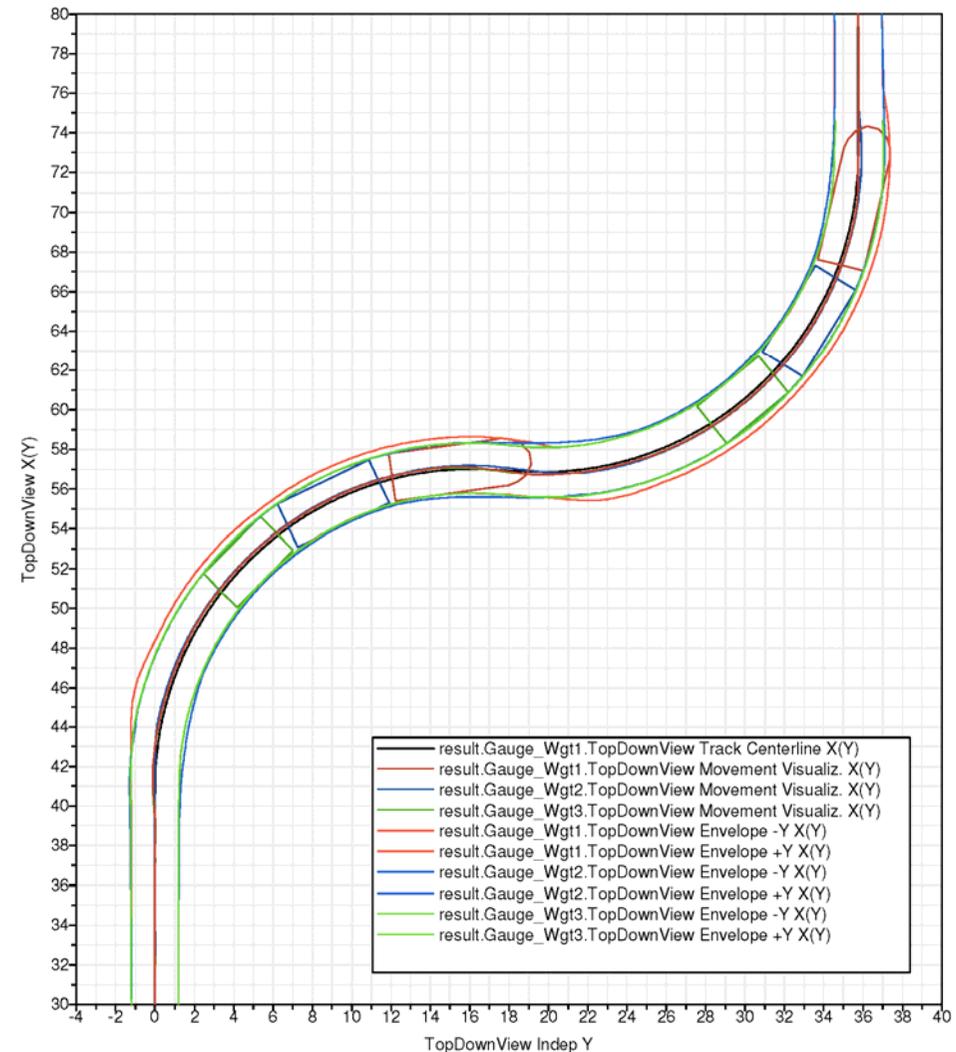
links



rechts

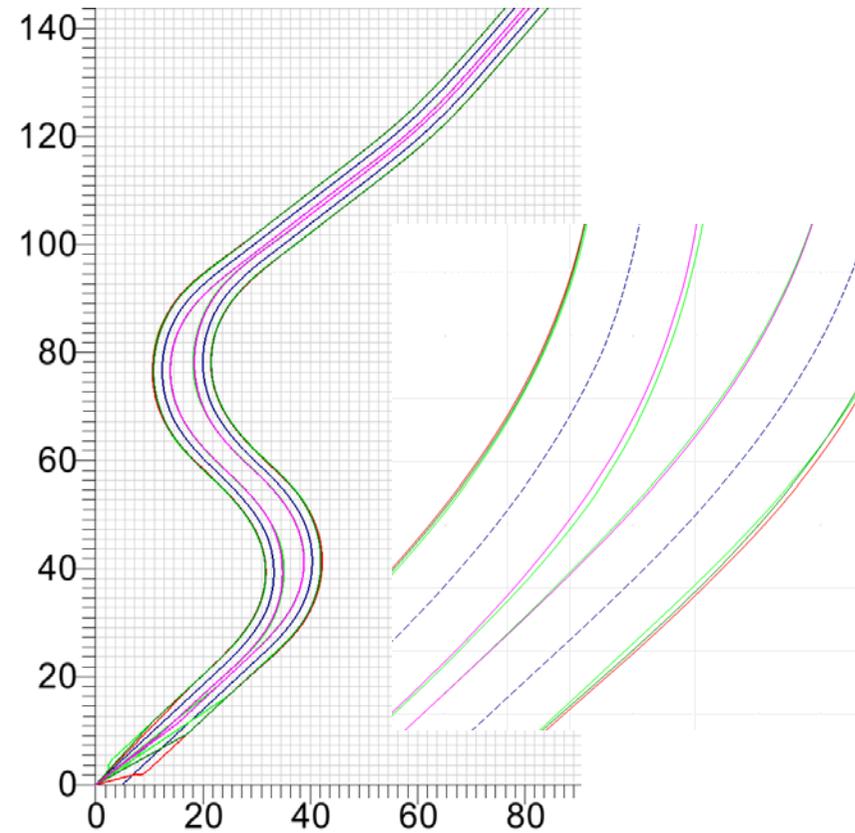
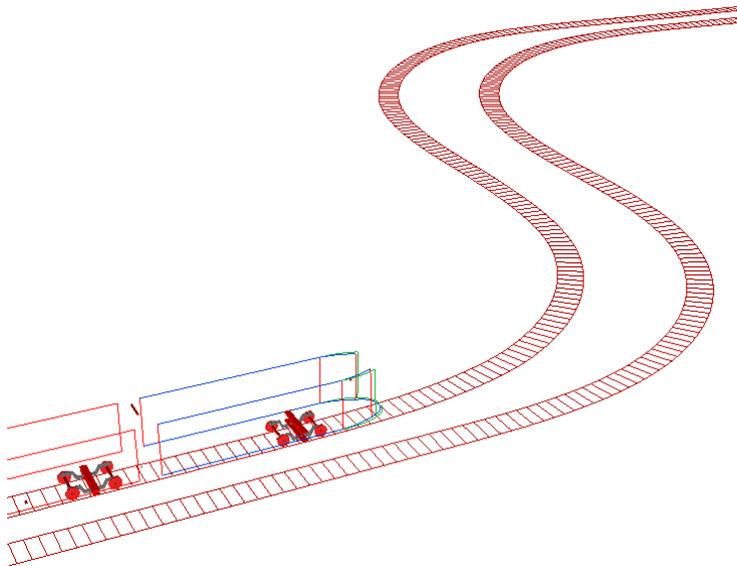
Draufsicht

- Darstellung der Konturlinien der Wagenkästen
- Im Bild rechts sind die Konturlinien dreier Wagenkästen zu drei Zeitpunkten dargestellt
- Aus den Konturlinien kann die dynamische Einhüllende abgeleitet werden.



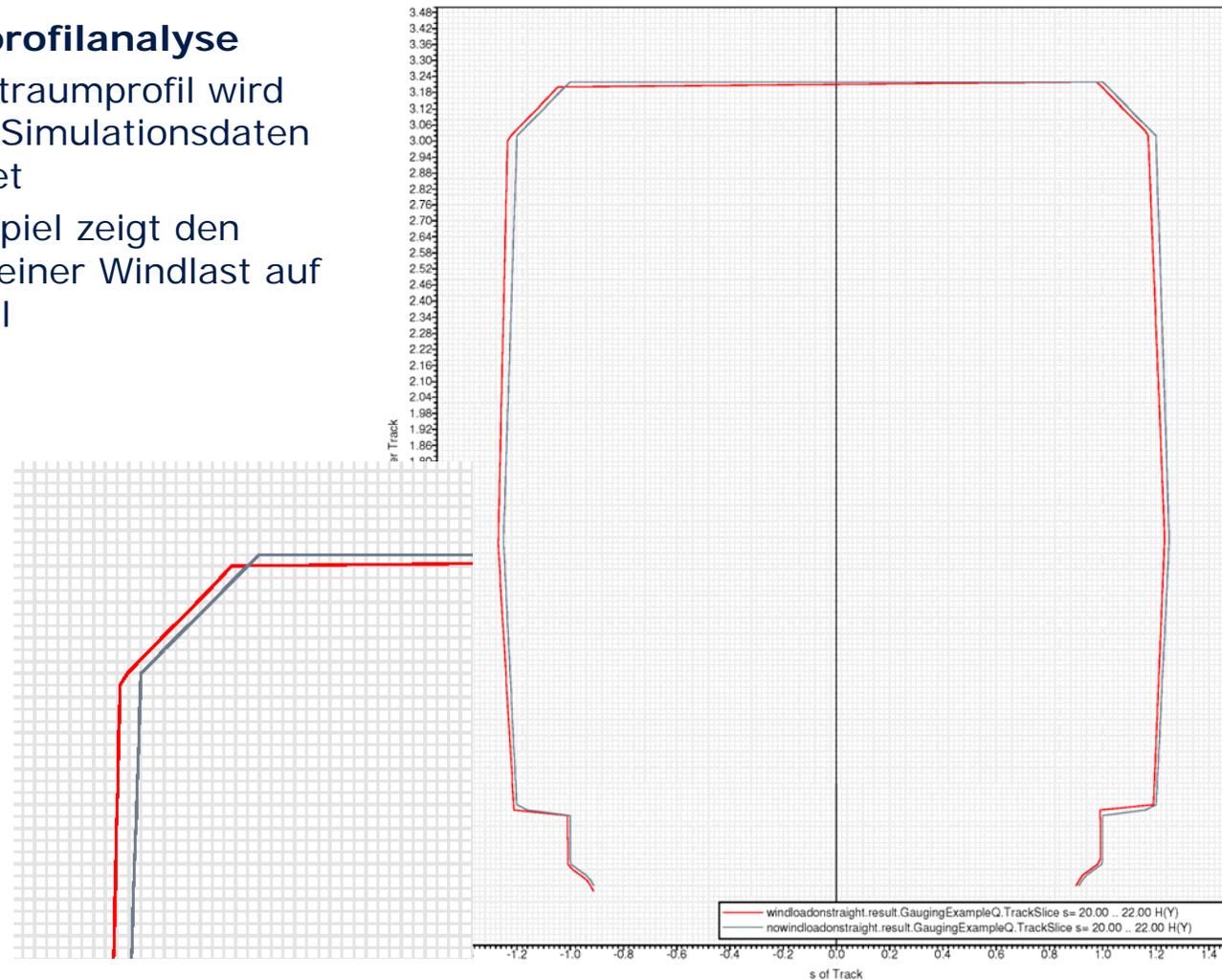
Analyse von Begegnungen auf zweigleisigen Strecken

- Darstellung der dynamischen Einhüllenden
- Sichtbarmachung von Kollisionsrisiken

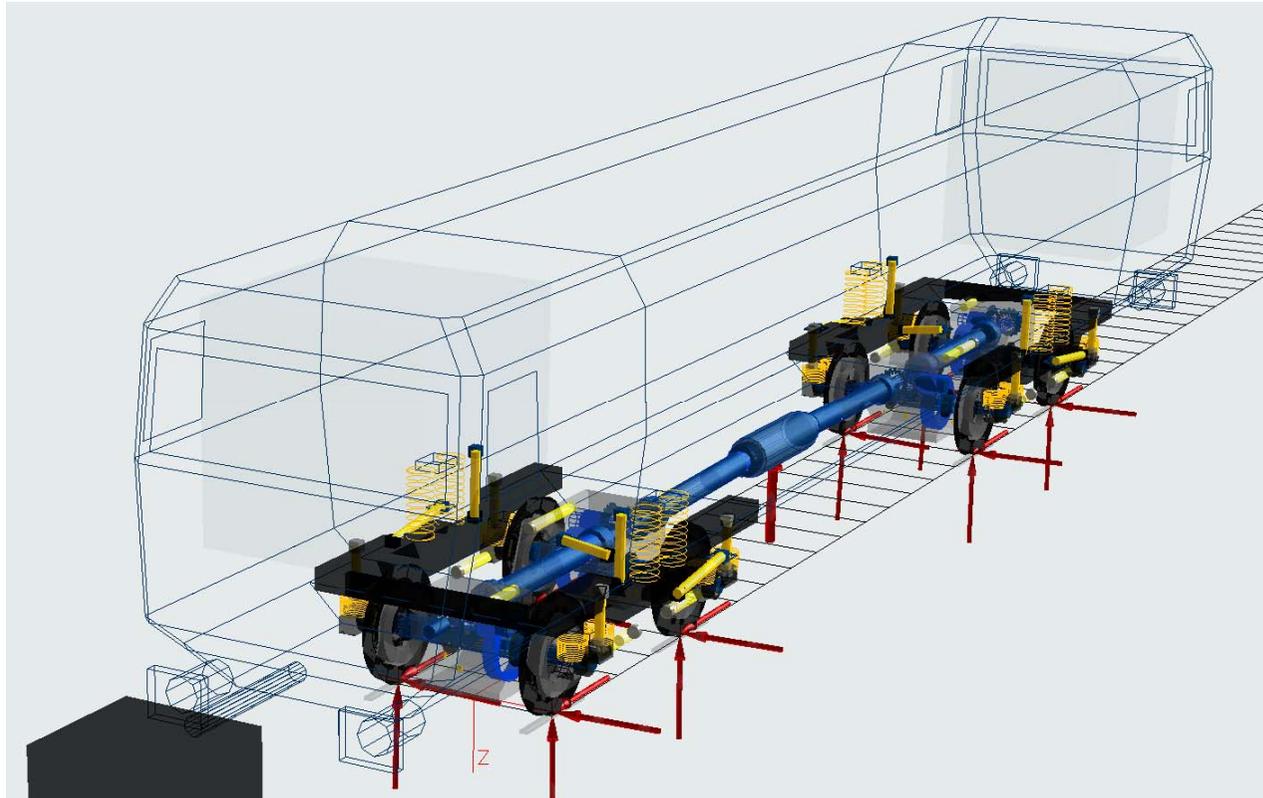


Lichtraumprofilanalyse

- Das Lichtraumprofil wird aus den Simulationsdaten abgeleitet
- Das Beispiel zeigt den Einfluss einer Windlast auf das Profil

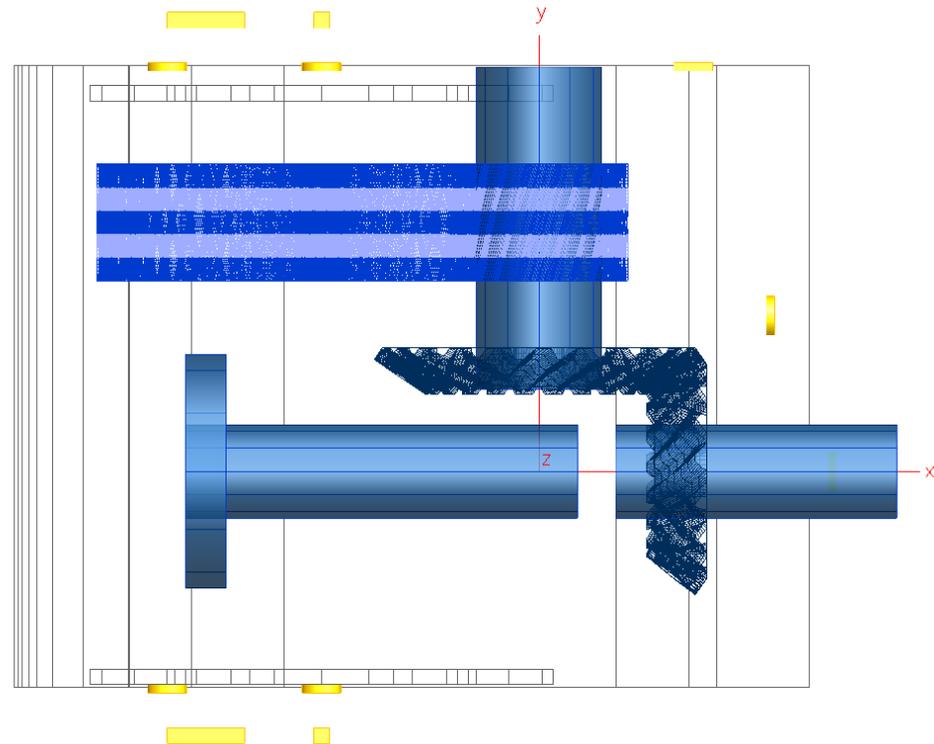
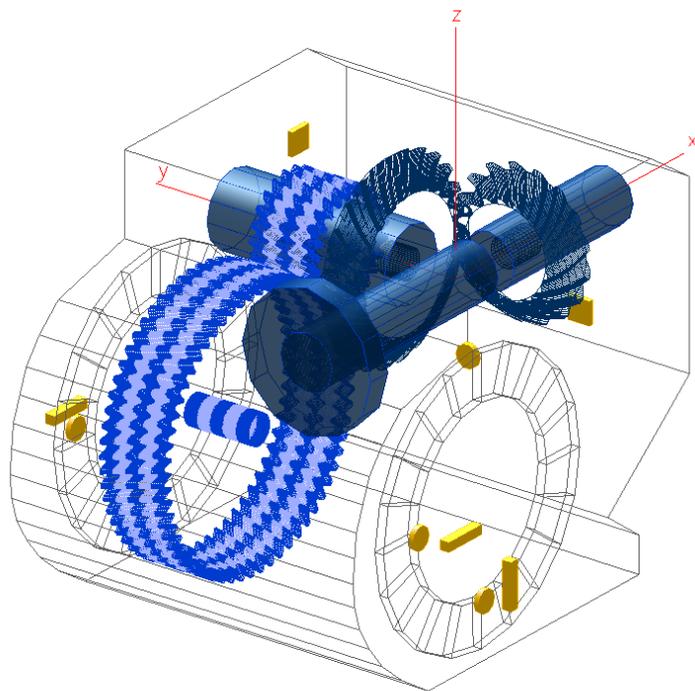


Antriebsstrang-/Längsdynamik-Simulation



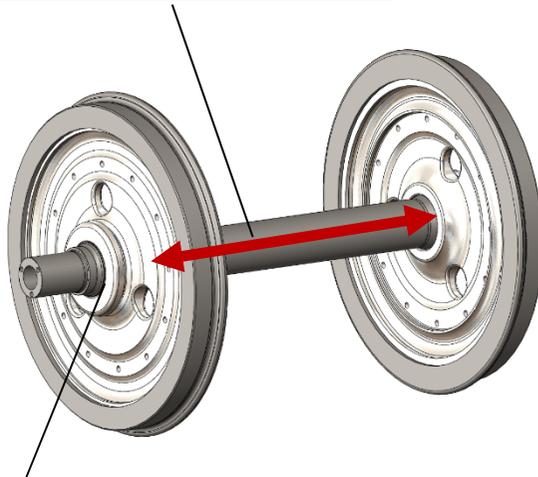
MKS-Modell einer vierachsigen Diesellokomotive mit detailliertem Antriebsstrangmodell

Modellbildung des Achsgetriebes



Beobachtung:

Spurmaßveränderung bei Lokomotiven verschiedener Baureihen

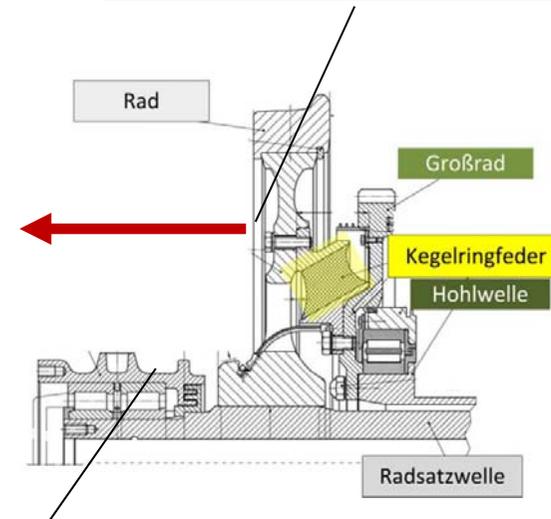


Tatsache:

Der Presssitz ist nach DIN 7190 für extreme *statische Lasten* ausgelegt

Hypothese:

Axiale Verschiebung des Rades über vorgespannte Kegelringfeder

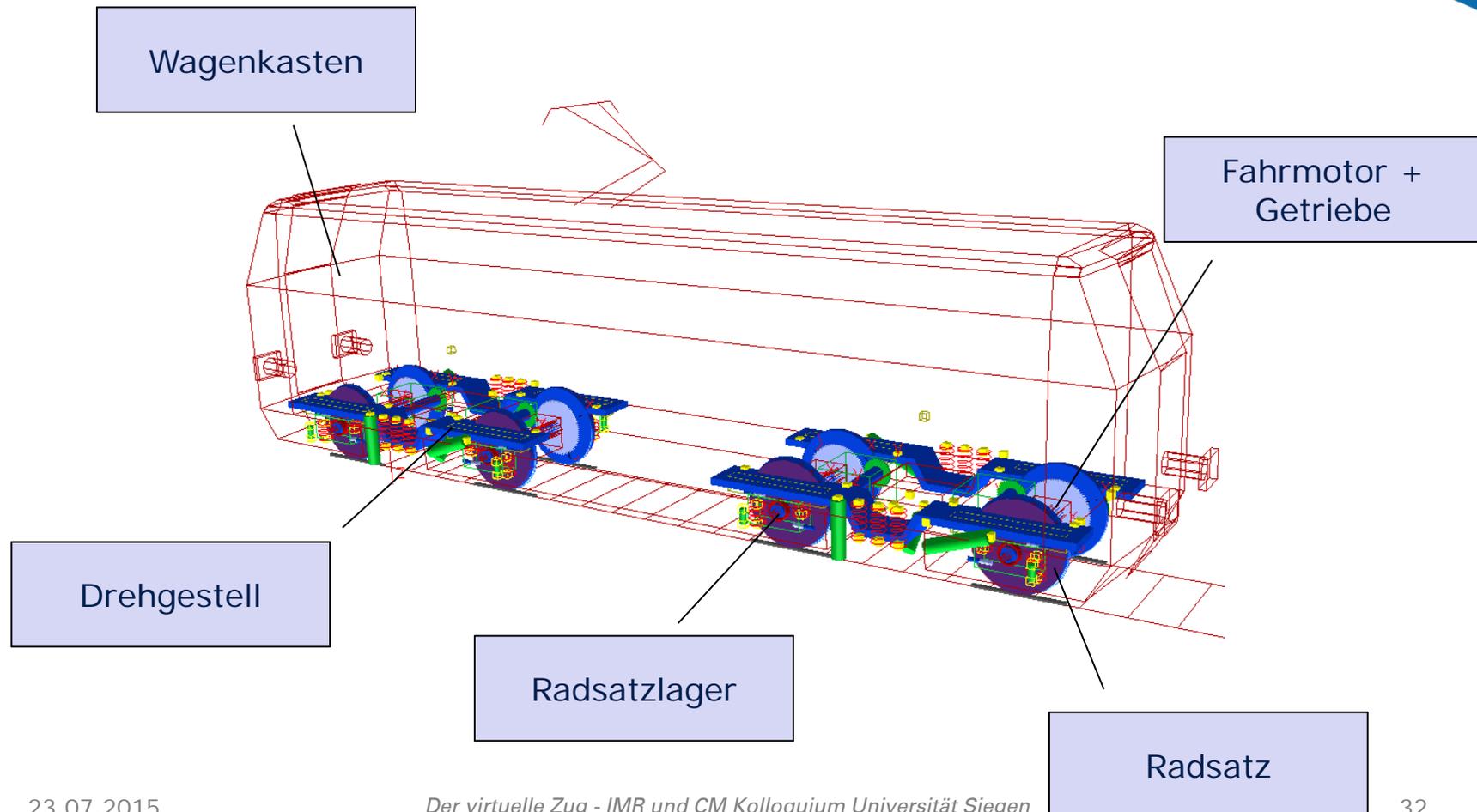


Hypothese:

Kurzzeitiges Versagen des Presssitzes Rad/Radsatzwelle aufgrund *dynamischer Rollierschwingungen*

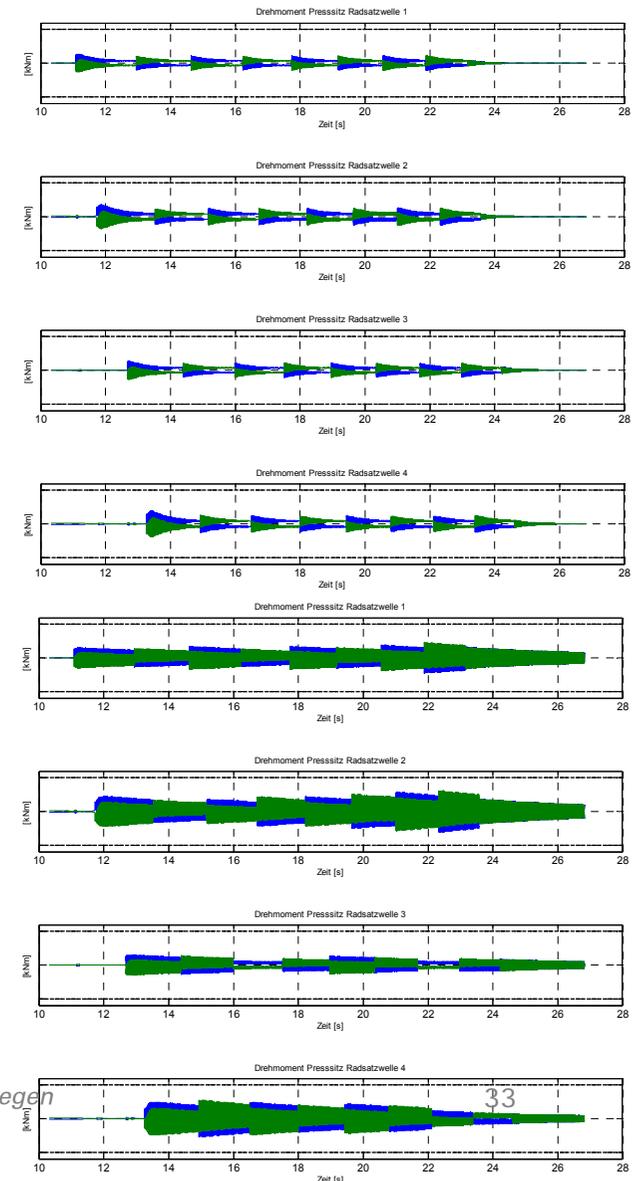
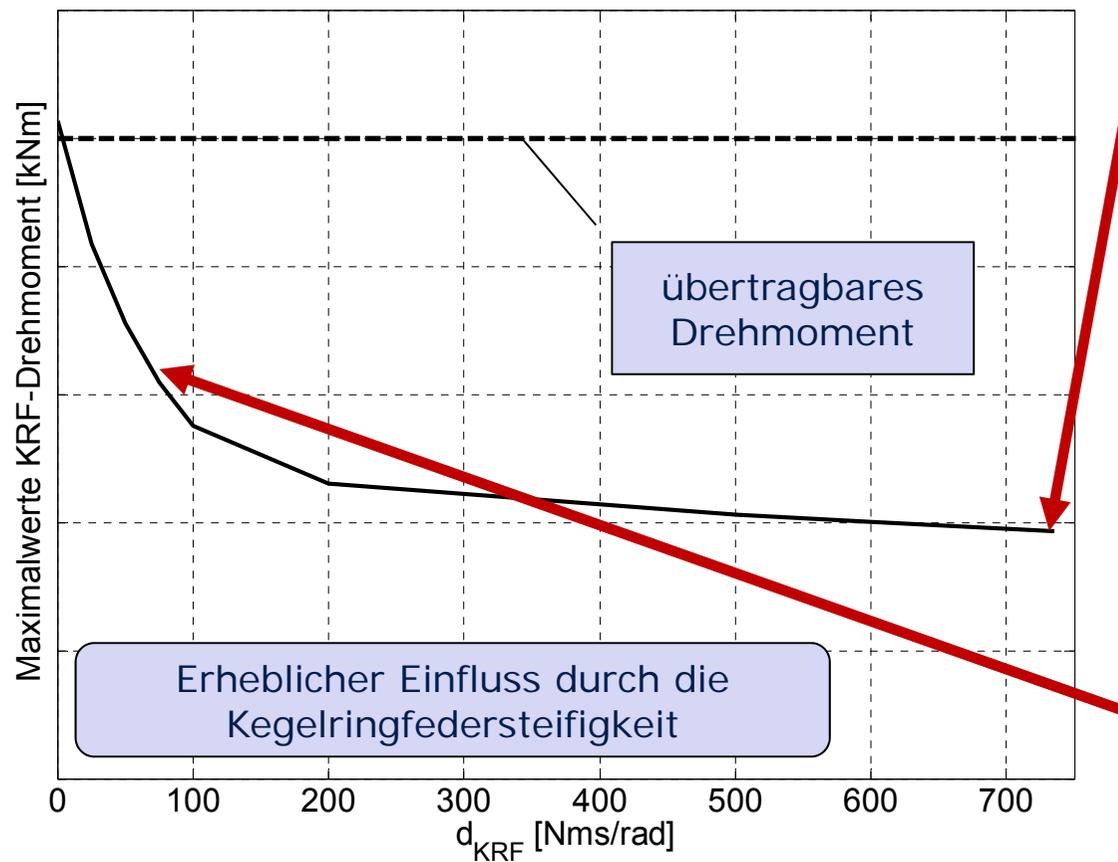
Tatsache: Auf die Laufleistung bezogen ein extrem seltenes Phänomen.

MKS-Modell in Substrukturtechnik

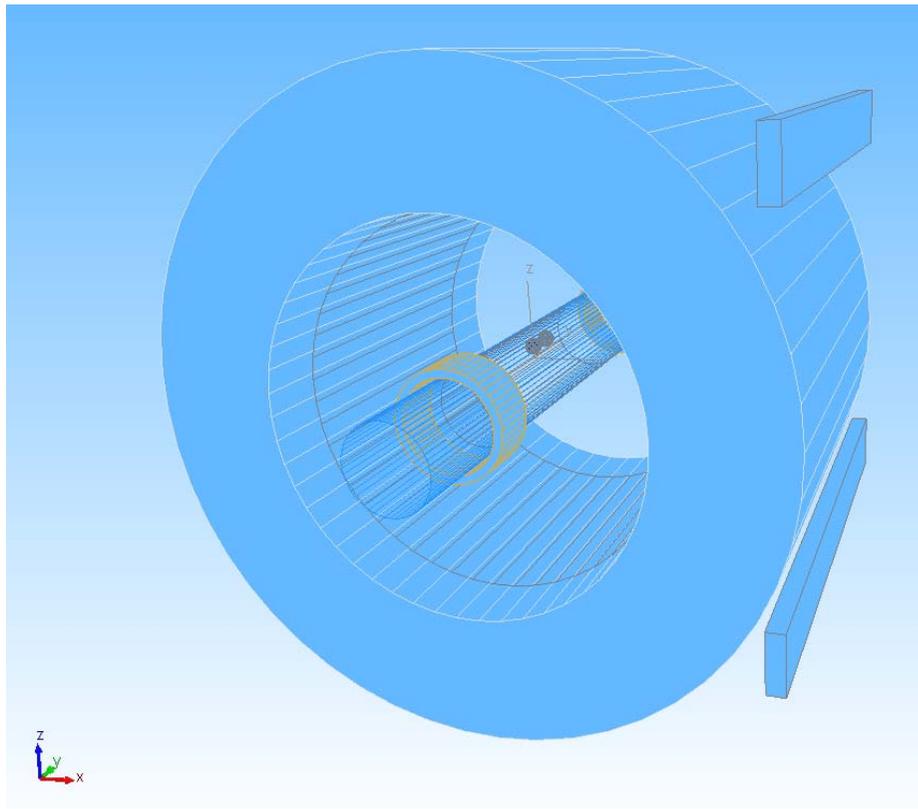


Einfluss der Kegelingfederdämpfung

Anfahrvorgang Gerade, Variation d_{KRF} , μ_{07}

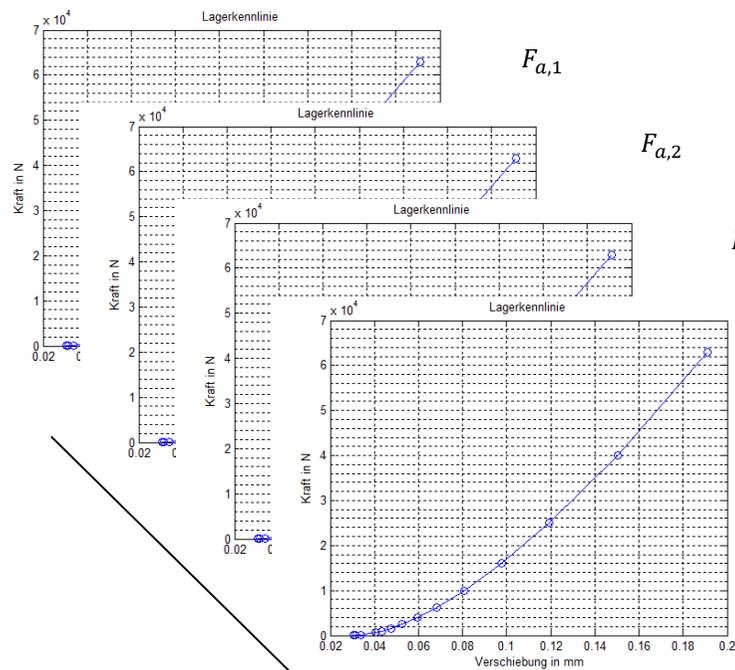


MKS-Modell des Antriebmotors eines Triebzugs

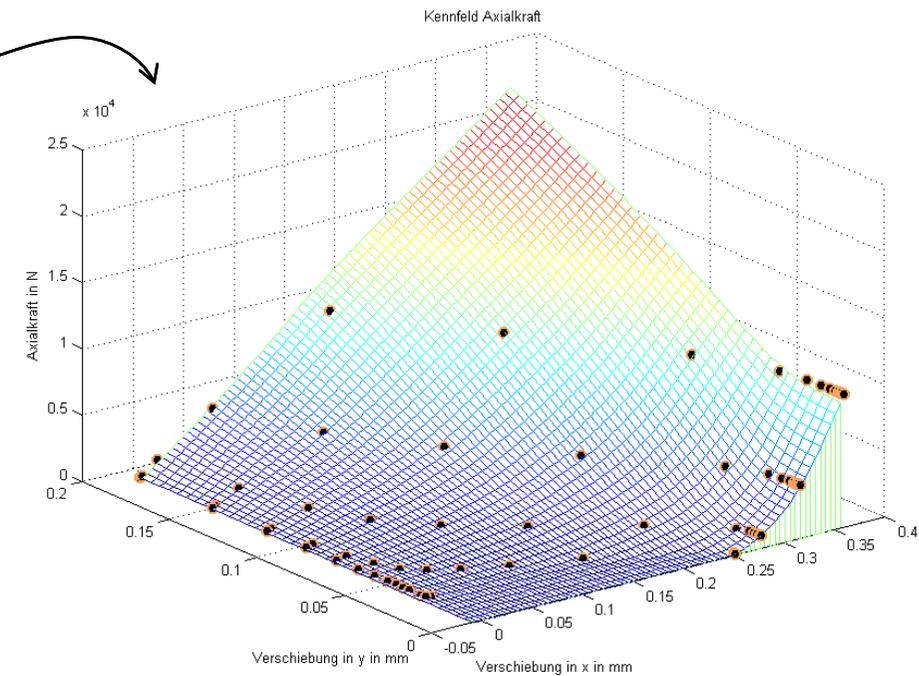


- Untersuchung des Einflusses von Restunwucht und Lagerspiel auf die Rotordynamik

Wälzlagermodellierung

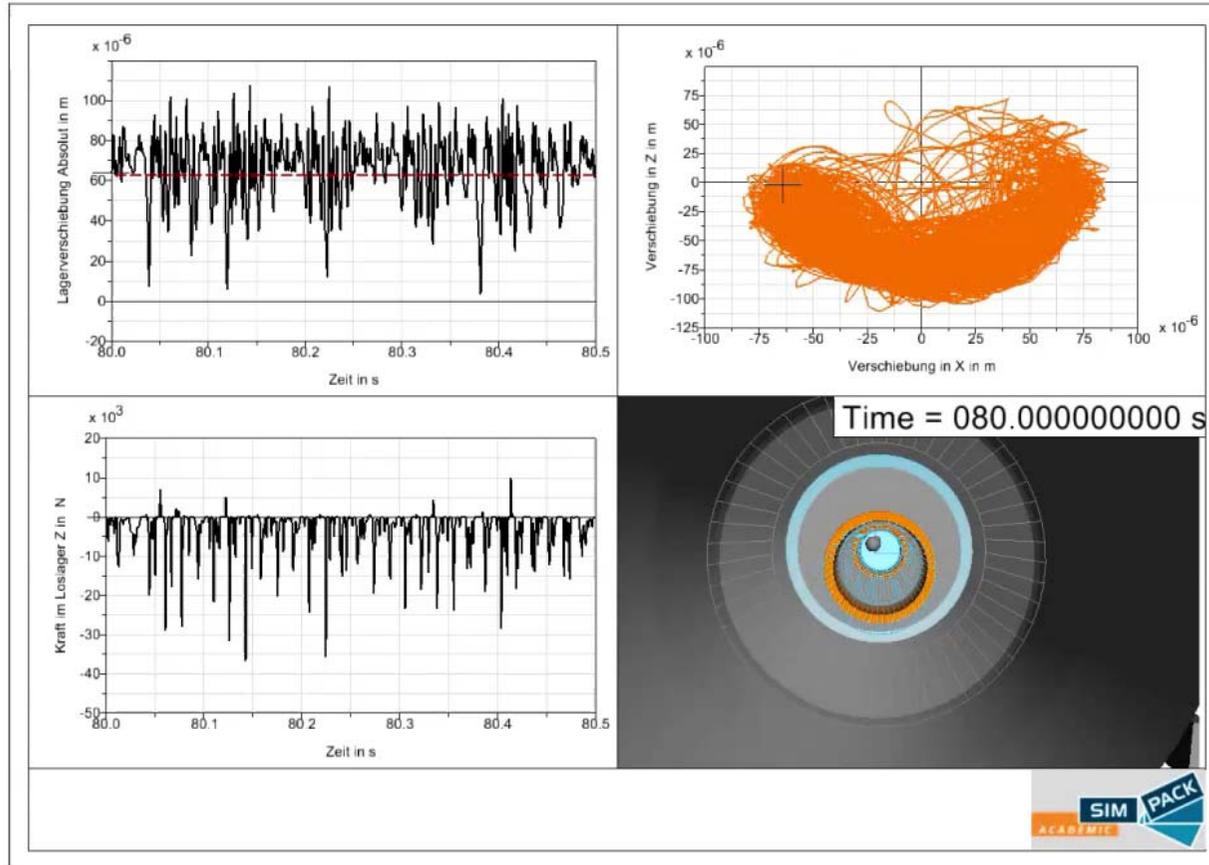


Kennlinien mit steigender Axiallast

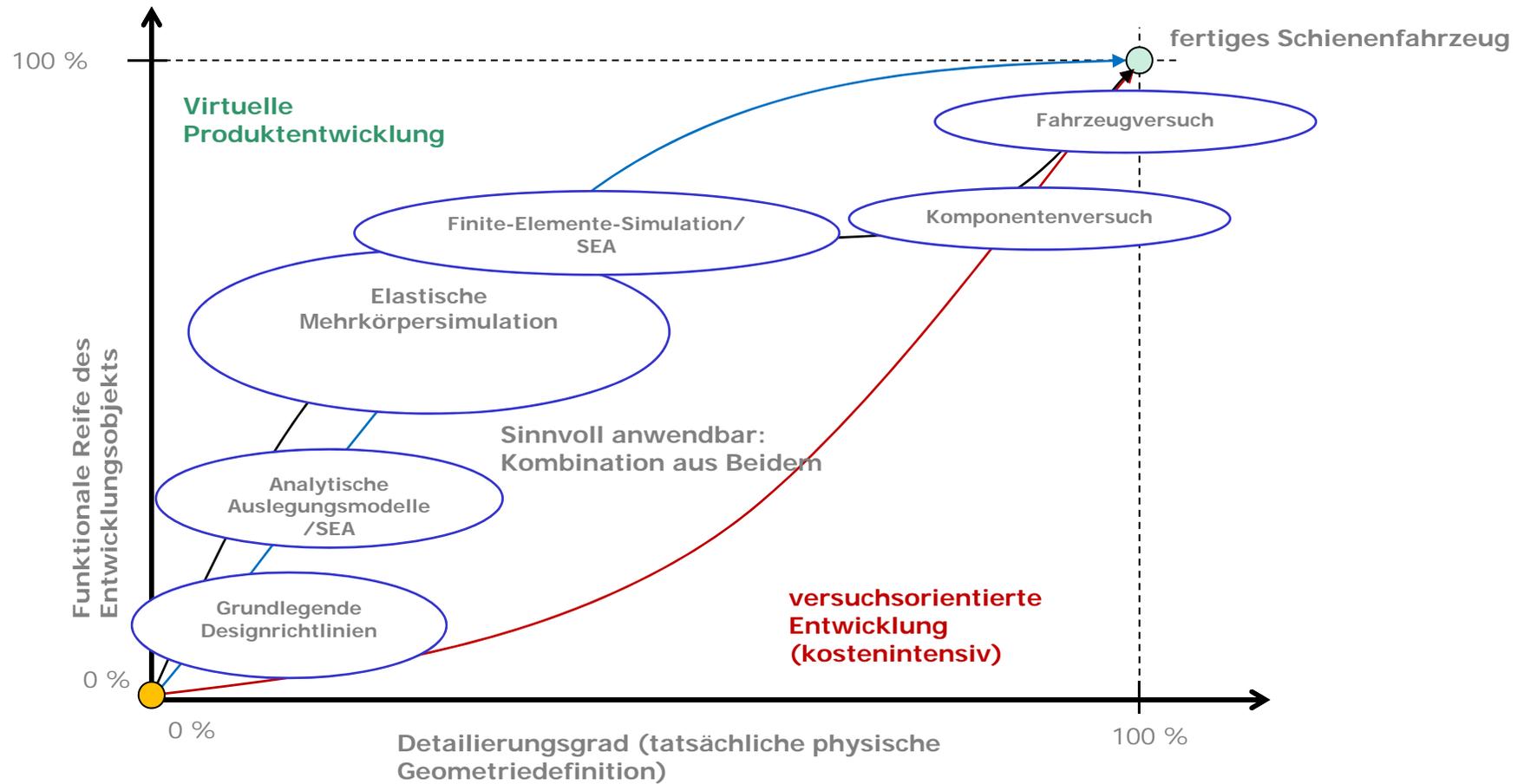


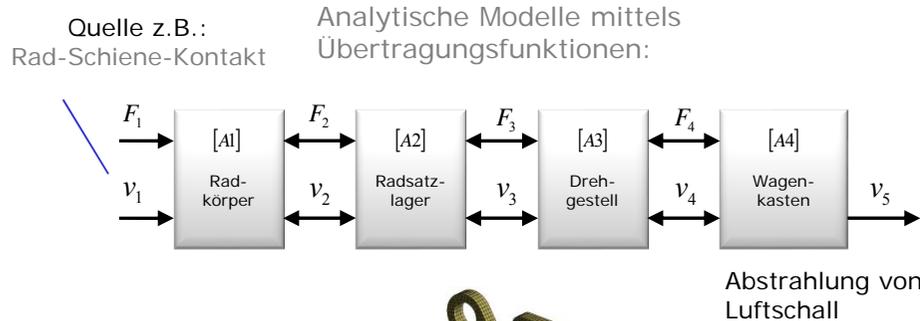
Interpoliertes Kennfeld für den Zusammenhang Axialverschiebung, Radialverschiebung und Axialkraft

Bewegungsanalyse des Rotors im Wälzlager

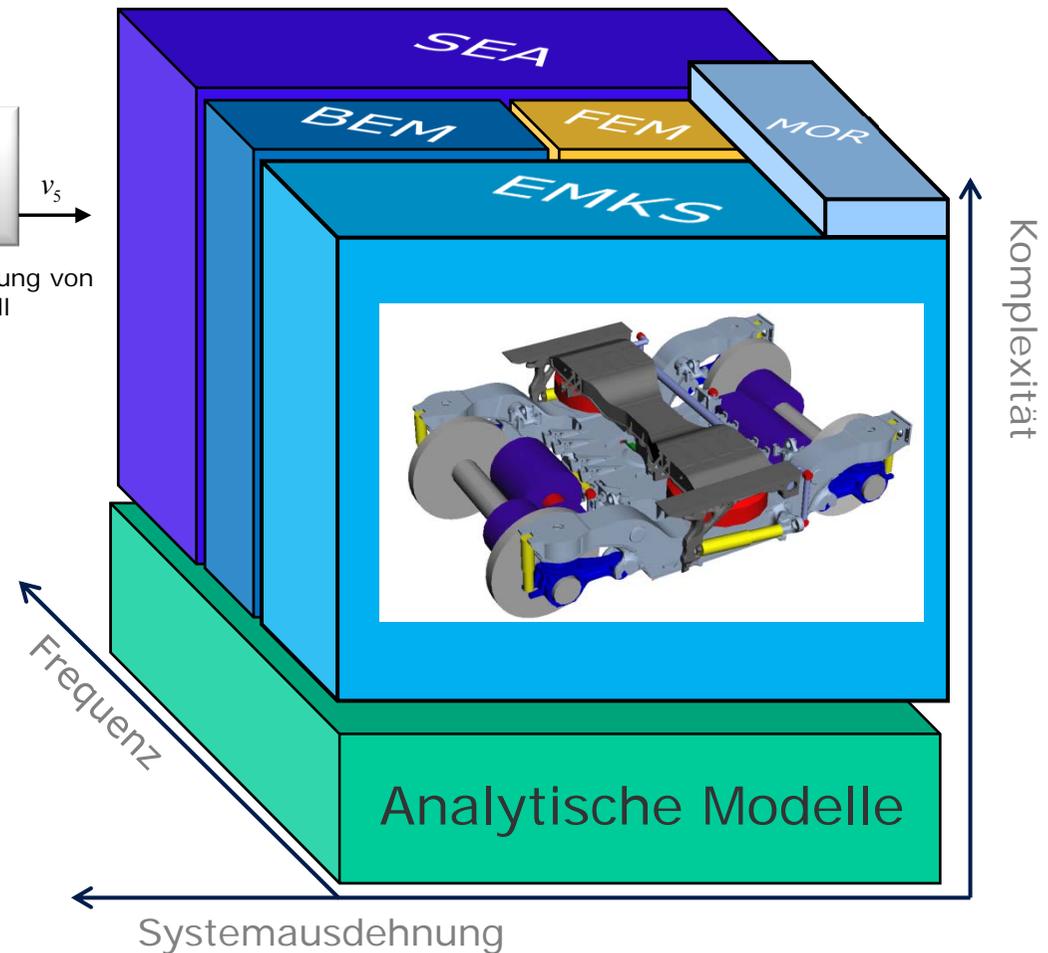


NVH-Prognose bei Schienenfahrzeugen

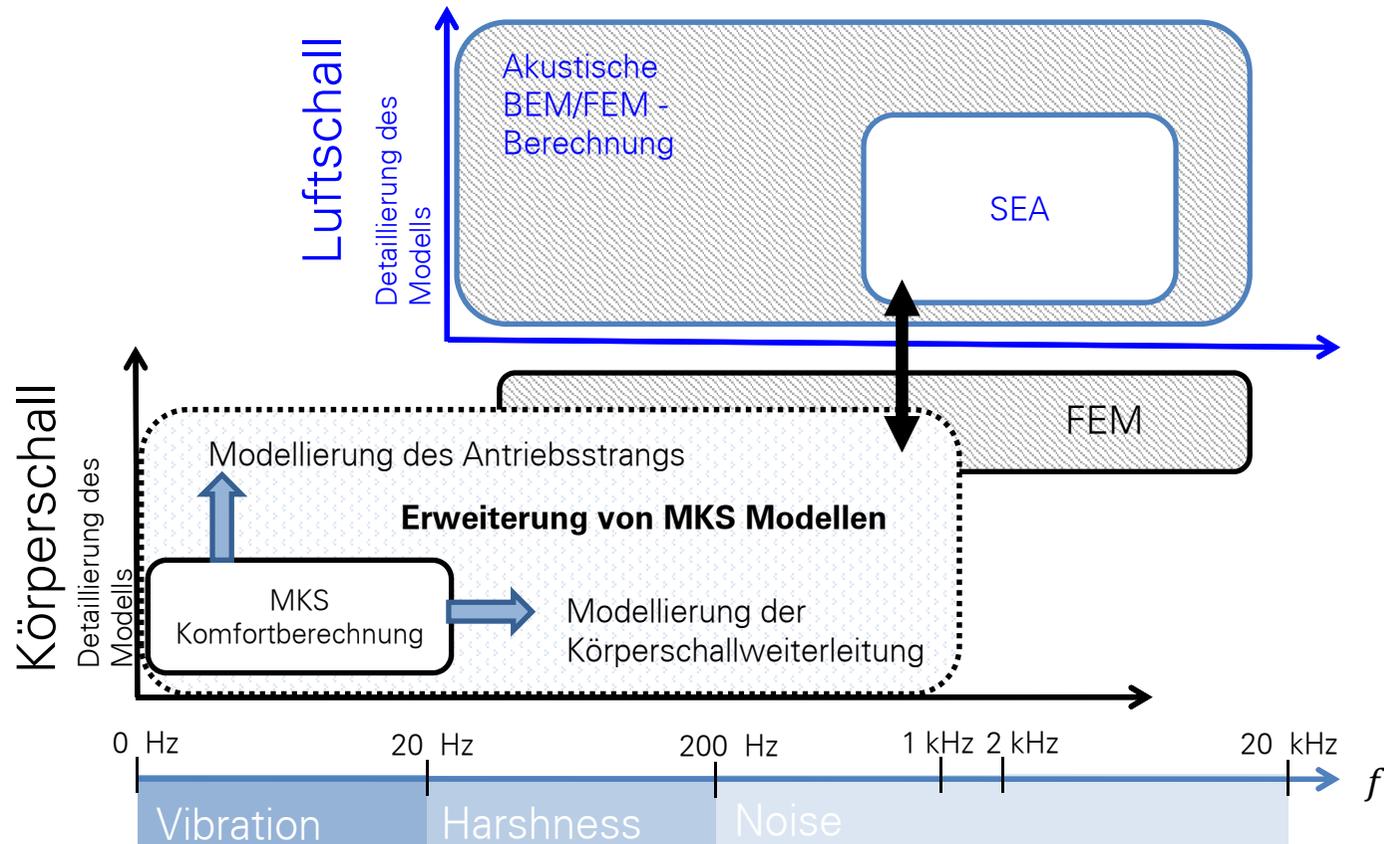




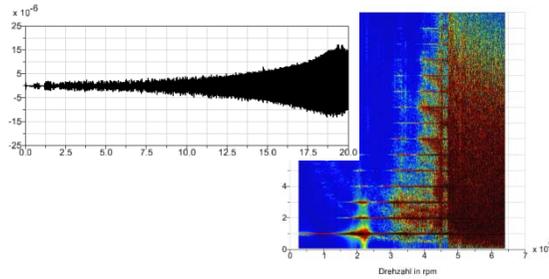
Finite-Elemente Modell eines Fahrmotors



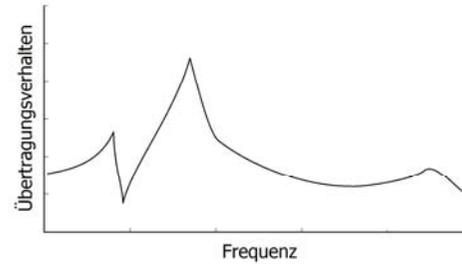
SEA	Statistische Energieanalyse
BEM	Rand-Elemente Methode
FEM	Finite-Elemente Methode
EMKS	Elastische Mehrkörpersimulation
MOR	Modellordnungsreduktion



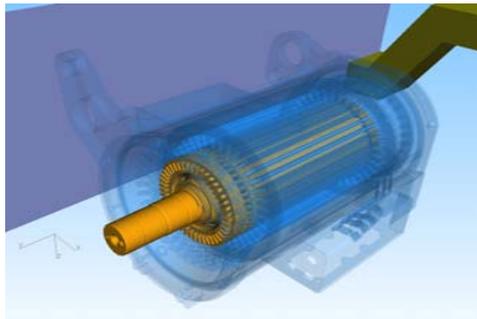
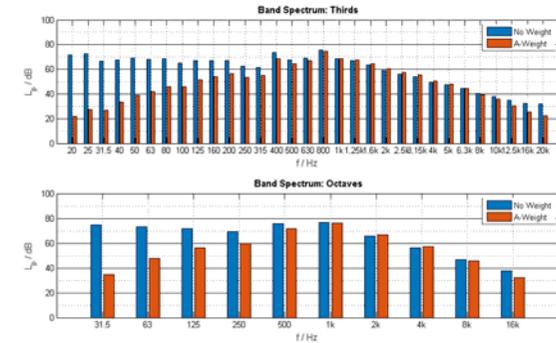
Modellgültigkeit im Frequenzbereich



X



=



Quelle: Bombardier Transportation

→ Berechnung des Luftschalls

→ Transferpfadanalyse und Quellenlokalisierung

→ Verifikation der Optimierung

1) EMKS

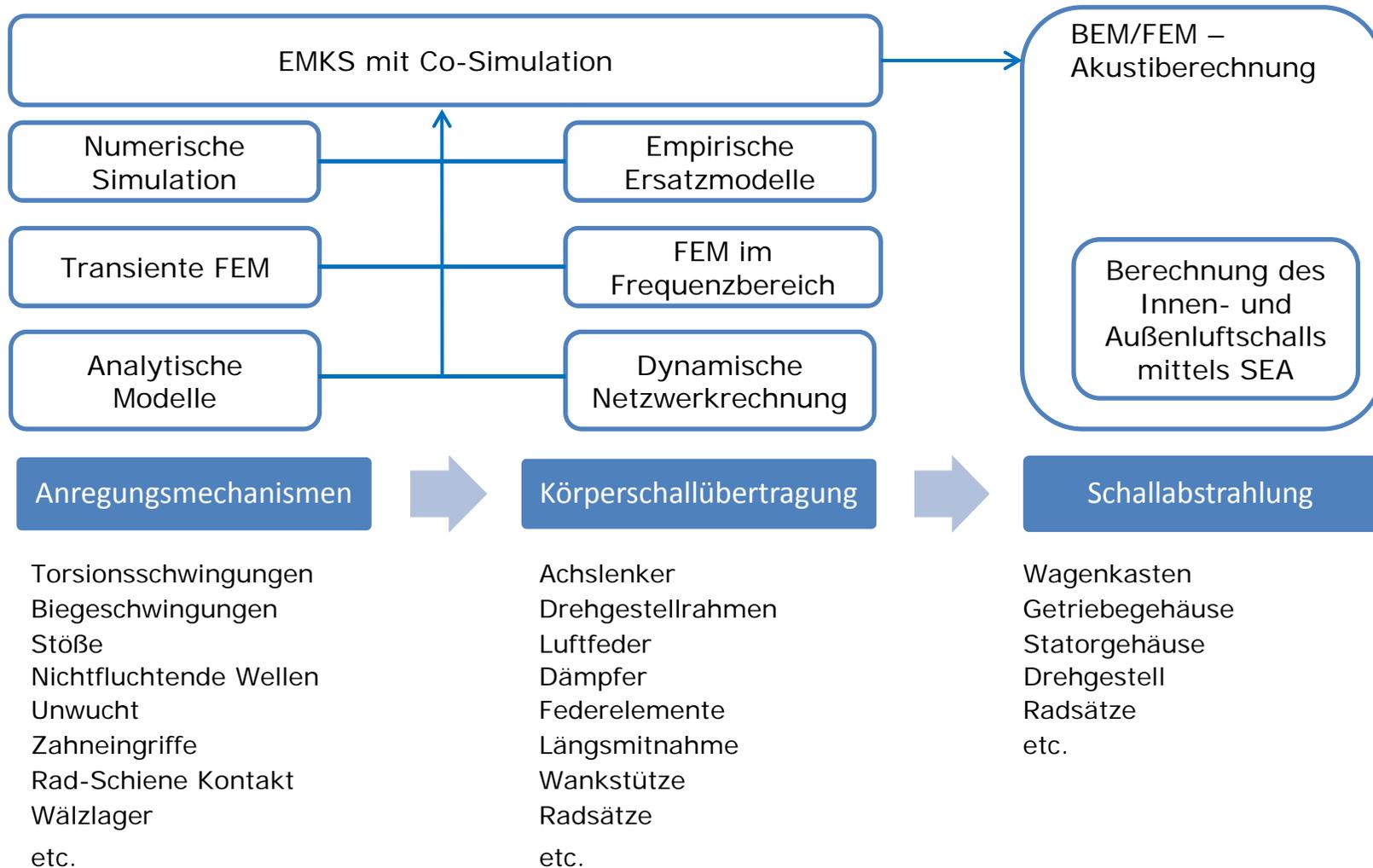
Berechnung der Körperschallsignale an den Anbindungspunkten

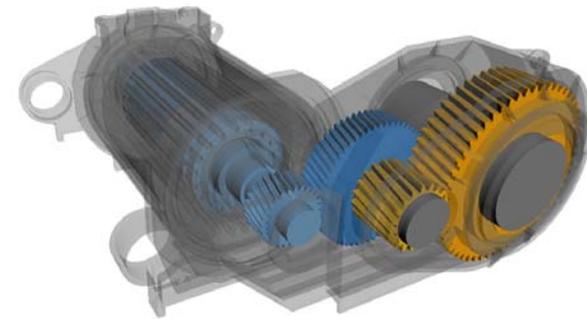
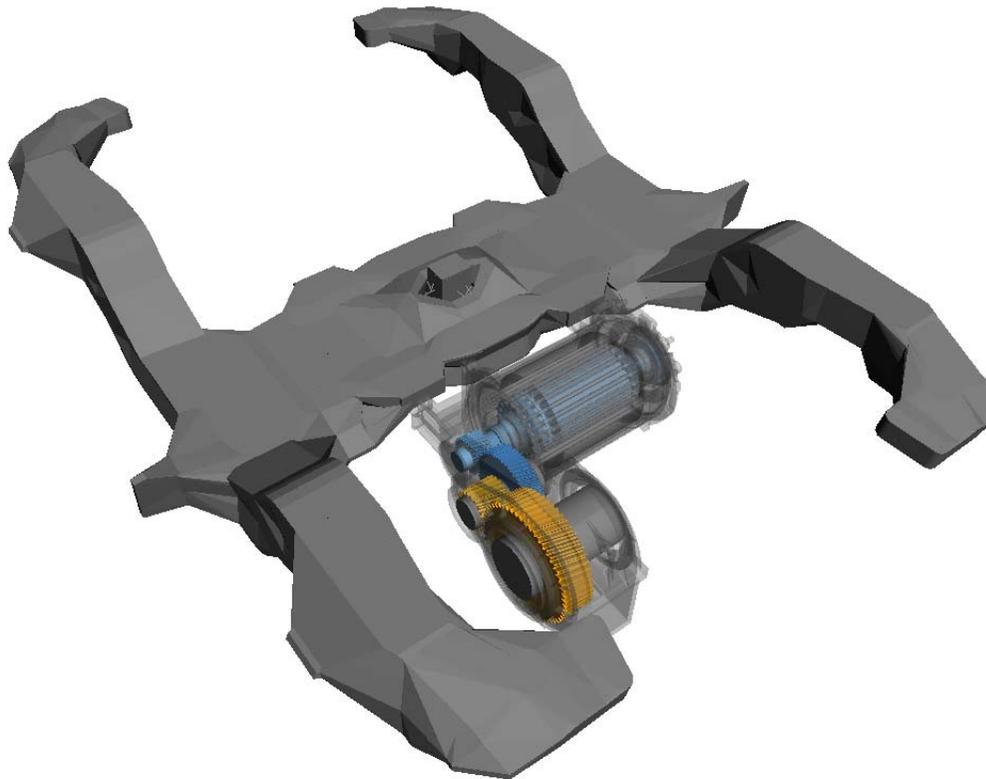
2) Transferpfadmessung

Messung der Transferpfade von den Anbindungspunkten zum Innenraum

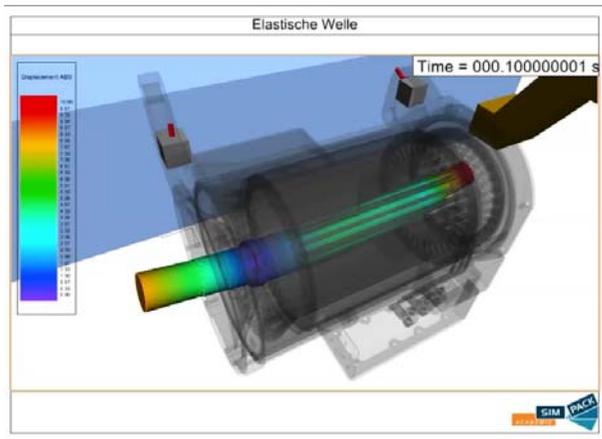
1)+2) = 3) Hybride Analyse des Innengeräuschs:

Mit PAK (Müller BBM) wird der Luftschall im Innenraum infolge der Schnittkräfte an den Anbindungspunkten berechnet.

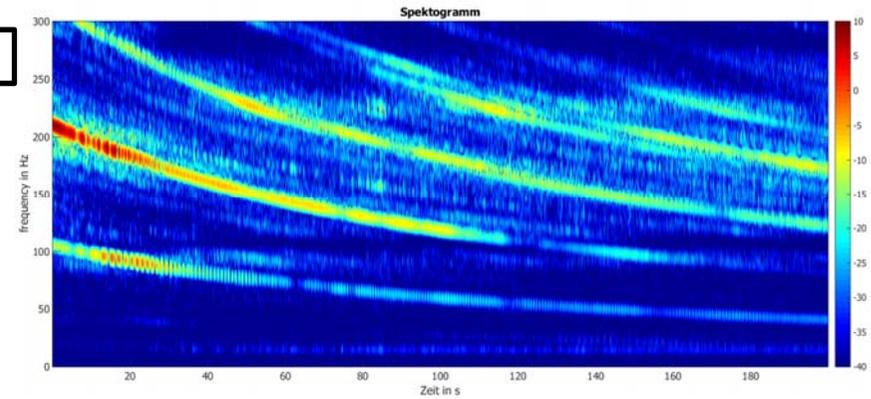




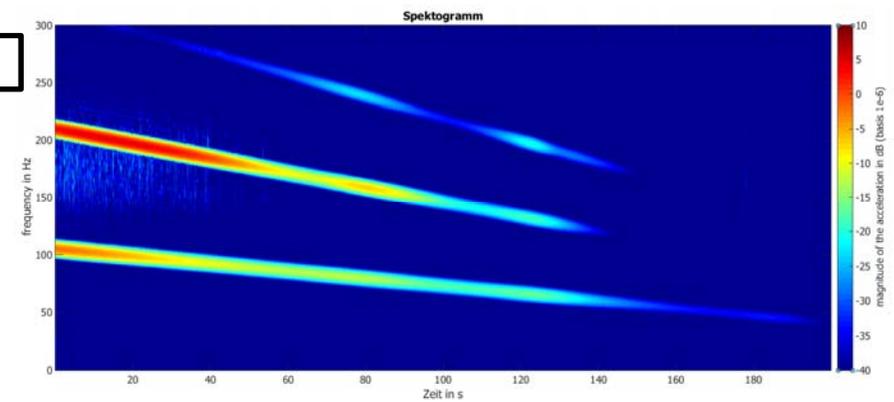
Lagerbeschleunigung



Messung

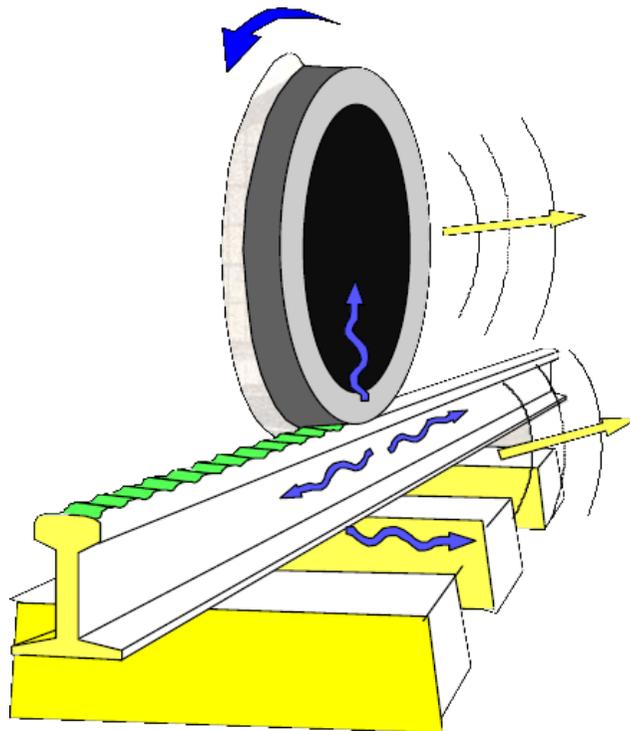


Simulation



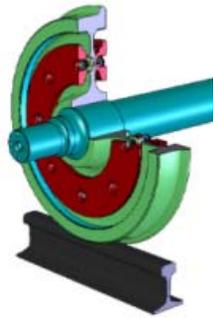
Der Radsatz und das Rollgeräusch

Berechnungsschritte zur Rollgeräuschprognose

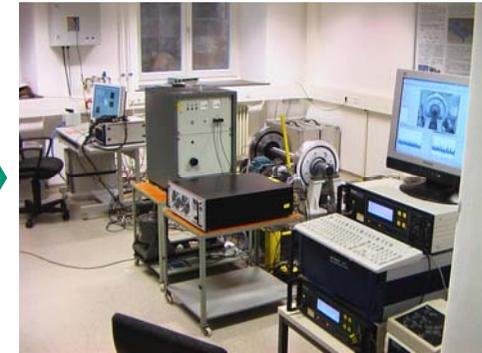
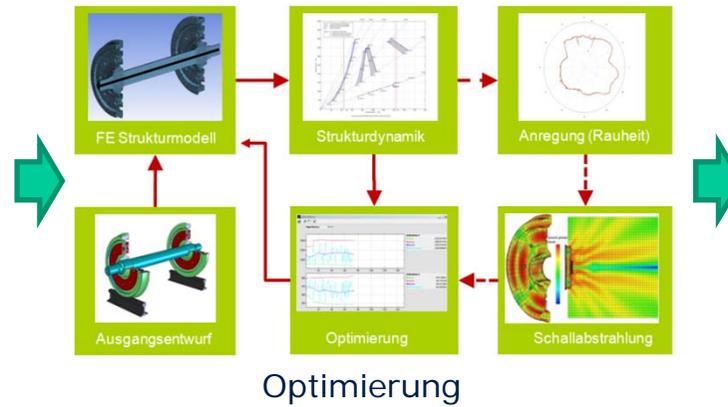


- Rad- und Schienenoberfläche sind rau.
- Wegerregung von Rad und Schiene.
- Filterwirkung durch den elastischen Kontakt.
- Rad und Schiene stellen ein gekoppeltes Schwingungssystem dar.
- Schwingungsanregung beider Kontaktpartner.
- Schallabstrahlung.

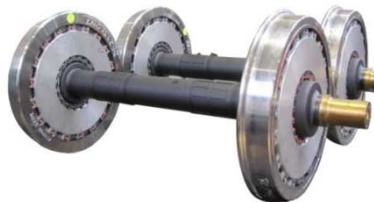
Forschungsprojekt LZarG



Ausgangsentwurf



Modellprüfstand 1:2



Schalloptimierter Radsatz
23.07.2015

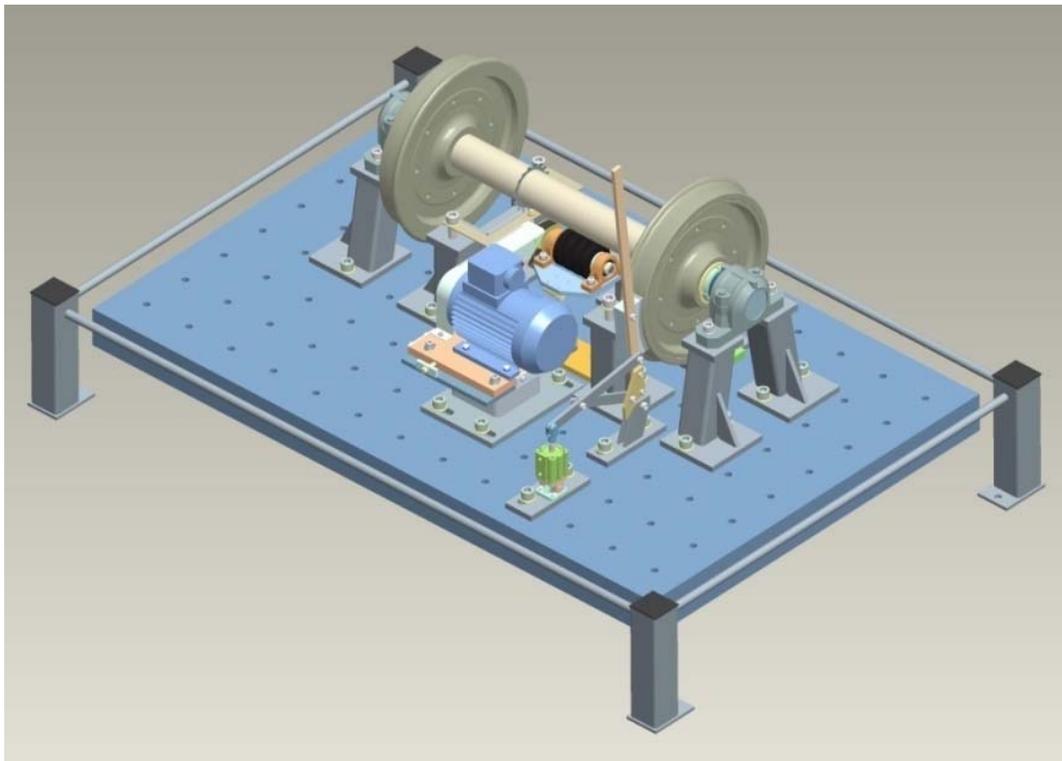


Vorbeifahrtmessungen
Der virtuelle Zug - IMR und CM Kolloquium Universität Siegen



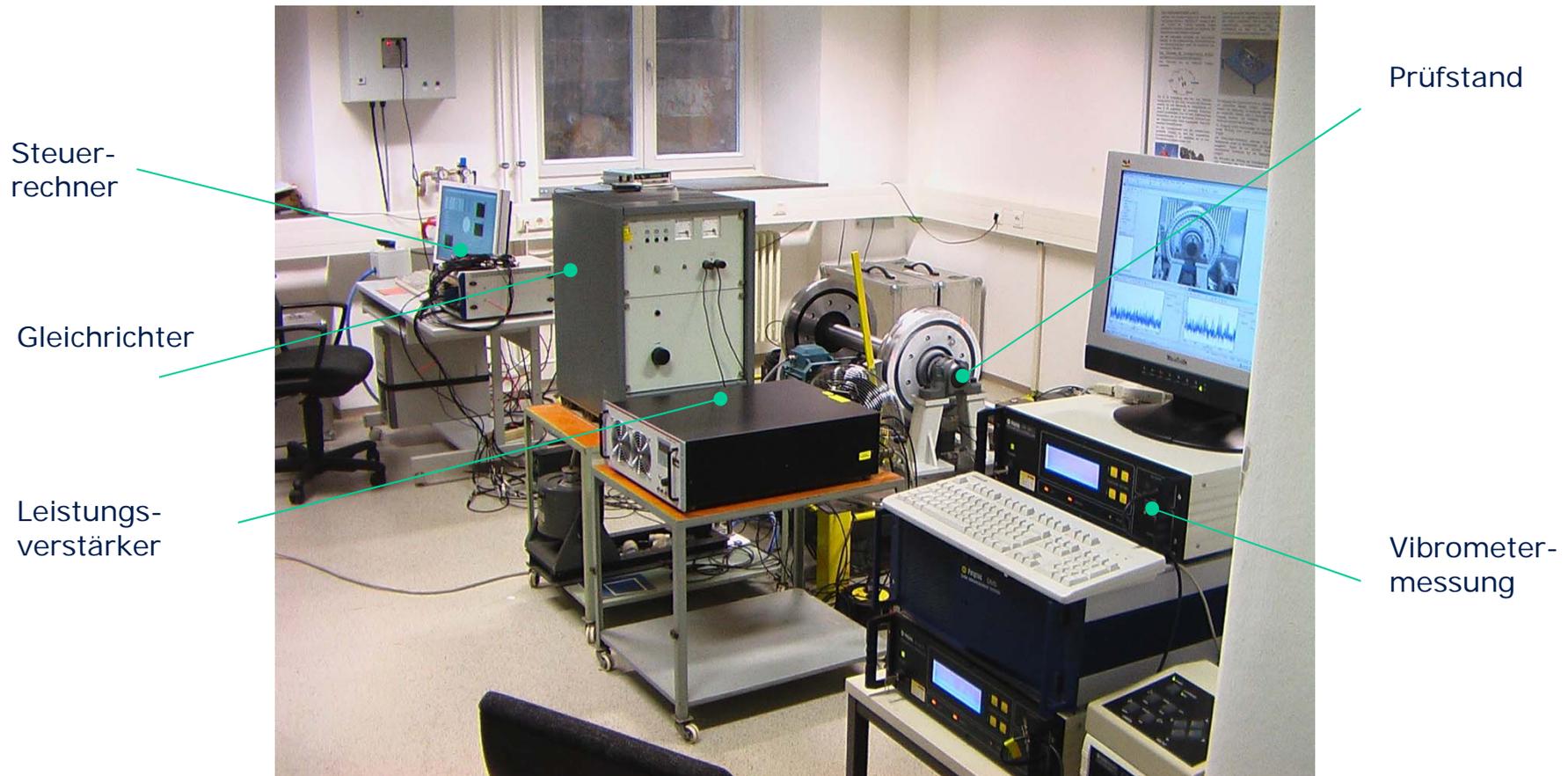
Rollenprüfstand 1:1
Folie 48

Modellprüfstand

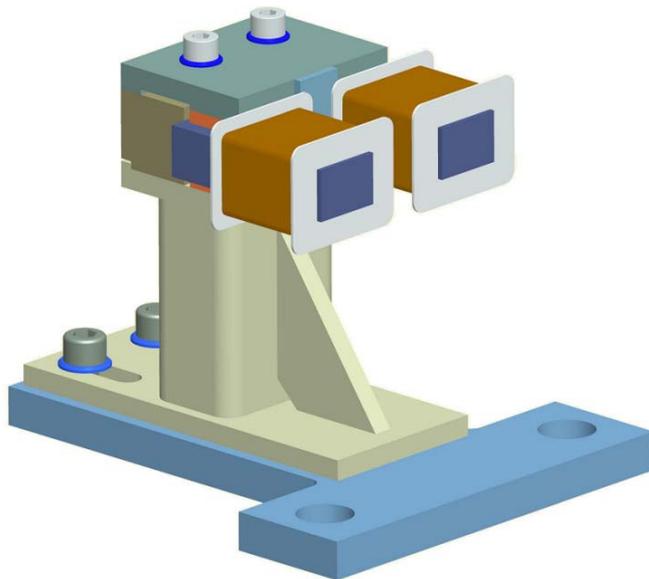


- Validierung der rechnerisch prognostizierten Modendichtereduktion
- Überprüfung der Arbeitshypothesen zur Veränderung des Resonanzverhaltens am drehenden gegenüber dem stehenden Radsatz
- experimentelle Überprüfung der Wirksamkeit von Radschallabsorbern

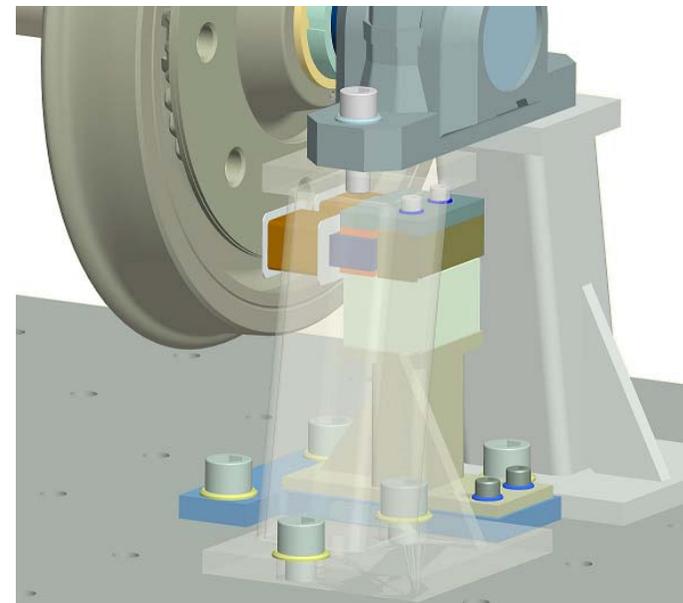
Prüfstand mit Steuer- und Messarbeitsplatz



Elektromagnetischer Erreger



Lagerung



Einbausituation

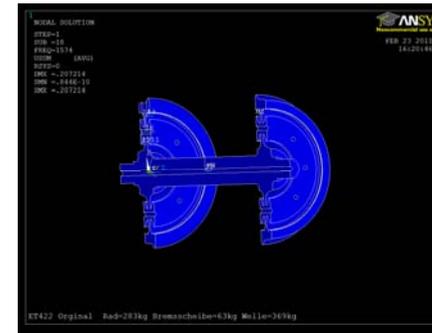
Eigenverhalten in Rechnung und Versuch

Var. 4.2: Eigenmode A,0,2

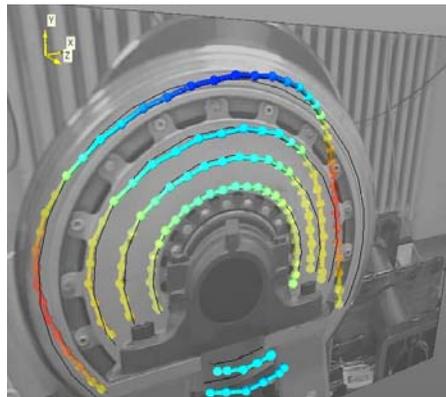


610 Hz

ET 422: Eigenmode A,1,2

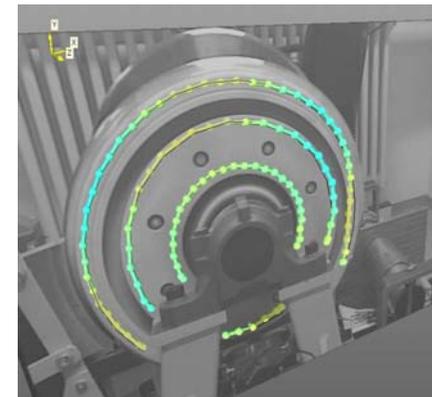


1574 Hz



518 Hz

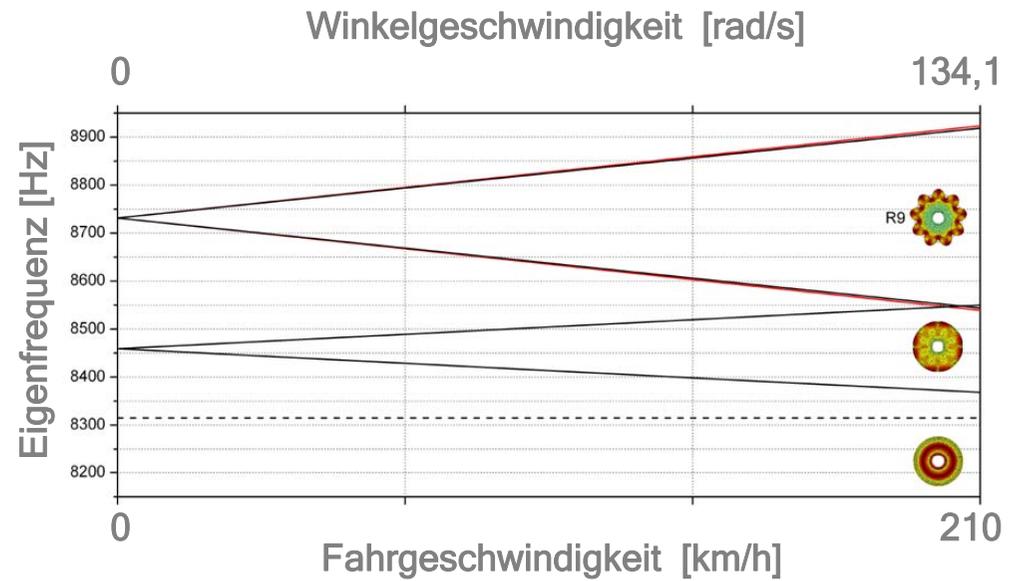
→ Abw. ~ 18%



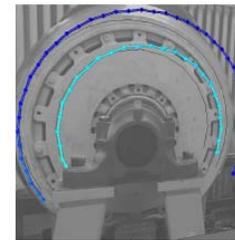
1360 Hz

1360 Hz → Abw. ~ 14%

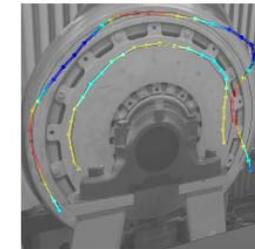
Eigenverhalten des rotierenden Radsatzes



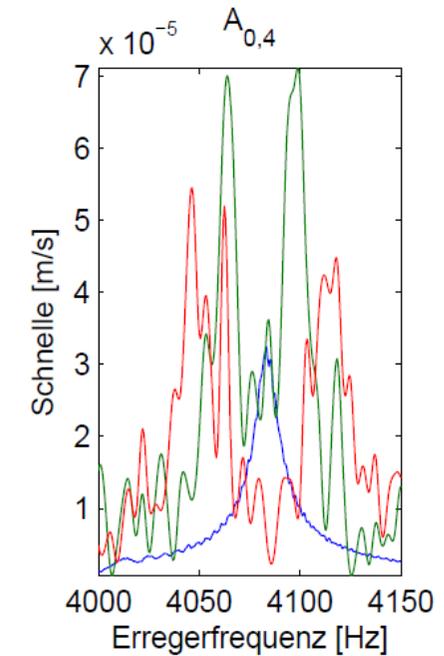
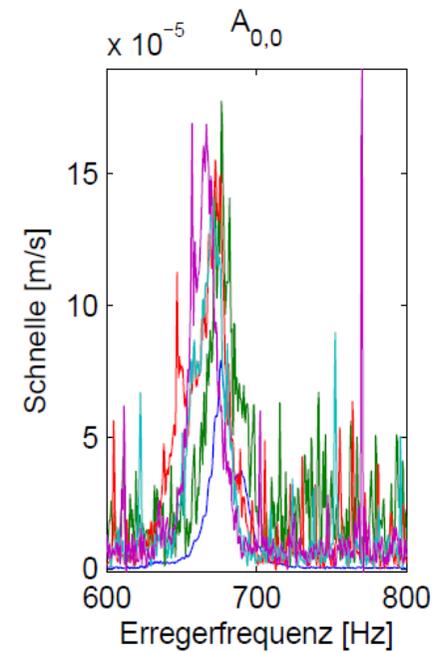
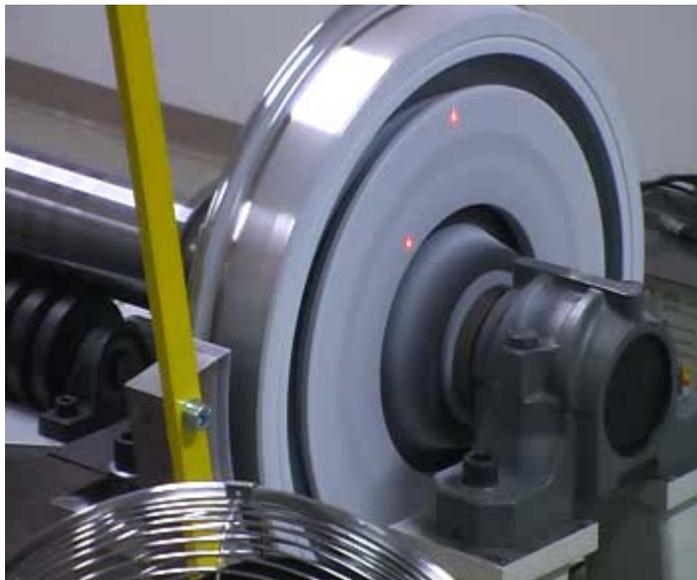
Eigenverhalten des rotierenden Radsatzes



$A_{0,0}$

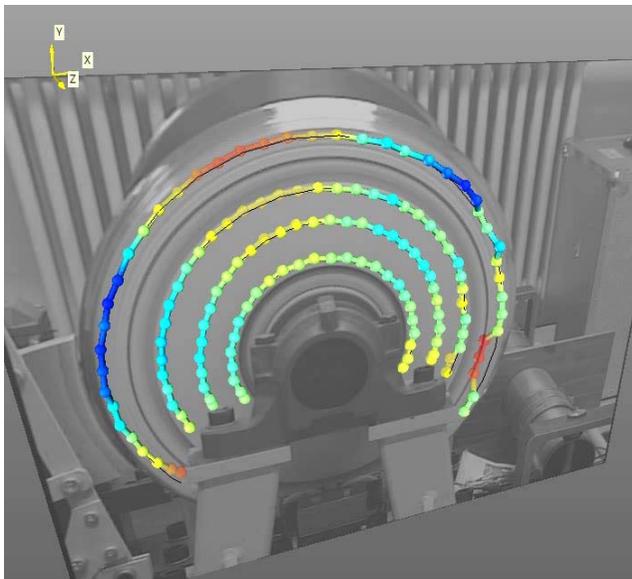


$A_{0,4}$

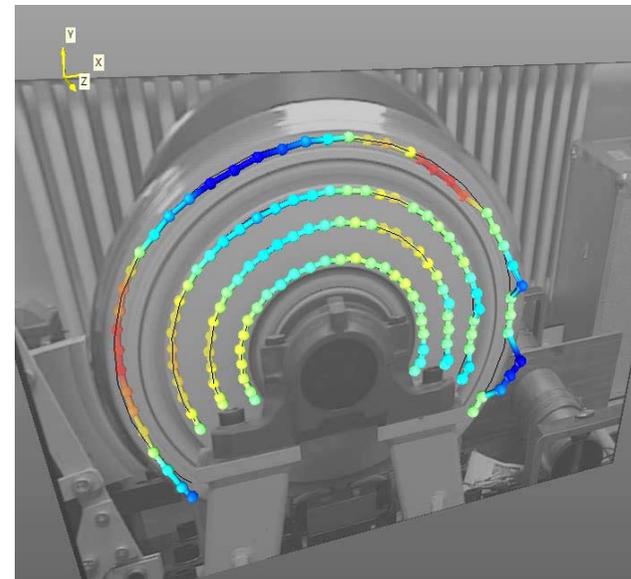


Eigenverhalten des rotierenden Radsatzes

Aufspaltung der Eigenmode A,0,3 bei 1500 1/min

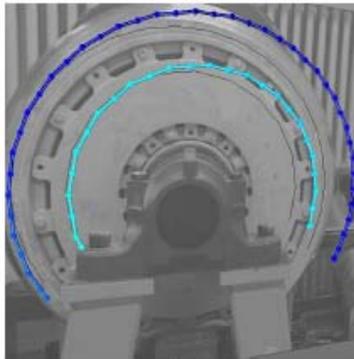


$$f_1 = 2360 \text{ Hz}$$

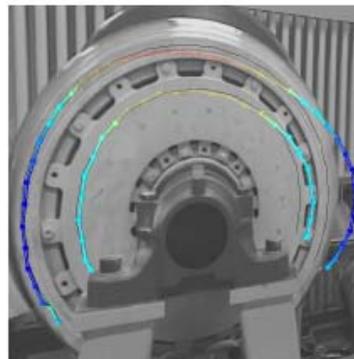


$$f_1 = 2510 \text{ Hz}$$

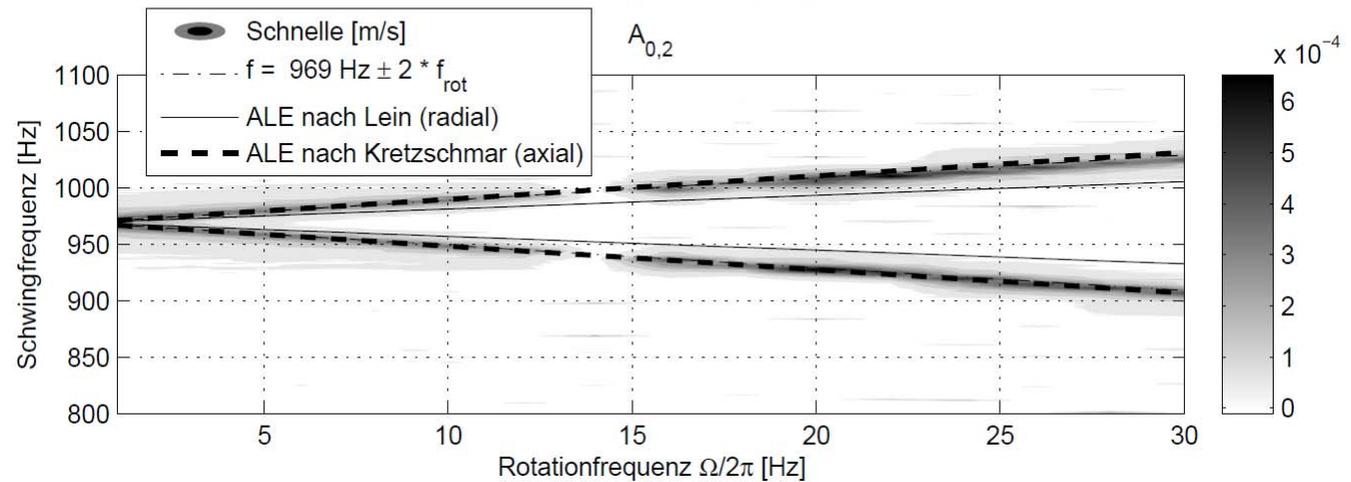
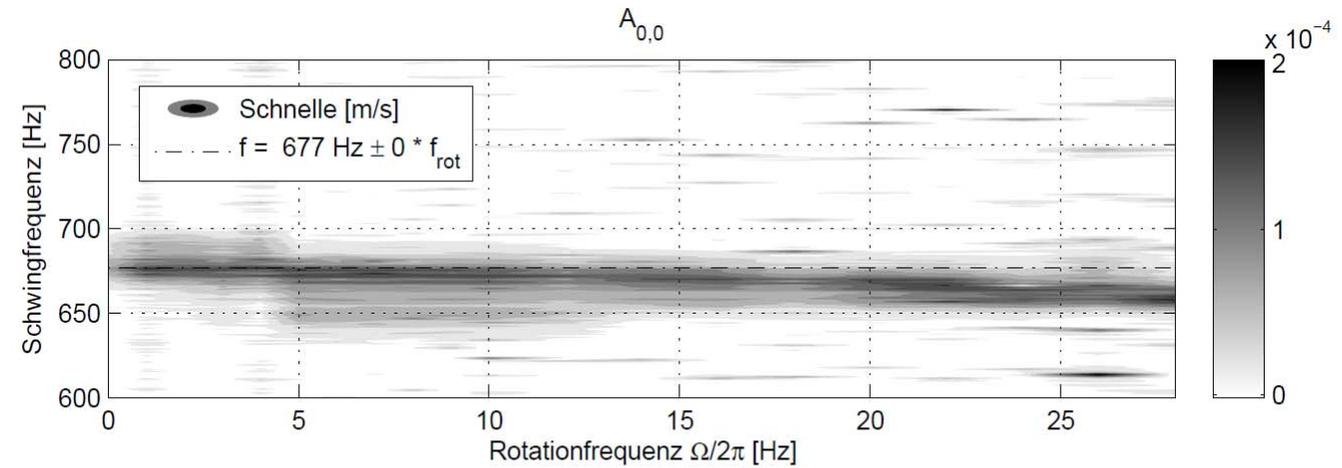
Eigenverhalten des rotierenden Radsatzes



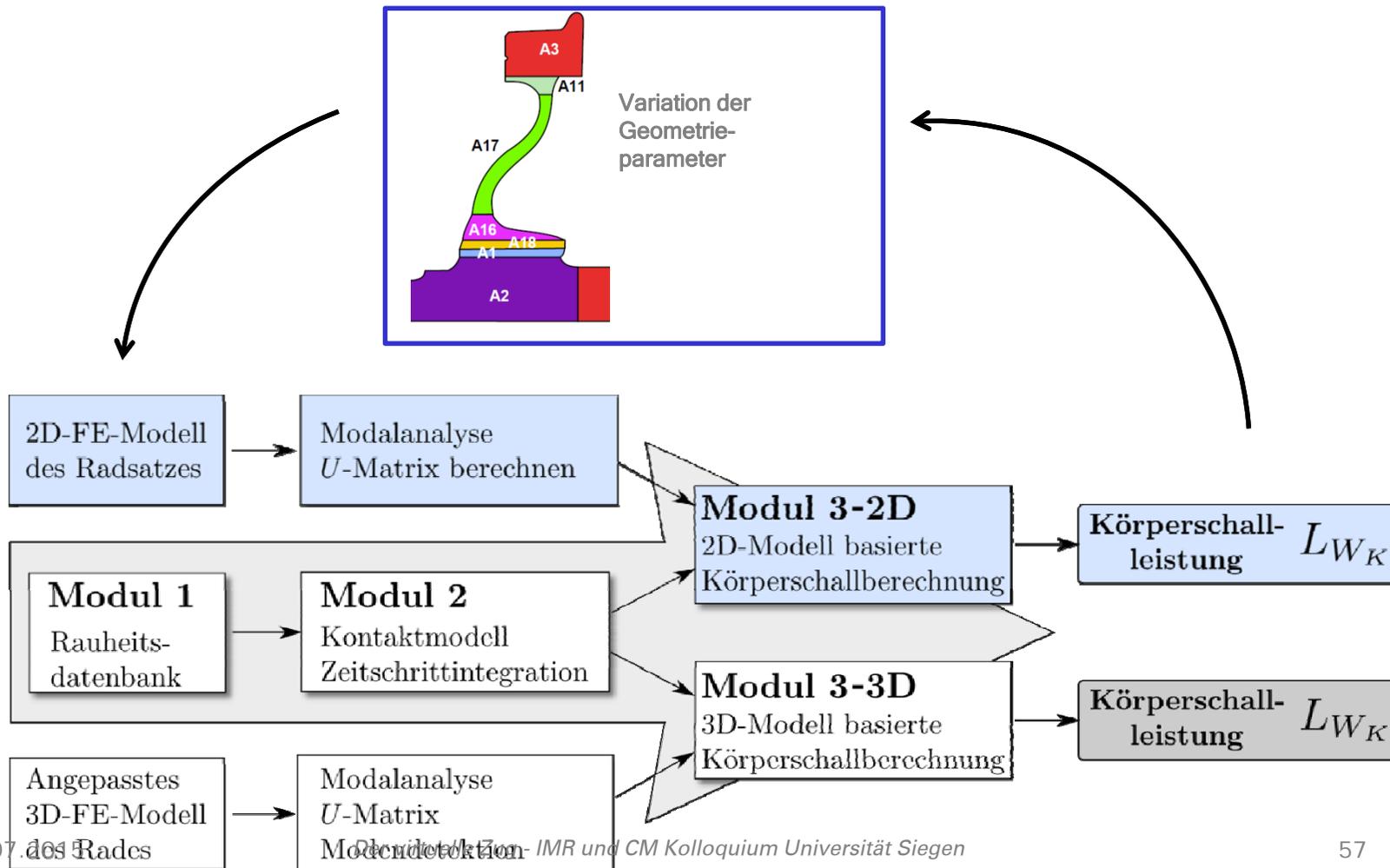
$A_{0,0}$



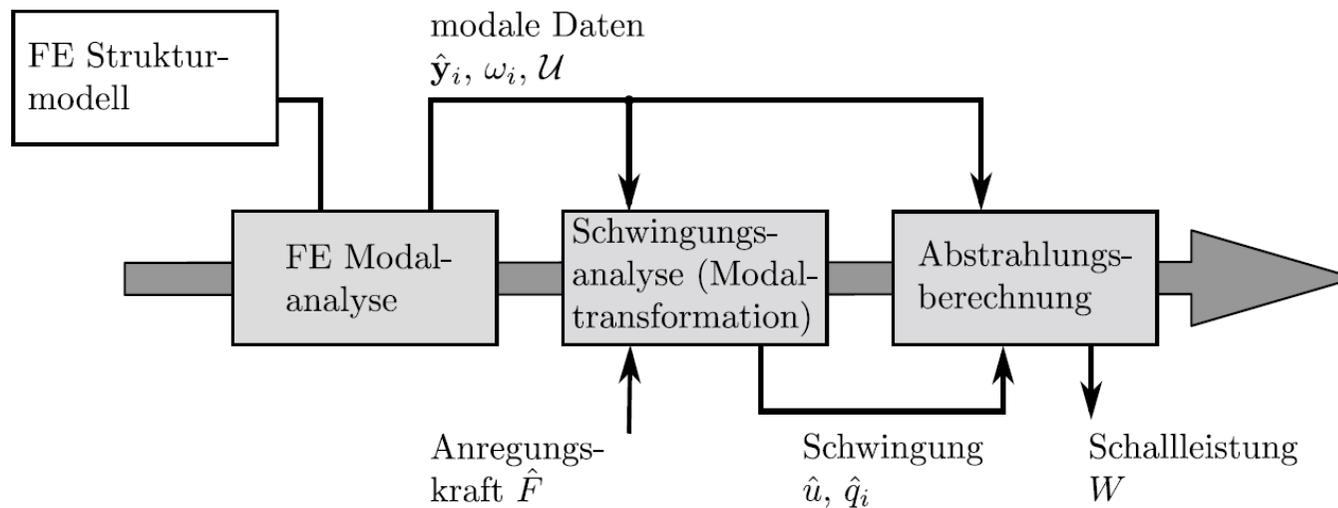
$A_{0,2}$



Akustische Strukturoptimierung

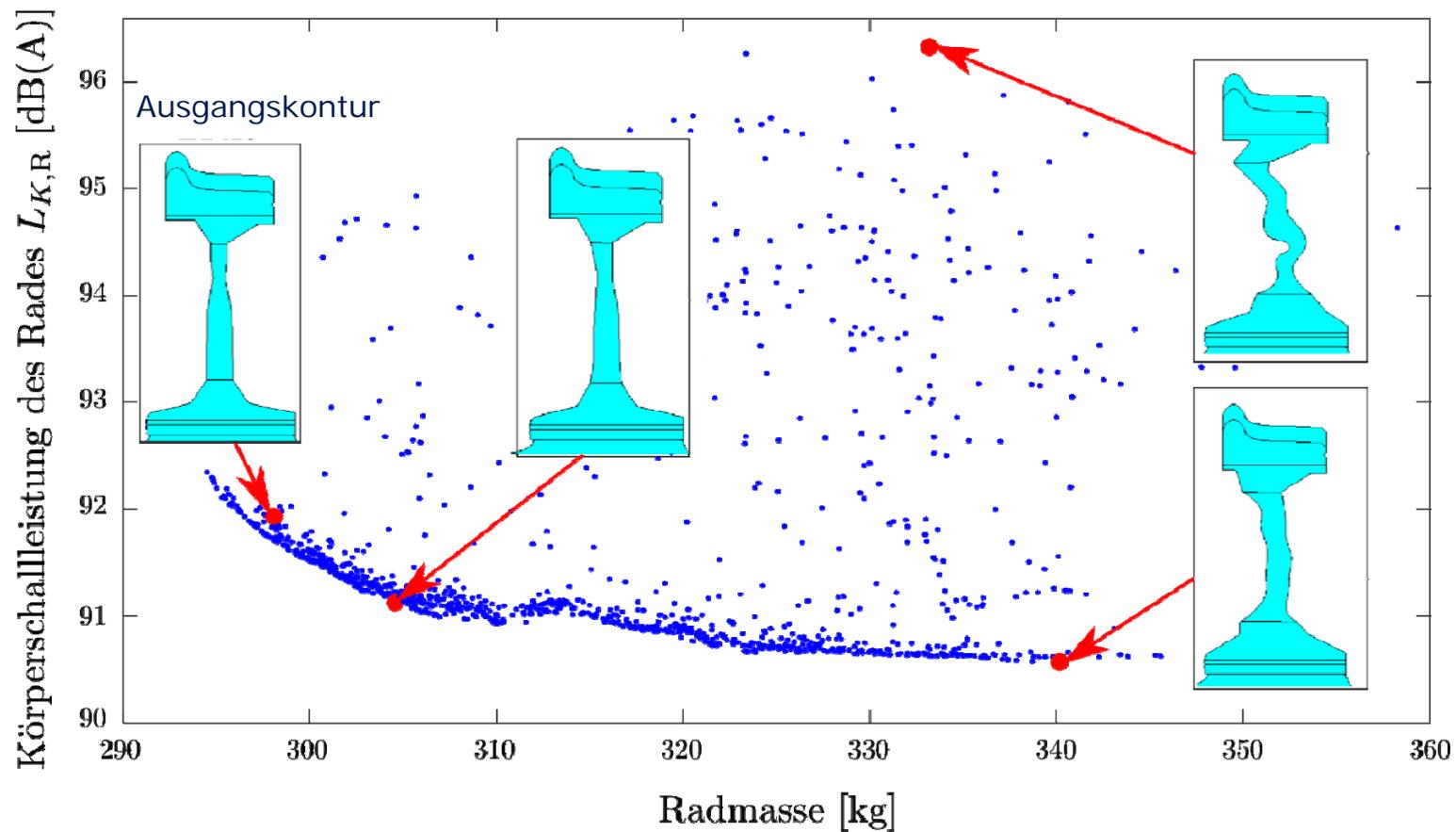


Berechnung der Körperschalleistung

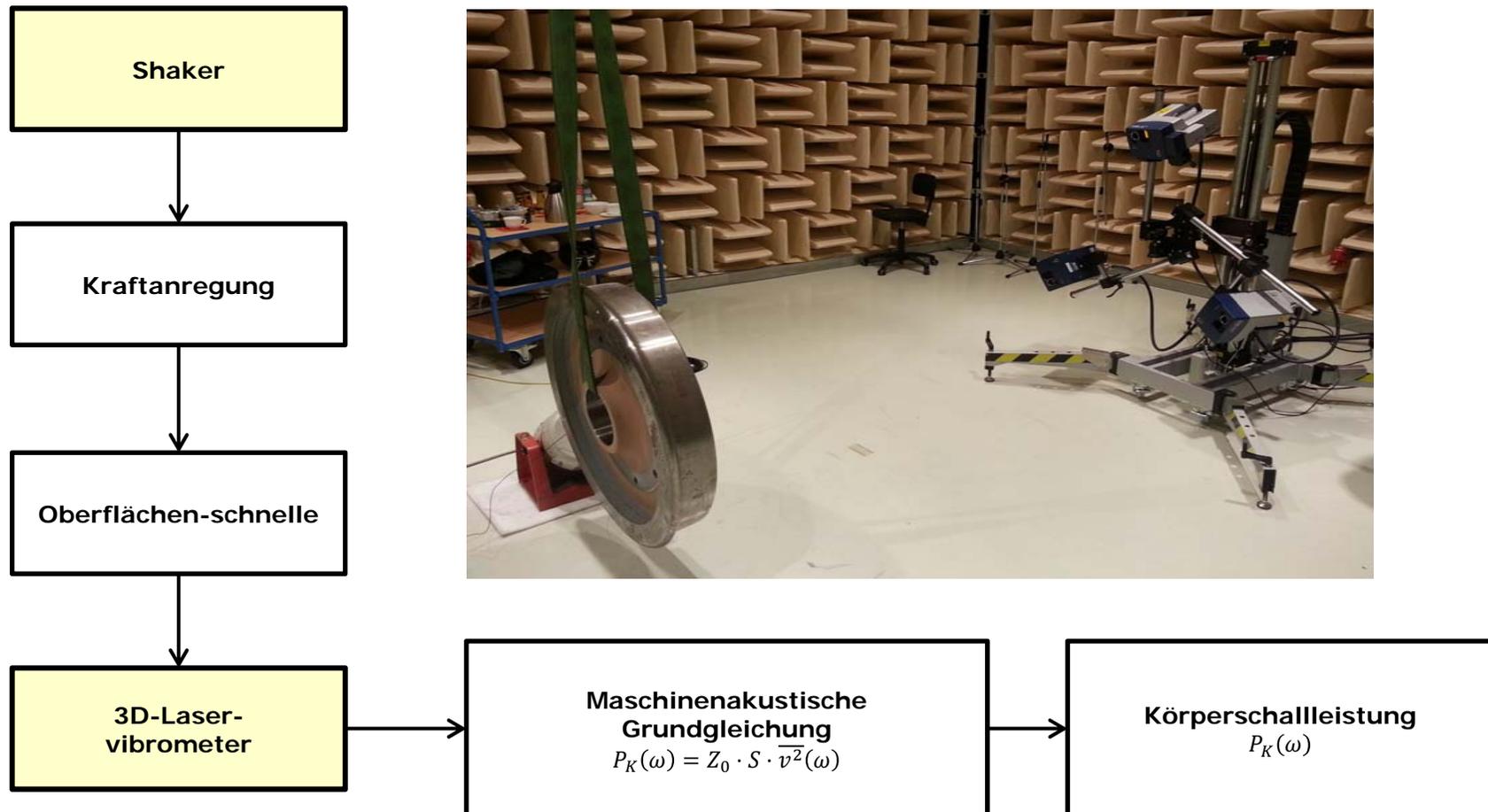


$$W(\omega) = \sigma \rho c S \overline{\tilde{v}_n^2}(\omega)$$

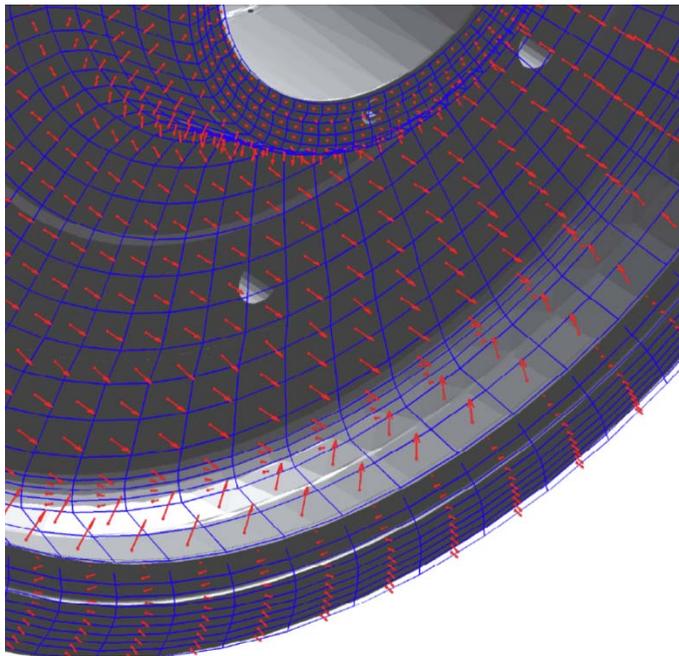
Akustische Strukturoptimierung - Paretofront



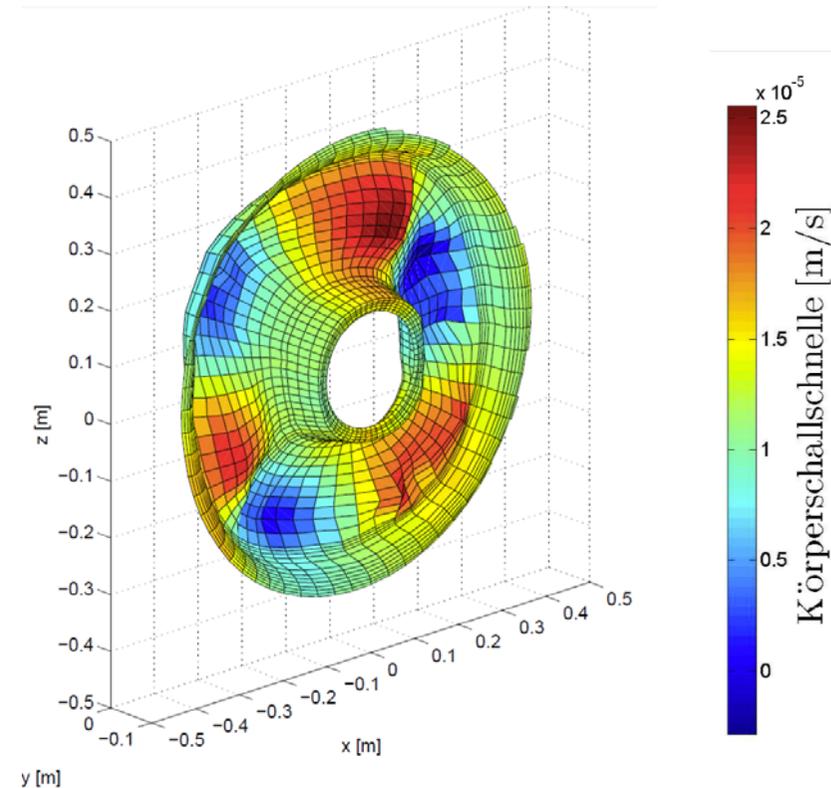
Experimentelle Ermittlung der Körperschalleistung



Berechnung der Körperschalleistung aus der gemessenen Oberflächenschnelle



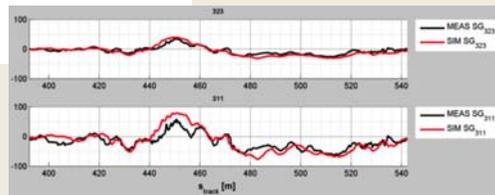
Interpolation der gemessenen Schnelle auf ein Oberflächennetz mit bekanntem Flächeninhalt und Orientierung



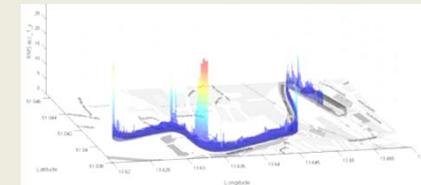
$$P_K(\omega) = Z_0 \cdot S \cdot \overline{v^2}(\omega)$$



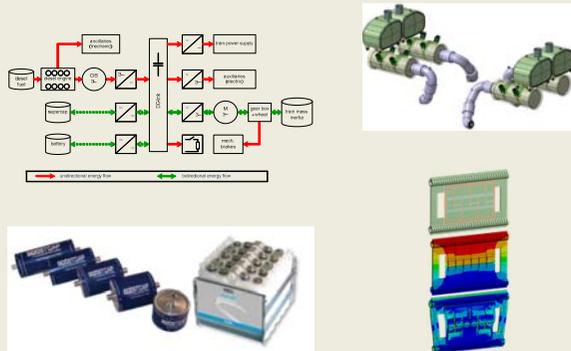
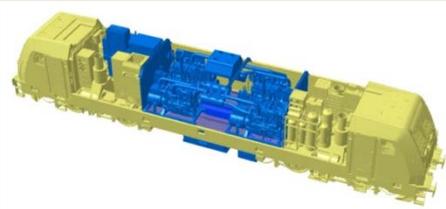
LRV Simulation



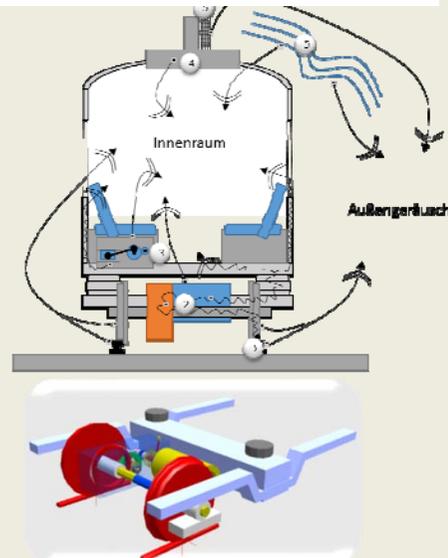
Messstraßenbahn



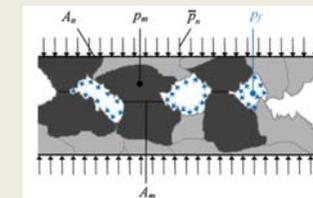
Energieeffizientes Fahren



NVH im Fahrzeugantriebsstrang



iceWEAR Radverschleiss





»Wissen schafft Brücken.«