

$$B(T, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \exp(\lambda k_B T)}$$

Fraunhofer ITWM

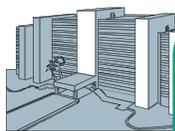
---

# 35. Forum Simulation in der Automobilindustrie

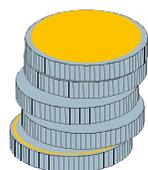
# Fraunhofer-Gesellschaft Profil



23 000  
Mitarbeiter



76 Institute  
Forschung  
in Deutschland



3 Mrd. €  
Budget

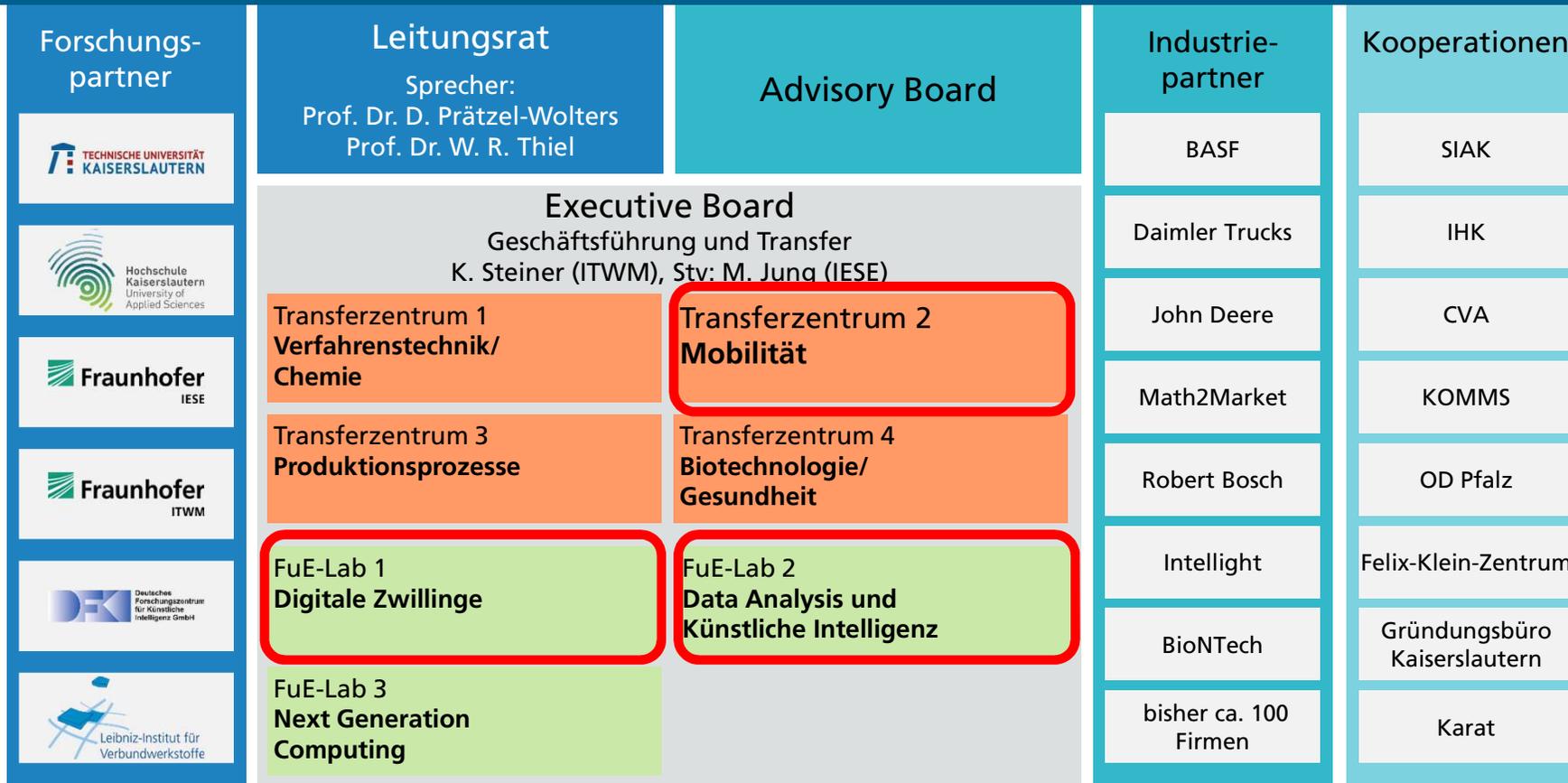
**Fraunhofer Leistungszentrum für  
Simulations- und Software basierte Innovation**  
- Fraunhofer ITWM (industrial mathematics)  
- Fraunhofer IESE (software engineering)

- Mikroelektronik
- Produktion
- **Informations- und Kommunikationstechnik**
- Werkstoffe und Bauteile
- Life Sciences
- Oberflächentechnik und Photonik
- Verteidigungsforschung u. Wehrtechnik



# Vernetzung am Standort: Leistungszentrum

Kooperationsvertrag aller Forschungspartner



# Fraunhofer-Institute for Industrial Mathematics (ITWM)



## Bereich Mathematik für die Fahrzeugentwicklung (MF)

---

Dr. Klaus Dreßler  
April 2024

# Fraunhofer ITWM

## ■ Aktivitäten

- Strömung und Transportvorgänge
- Materialmodelle, Mehrskalensimulation

## ■ **Mathematik für die Fahrzeugentwicklung**

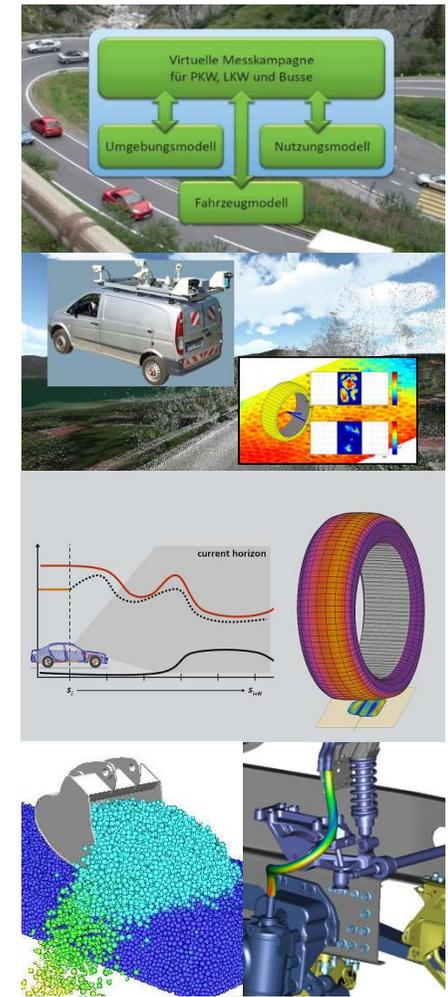
- **Mathematik für die digitale Fabrik**
- **Dynamik, Lasten und digitale Umgebungsdaten**
- **Reifen- und Fahrzeugsimulation**

## ■ **Technikum: Fahrsimulatoren / Messfahrzeug / Messtechnik**

- Bildverarbeitung und Materialcharakterisierung
- Optimierung
- High Performance Computing

■ Betriebshaushalt: 40 Mio €

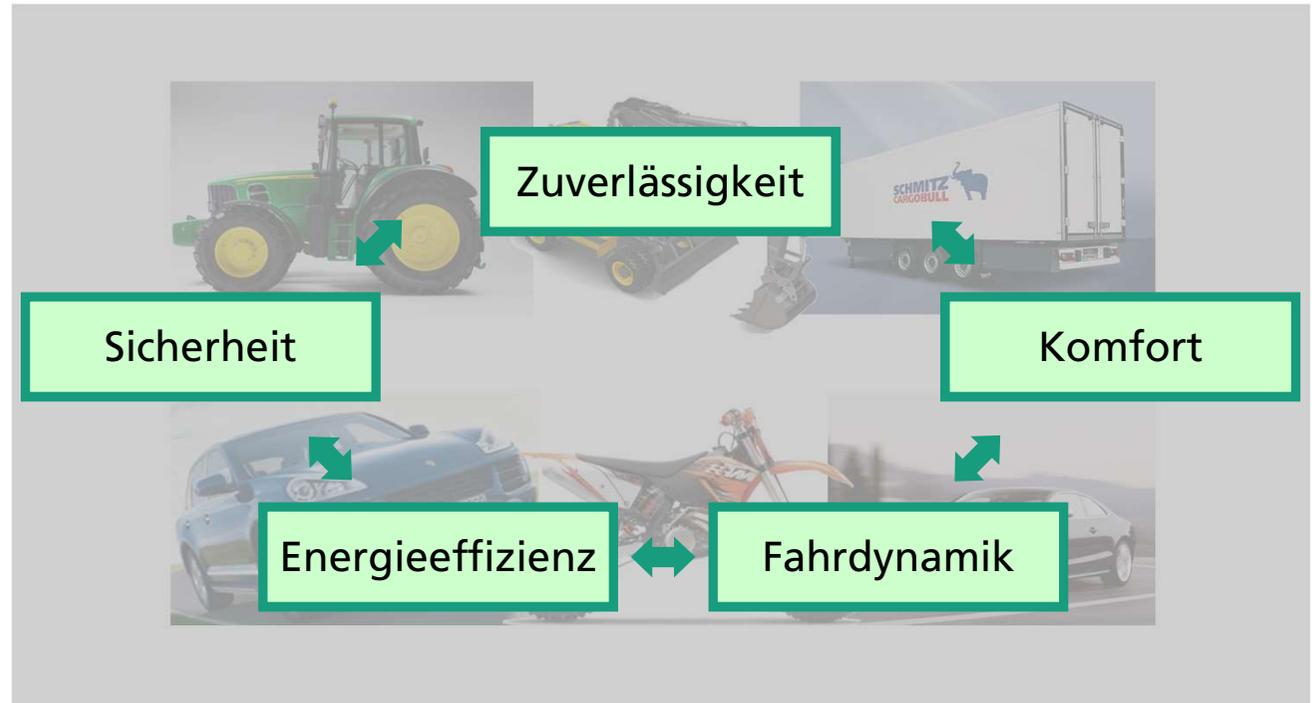
■ 390 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter



# Fraunhofer ITWM "Mathematics for Vehicle Engineering"

## Fahrzeuge

- Sind komplexe mechatronische Systeme
- ...für eine Vielzahl von Anwendungen (Nutzungsvariabilität)
- ...gebaut in vielen Varianten (Produktvariabilität)



# Fraunhofer ITWM / Bereich MF

## ■ System- und Struktursimulation

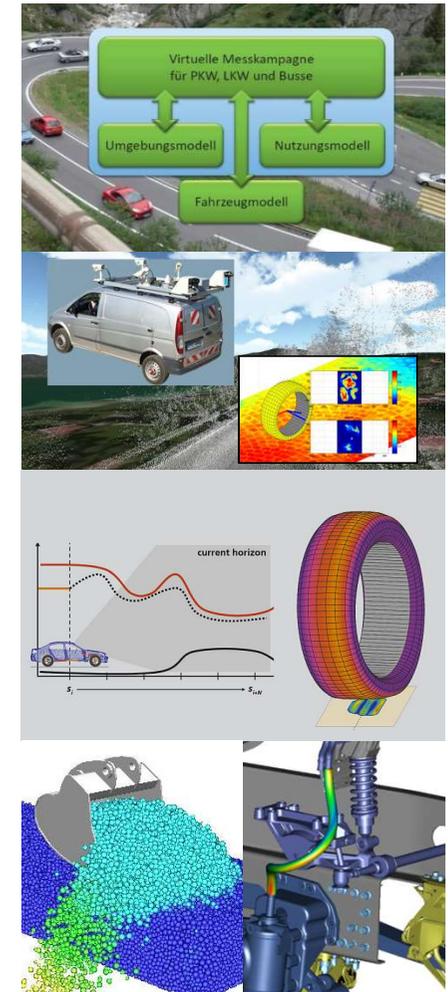
- Kabel und Schläuche / **IPS Cable Simulation** ▶
- Fahrzeug- und Reifensimulation / **CDTire** ▶
- Fahrzeug-Umwelt-Mensch Interaktion / **RODOS®** ▶
- Human modelling → **IMMA / EMMA**

## ■ Datenanalyse und maschinelles Lernen in der Fahrzeugentwicklung ▶

- ML zur Applikationserkennung; Identifikation dynamischer Systeme
- Statistische Methoden zum Nachweis der Bauteilzuverlässigkeit / **JUROJIN** ▶

## ■ Nutzungsvervielfältigung & Umgebungsdaten ▶

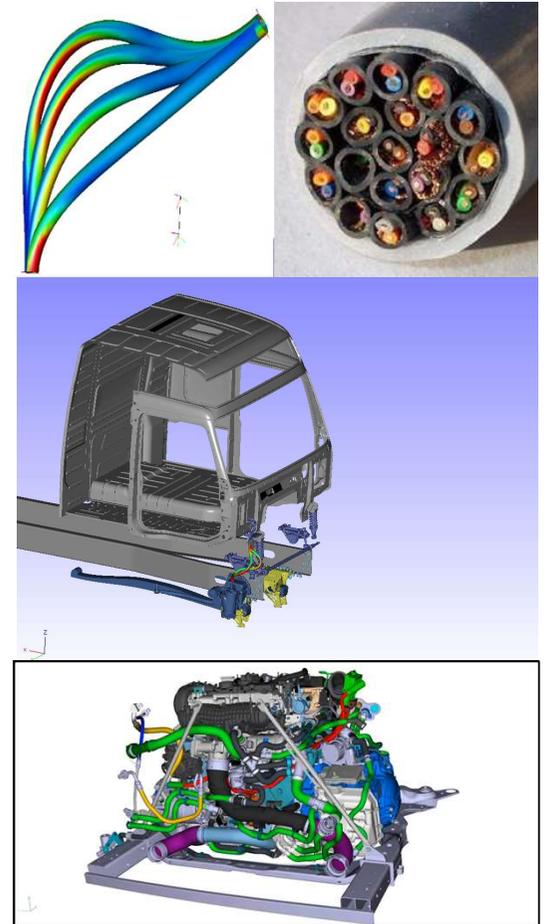
- **VMC®, USIM, REDAR**
- Lasten und Betriebsfestigkeit
- Energieeffizienz / 'real-driving-emission'
- Absicherung ADAS und Verkehrssystemoptimierung



# Fraunhofer ITWM / Bereich MF

## Simulation von Kabeln und Schläuchen - IPS Cable Simulation

- Schnelle und physikalisch korrekte Simulation großer nichtlinearer Deformationen
- Anwendungsfokus: Interaktive Simulation von Konstruktion, Montage und Betrieb von Kabeln und Schläuchen
- Produktivität: Software in CAD/DMU/CAE Kontext mit vielen Modellierungsfeatures (Verbindungen, Verzweigungen, Clips, Kontaktmodellierung,...)
- Forschung / Methodenentwicklung: Dynamik, Plastizität, Betriebsfestigkeit, flächige Strukturen,...



# Fraunhofer ITWM / Bereich MF

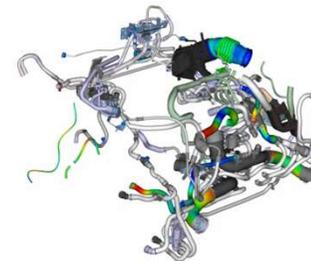
## Simulation von Kabeln und Schläuchen - IPS Cable Simulation



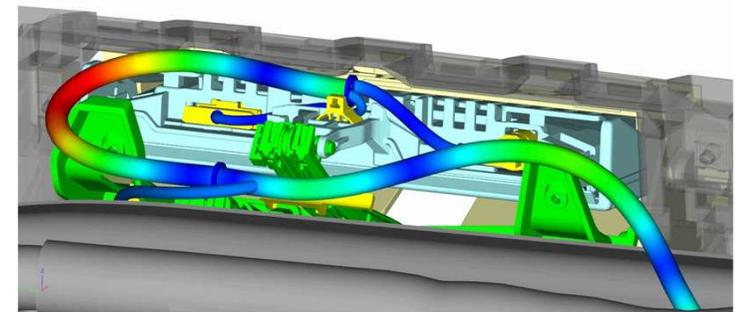
**IPS Cable Simulation** - *Seit 2005 Entwicklung bei Fraunhofer (ITWM+FCC), seit 2012 Vertrieb und Kundenbetreuung weltweit durch flexstructures GmbH*

### Features

- Physikalisch korrekte Bewegung und Verformung von Schläuchen, Kabeln und Kabelbäumen
- IPS Cable Simulation unterstützt
  - Geometrie / Bauraum,
  - produktionstechnischer Aspekte sowie
  - des Betriebsverhaltensunterstützen
- Die Software ist hoch performant und ermöglicht interaktive Echtzeit-Simulationen.



Models courtesy of Volvo Cars



<https://www.itwm.fraunhofer.de/de/abteilungen/mf/kabel-schlaeuche-flexible-strukturen>  
<https://flexstructures.com>

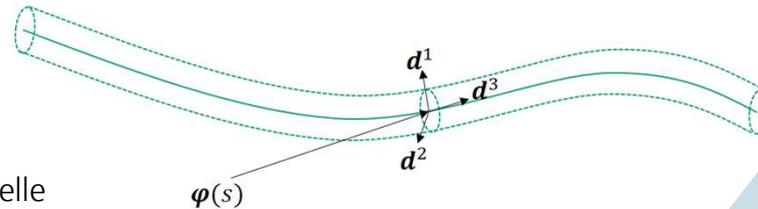


# Simulation von Kabeln und Schläuchen

## - IPS Cable Simulation

### IPS Cable Simulation

- Geometrisch nichtlineare Balkenmodelle
- D.h. nichtlineare Dehnungsgrößen
  - Biege- und Torsions-Krümmungen
  - Zug- und Scher-Dehnungen
- Potentielle Energie



$$\mathbf{K} = 2\bar{\mathbf{p}} \circ \partial_s \mathbf{p} - \mathbf{K}_0$$

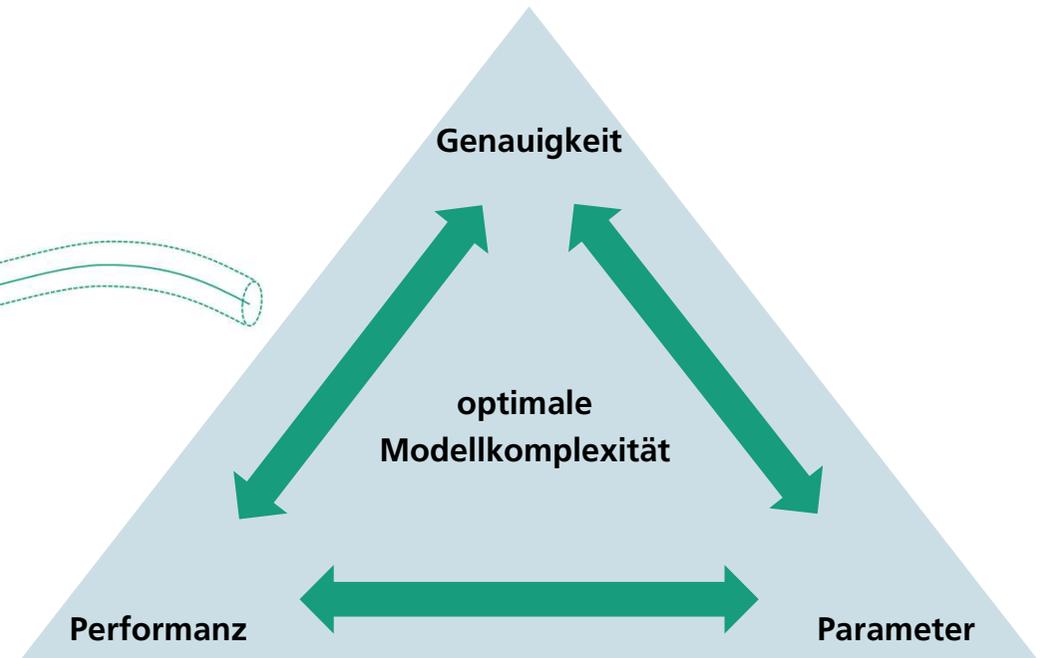
$$\mathbf{\Gamma} = \bar{\mathbf{p}} \circ \partial_s \boldsymbol{\varphi} \circ \mathbf{p} - \mathbf{e}^3$$

$$\mathcal{W}_{pot} = \frac{1}{2} \int_0^L \mathbf{K}^T \begin{pmatrix} [EI] & & \\ & [EI] & \\ & & [GJ] \end{pmatrix} \mathbf{K} ds + \frac{1}{2} \int_0^L \mathbf{\Gamma}^T \begin{pmatrix} [GA] & & \\ & [GA] & \\ & & [EA] \end{pmatrix} \mathbf{\Gamma} ds - \int_0^L [\rho A] g_0 \langle \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{e}^3 \rangle ds$$

- mit effektiven mechanischen Parametern \$[EI], [GJ], [\rho A], \dots\$

### Vorteile

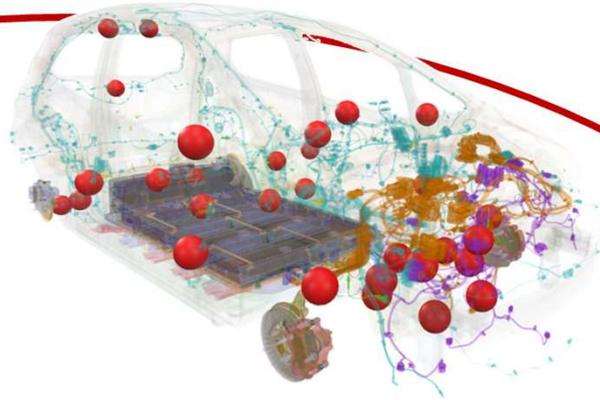
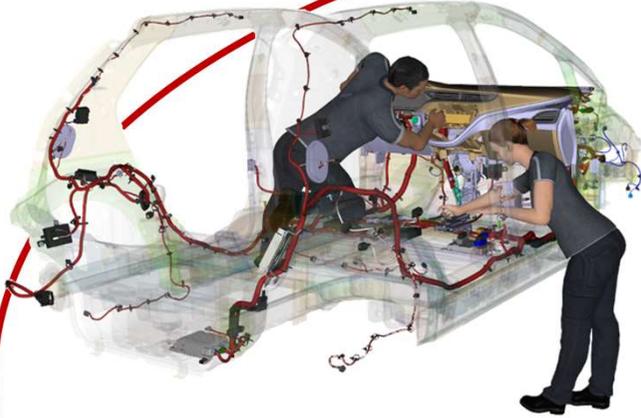
- Einfacher Modell-Aufbau, schlanker Parametersatz
- Schnelle Berechnung (echtzeitfähig)



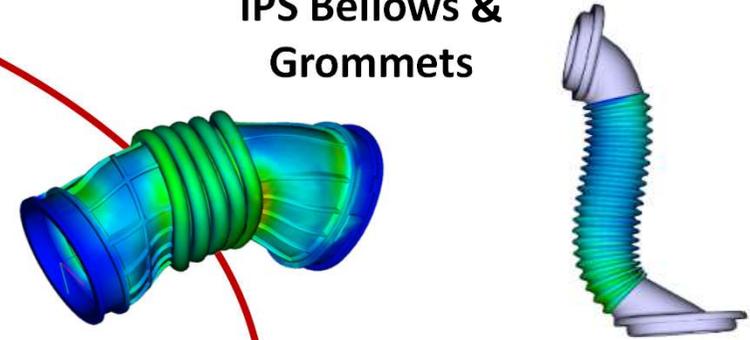
# IPS Product Portfolio

## IPS Cable Simulation

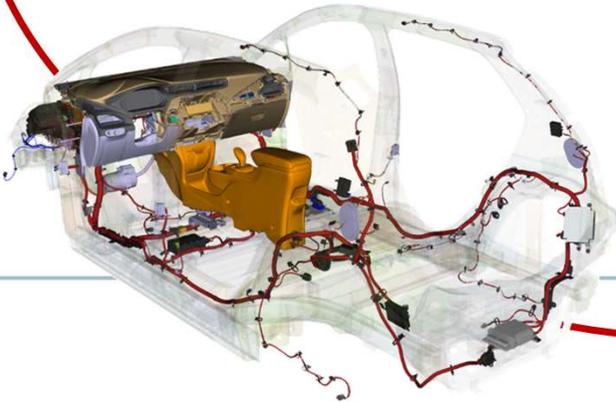
IPS IMMA



IPS Bellows & Grommets



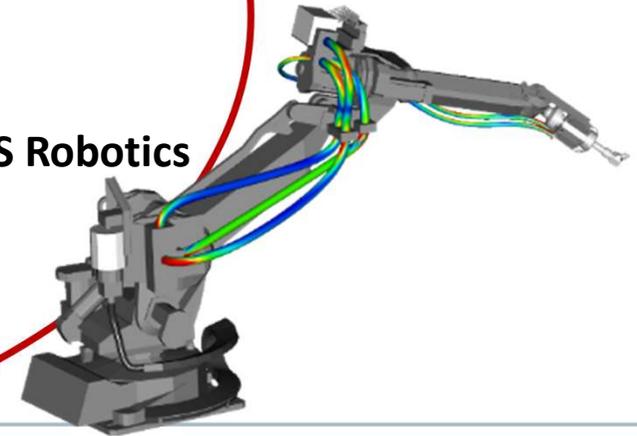
IPS Path Planner



IPS Virtual Reality



IPS Robotics



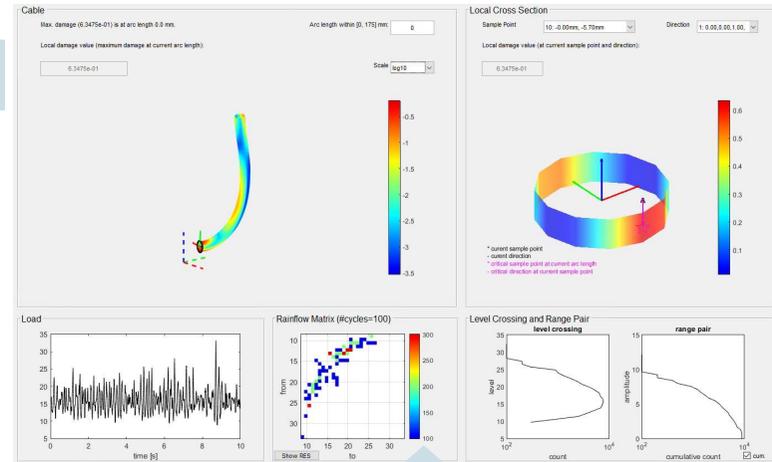
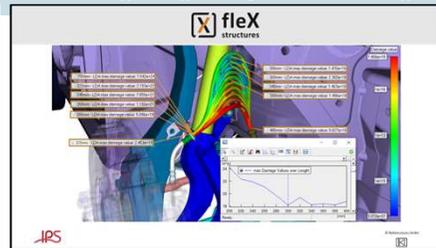
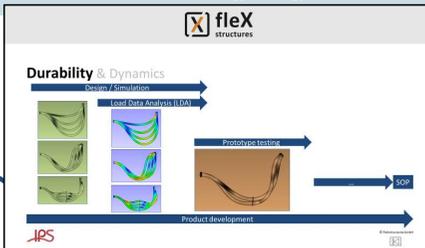
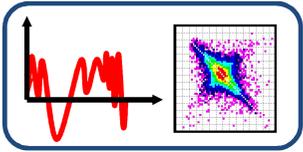
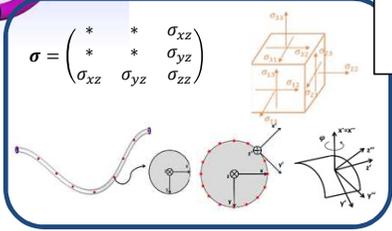
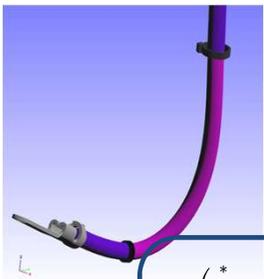
---

## Betriebsfestigkeit von Kabeln

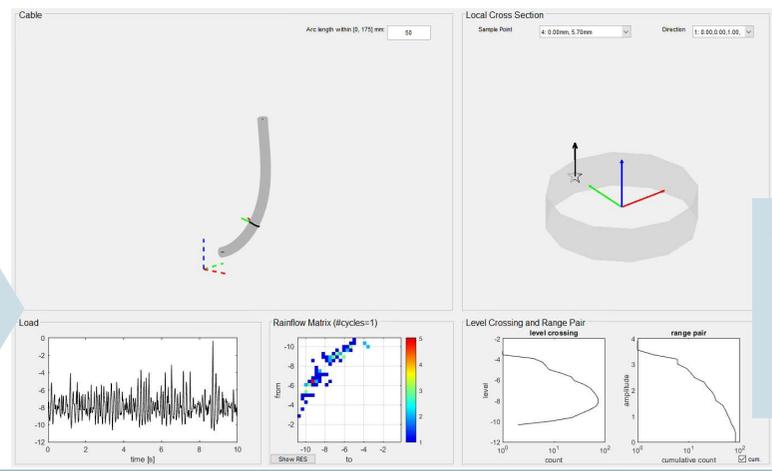
- Vergleichende Beanspruchungsanalyse
- Absolute Vorhersagen (mit Kabel-Wöhlerlinien)

# Kabel-Simulation und Beanspruchungsanalyse

## Vergleiche Pseudo-Schädigungen zwecks Verlegungs-Optimierung

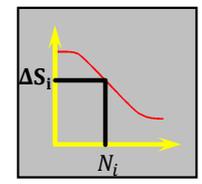


- Simuliere lokale Lasten
- Berechne Vergleichsspannung ("stress recovery")
- Zähle Lastzyklen



### Schädigungsrechnung

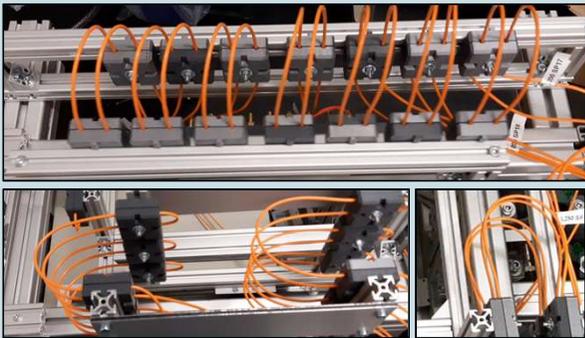
- $$D = \sum_l D^{(l)} = \sum_l n^{(l)} \frac{1}{N_0} \left( \frac{S^{(l)} + M \cdot S_m^{(l)}}{S_0} \right)^k$$
- Mit generischer Wöhlerkurve



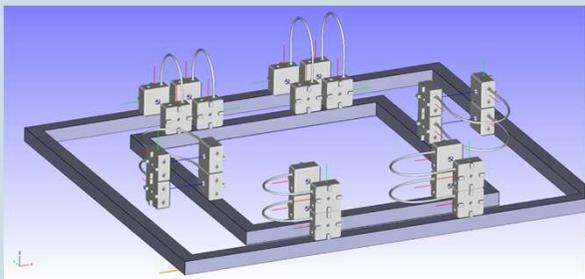
# Kabel-Simulation und absolute Lebensdauer-Vorhersage

## Ermittlung einer Kabel-Wöhlerkurve

### Reale Lebensdauer-Versuche



### Virtuelle Lebensdauer-Versuche



To vanishing mean load (amplitude correction):

$$S_{ij}^{(l)} \rightarrow \tilde{S}_{ij}^{(l)} = S_{ij}^{(l)} + M \cdot S_{m,ij}^{(l)}$$

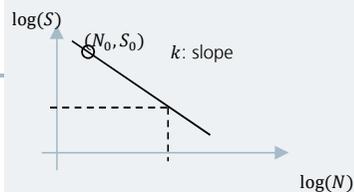
To constant amplitude load (equivalent load):

$$N_{ij}^{(l)} \rightarrow N_{ij} = \sum_l N_{ij}^{(l)} \text{ and } \tilde{S}_{ij}^{(l)} \rightarrow S_{ij} = \left( \frac{\sum_l N_{ij}^{(l)} (\tilde{S}_{ij}^{(l)})^k}{N_{ij}} \right)^{\frac{1}{k}}$$

To maximum damage:  
( $N_{ij}, S_{ij}$ )  $\rightarrow$  ( $N_i, S_i$ )

$$\text{Ansatz } \log(N_i) = \log(N_0) - k(\log(S_i) - \log(S_0)) + \varepsilon_i$$

- Residuum  $\varepsilon_i$  mit Standardabweichung  $\sigma$
- $\rightarrow$  Unbekannte Parameter  $k, M, N_0$  and  $\sigma$

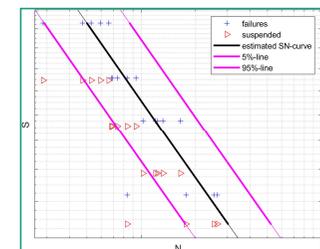
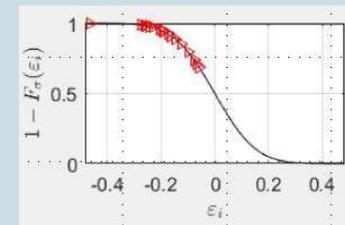
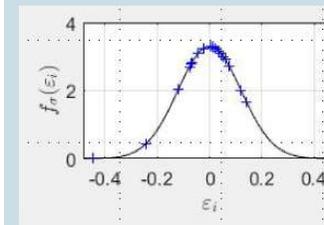


Parameter-Ermittlung: **Maximum Likelihood Schätzer**

- Likelihood Funktion

$$L = \prod_{\text{Failures}} f_{\sigma}(\varepsilon_i) \cdot \prod_{\text{Suspended}} (1 - F_{\sigma}(\varepsilon_i)),$$

- mit Dichte  $f_{\sigma}$  des Residuums  $\varepsilon_i$
- und Verteilung  $F_{\sigma}$  des Residuums  $\varepsilon_i$

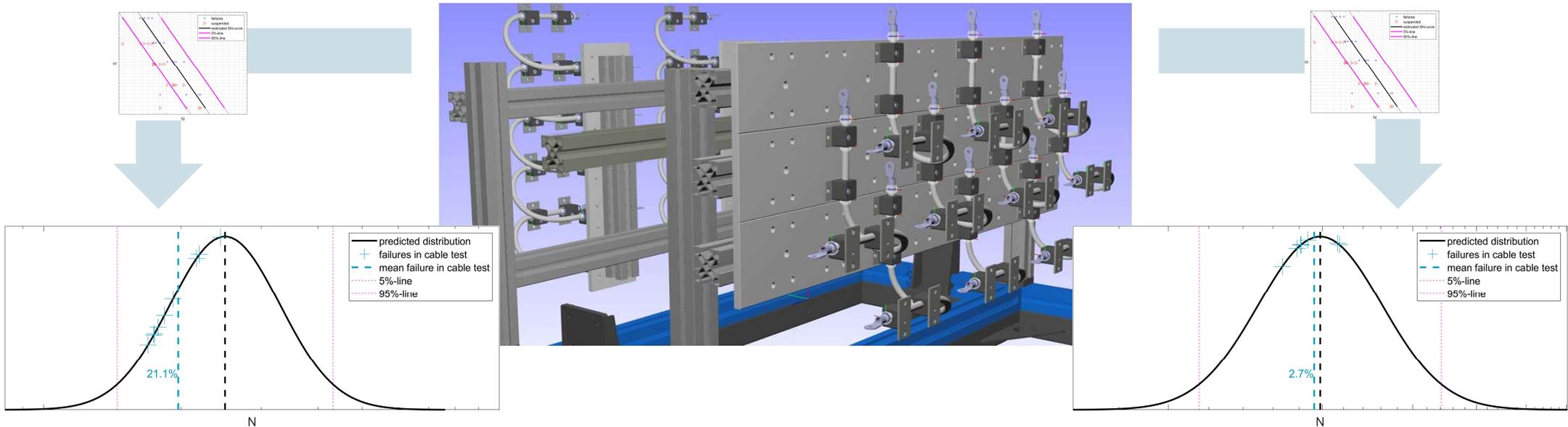
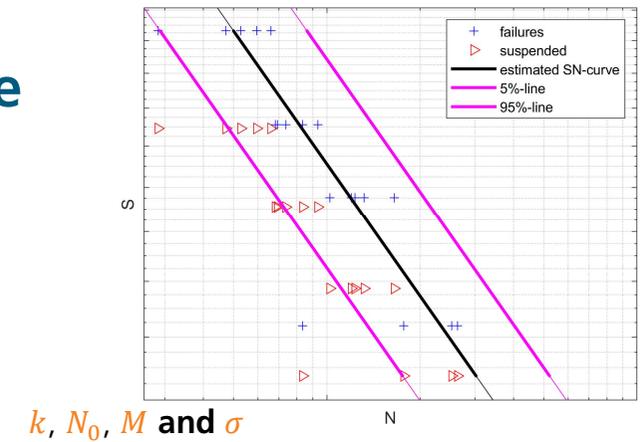


# Kabel-Simulation und absolute Lebensdauer-Vorhersage

## Validierung

### Vorhersage für zuvor nicht geprüfte Kabel-Führung

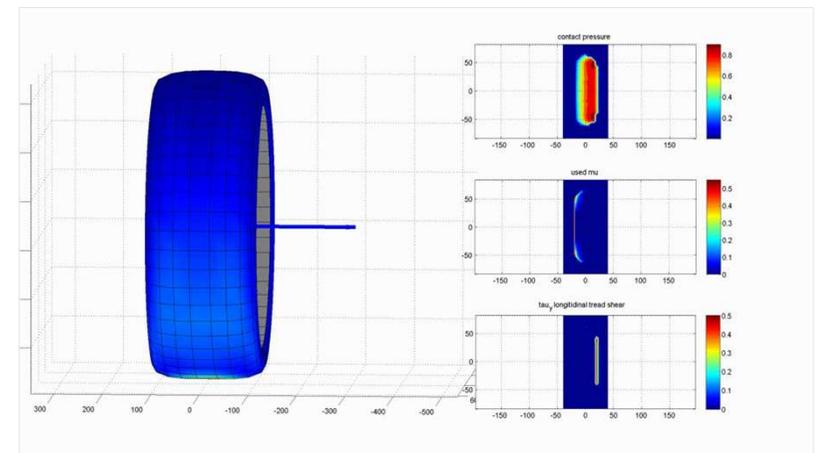
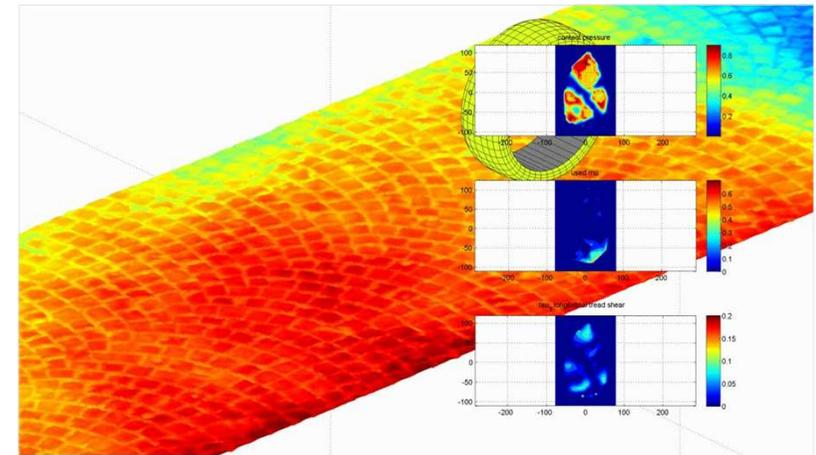
- Validierungs-Kampagne durch Gebauer & Griller Kabelwerke



# Fraunhofer ITWM / Bereich MF CDTire

## ■ Anwendungen

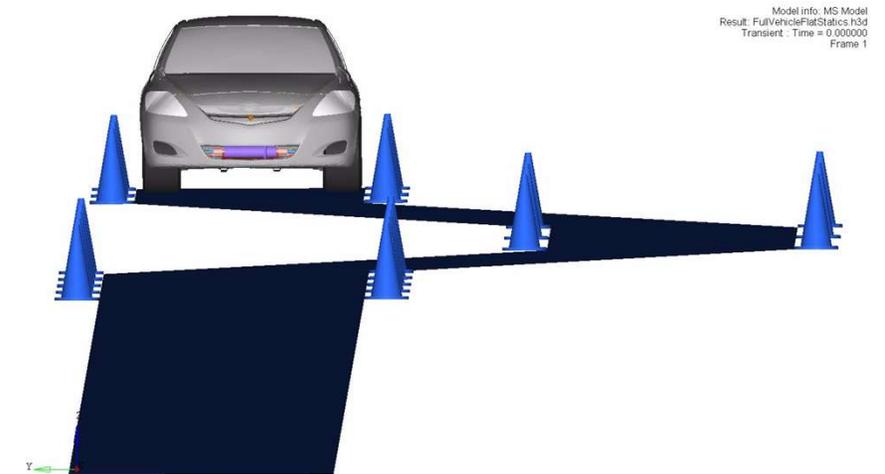
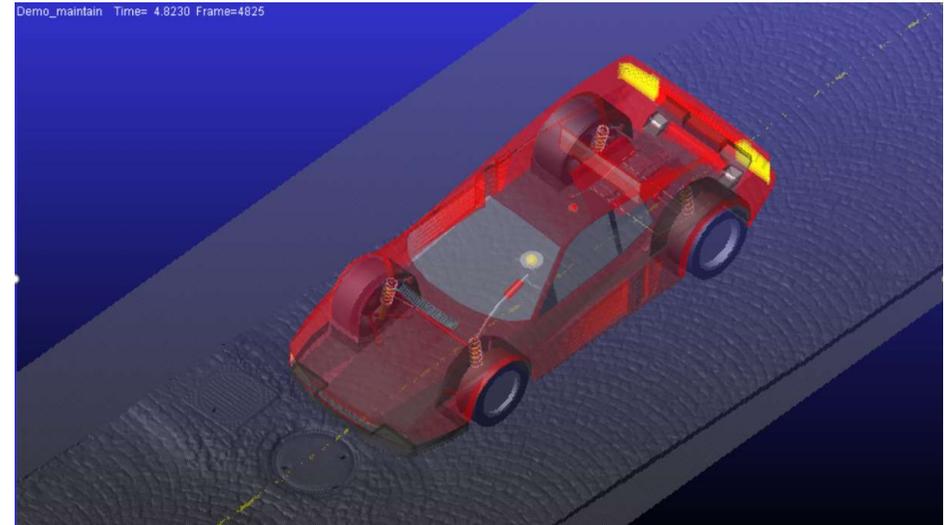
- Fahrdynamik, Komfort, NVH & Betriebsfestigkeit
- Rollwiderstand und Abrieb
- Missbrauch
- Zustandsänderungen: z.B. plötzlicher Druckverlust



# Introduction

## CDTire: a plug-in into various CAE tools

- Altair **MotionSolve**
- Altair **NVH Director / OptiStruct**
- Dassault Systemes **SIMULIA/Simpack**
- IPG **CarMaker**
- MathWorks **MATLAB / Simulink**
- Mechanical Simulation **CarSim**
- MSC **Adams**
- MSC **Nastran**
- Siemens Simcenter **Samcef**
- Siemens Simcenter **3D Motion**
- VI-grade **VI-CarRealTime**



# Introduction

## CDTire models and toolboxes

### Mechanical models

- CDTire/3D detailed shell-based 3D structural model
- CDTire/Realtime hard real time model with obstacle enveloping
- CDTire/MF++ enhanced Magic Formula with temperature effects

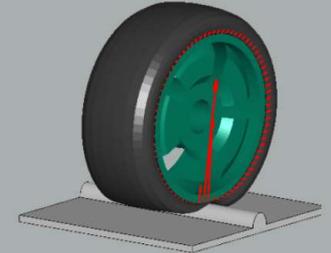
### Thermo-dynamical model

- CDTire/Thermal 3D thermo-dynamical model for temperature propagation

### Toolboxes

- CDTire/PI generates CDTire/3D and CDTire/Realtime models
- CDTire/NVH derives linear models with rotational effects from CDTire/3D
- CDTire2MF derives MF models from CDTire/3D
- CDTire2RT derives CDTire/Realtime models from CDTire/3D

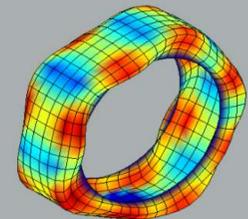
Local rim forces prediction



Thermo-mechanical model



NVH: Linearization of rolling tires

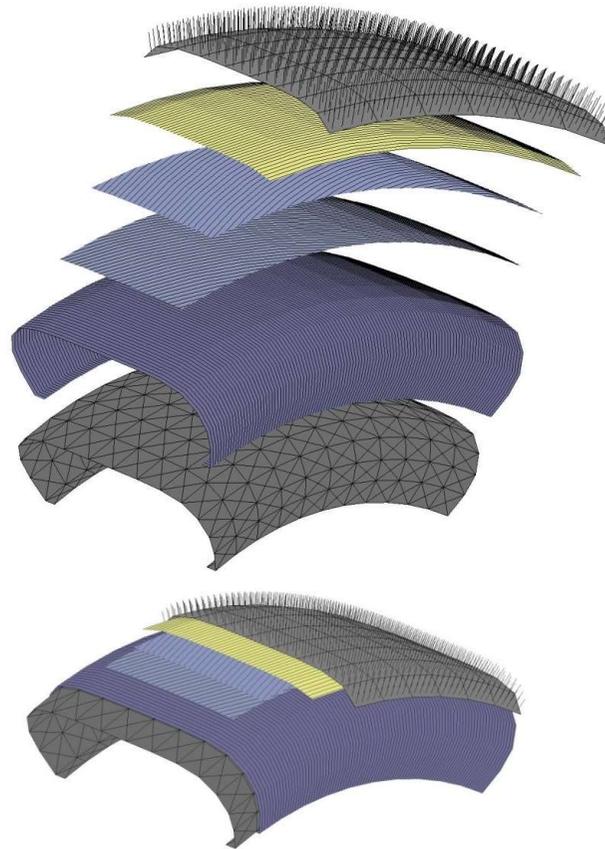


# CDTire/3D

## The base tire model of our tool chain

- Functional layer modeling

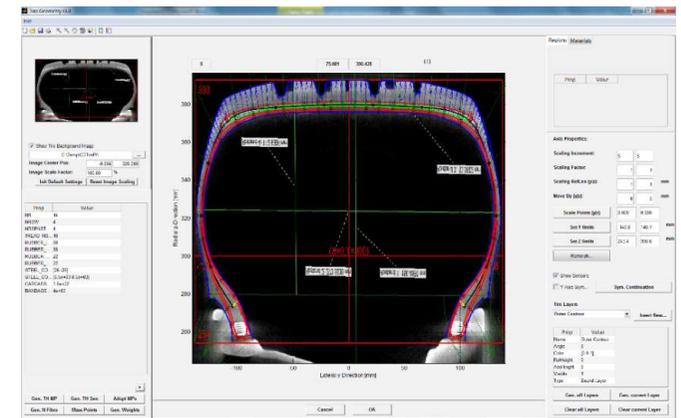
- Tread (brush type)
- Cap ply
- Belt 1
- Belt 2
- Carcass
- Innerliner + matrix



- Condensed into one shell

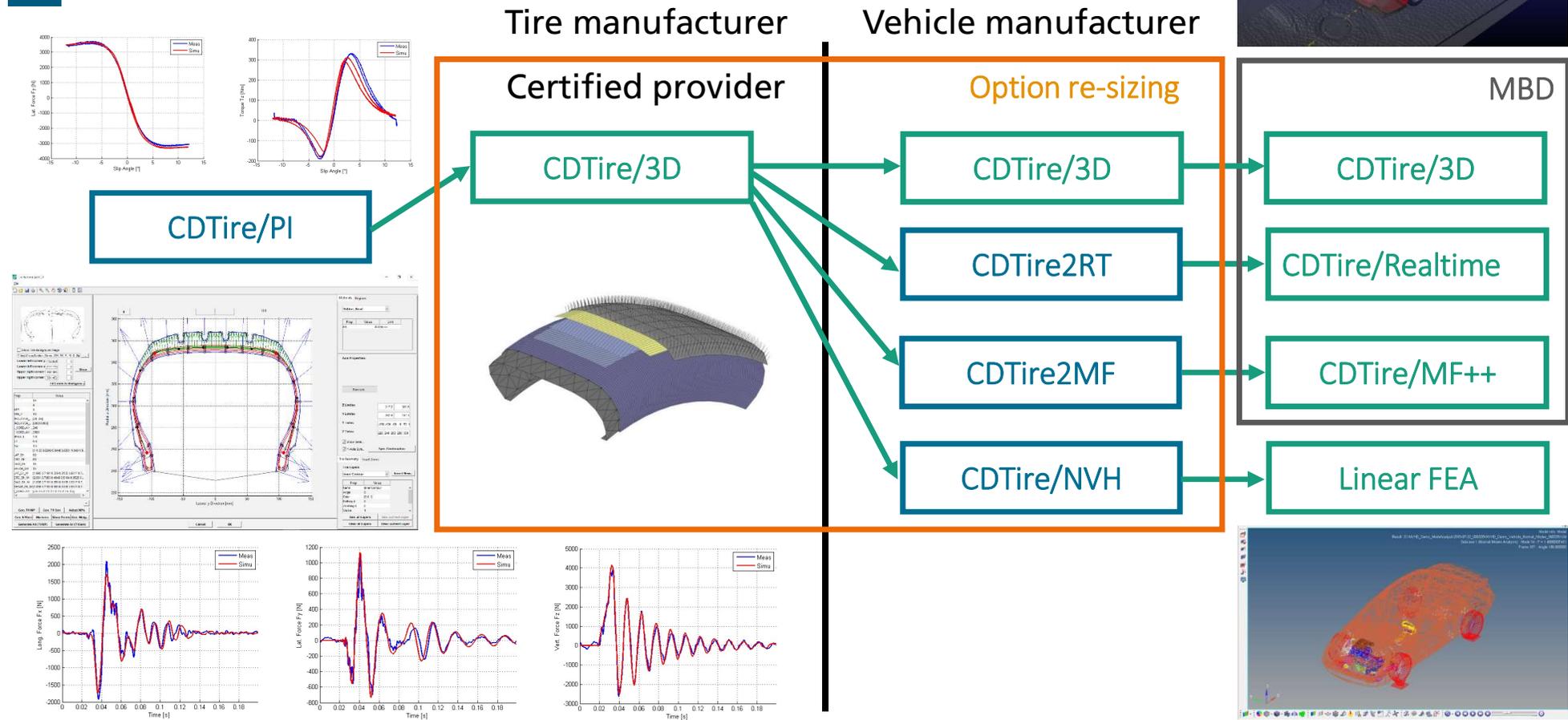
- Highlights

- Bead to bead inflation pressure application
- Strict separation of material and geometry
- Re-mounting / re-sizing



# CDTire tool chain for fast virtual prototyping

## In a nutshell: one base model can cover all applications



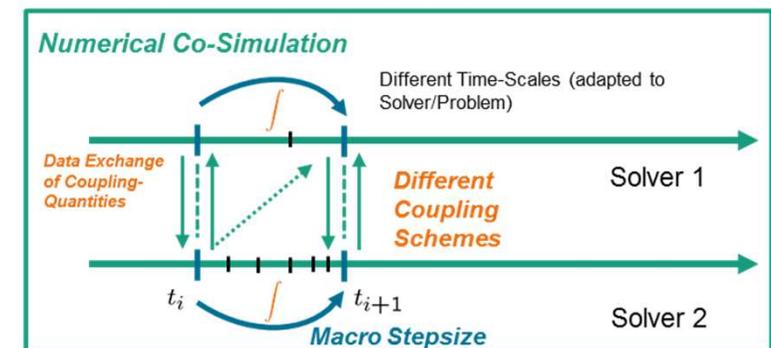
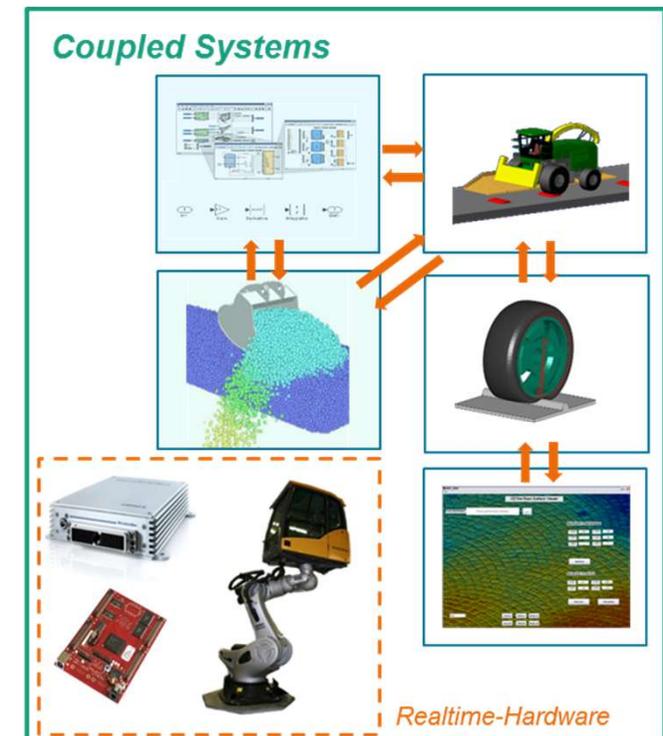
---

# Coupled System Simulation / Simulator RODOS

# Coupling Systems and Solvers

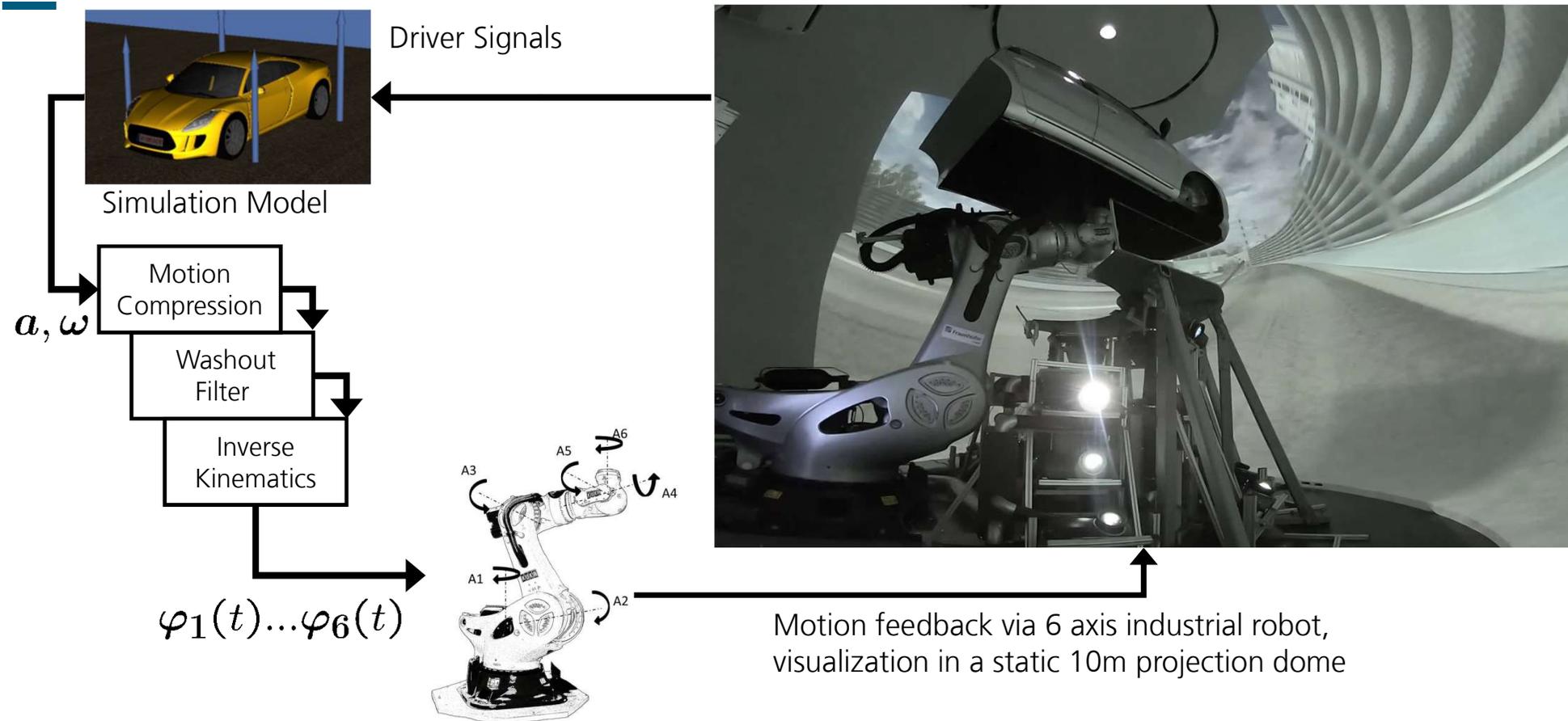
## »Co-Simulation« – ITWM/MF Activities

- **Simulation methods and frameworks** for system coupling and co-simulation of different models from different domains (»multi-physics«) and of different nature - potentially with real hardware as well.
- **Coupling with Hardware – Application Fields:**
  - HiL-/SiL-/MiL-/.... Tests
  - Interactive Simulations
  - Monitoring and Predictive Maintenance (on-board)
- **Numerical methods** for
  - different coupling-schemes, inter-/extrapolation, stabilization-strategies, macro-stepsize-control, parallelization
- **Software-coupling** of domain-specific simulation tools



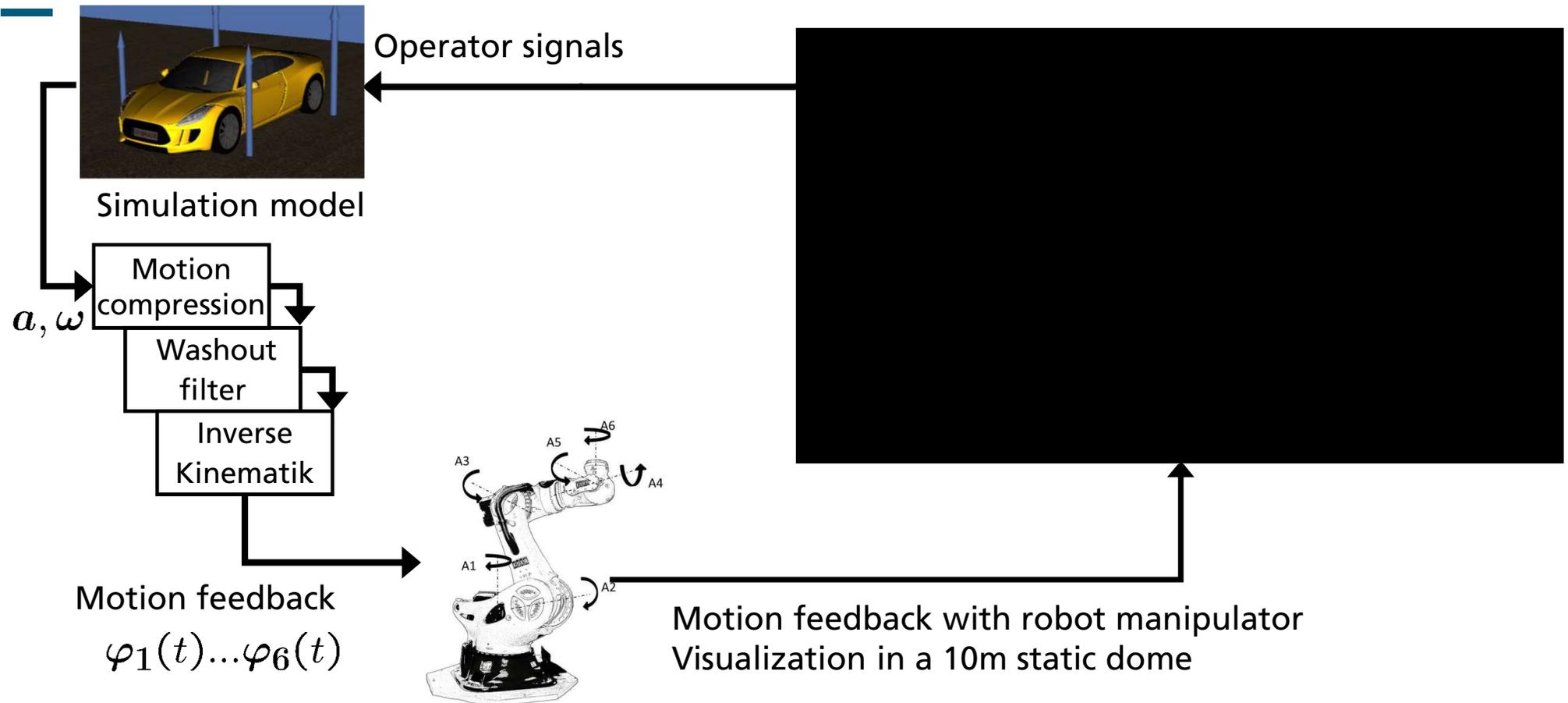
# Interactive Driving Simulation – ITWM’s RODOS®

Co-Simulation @ RODOS®

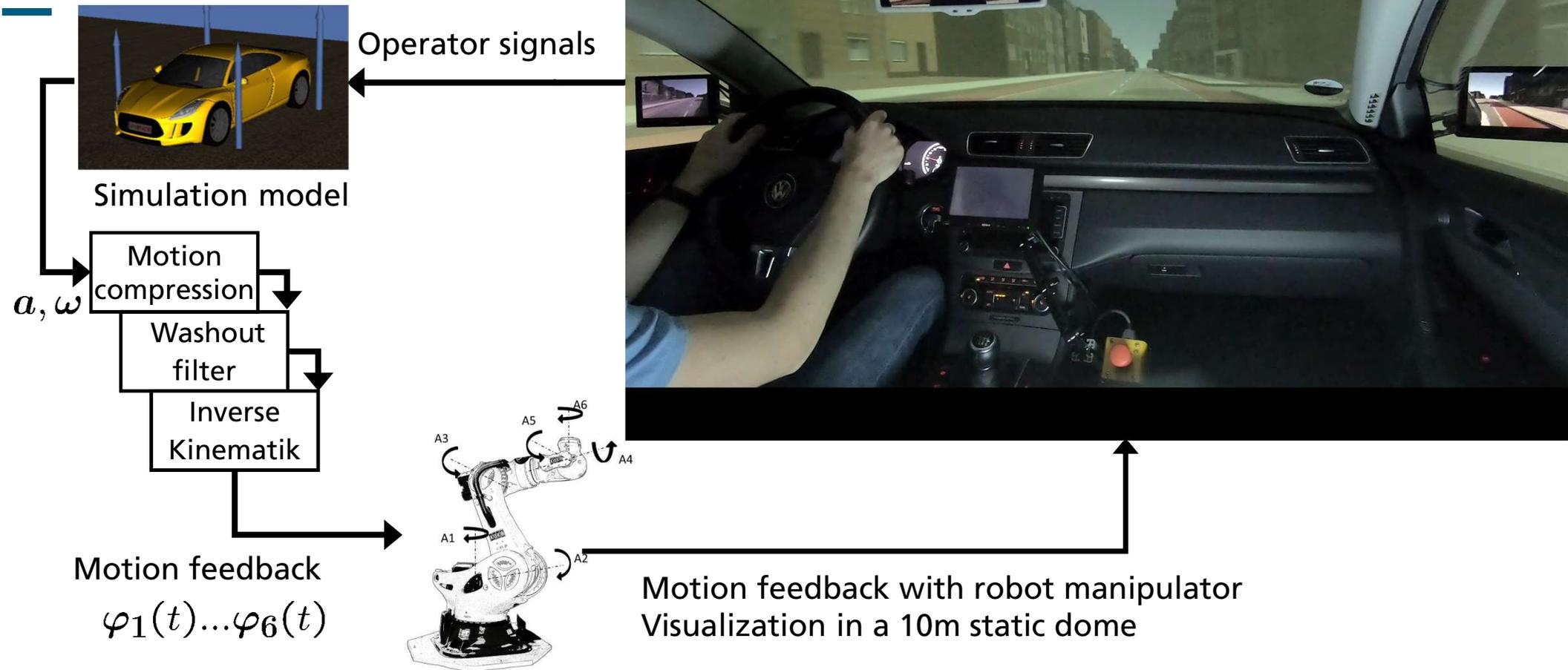


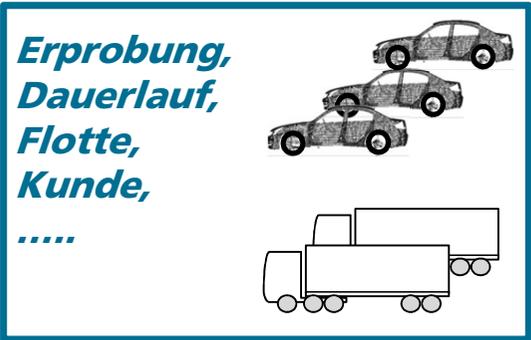
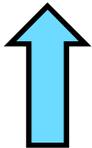
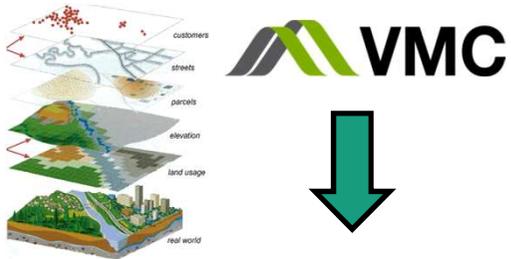
# Interactive Driving Simulation – ITWM’s RODOS®

Co-Simulation @ RODOS®



# RODOS / interactive simulation



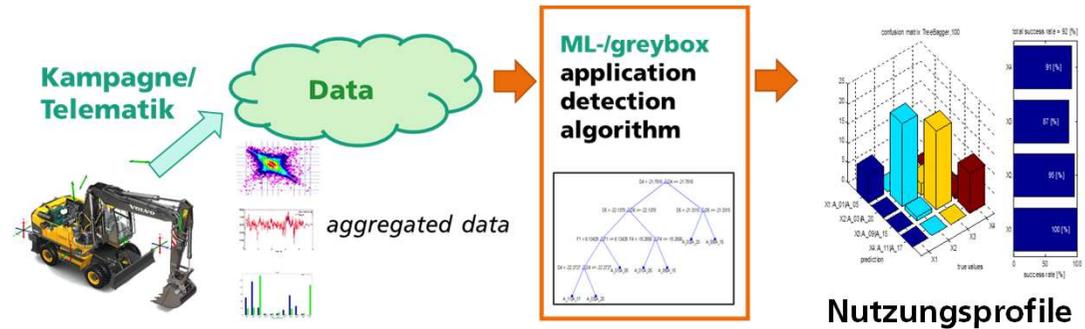
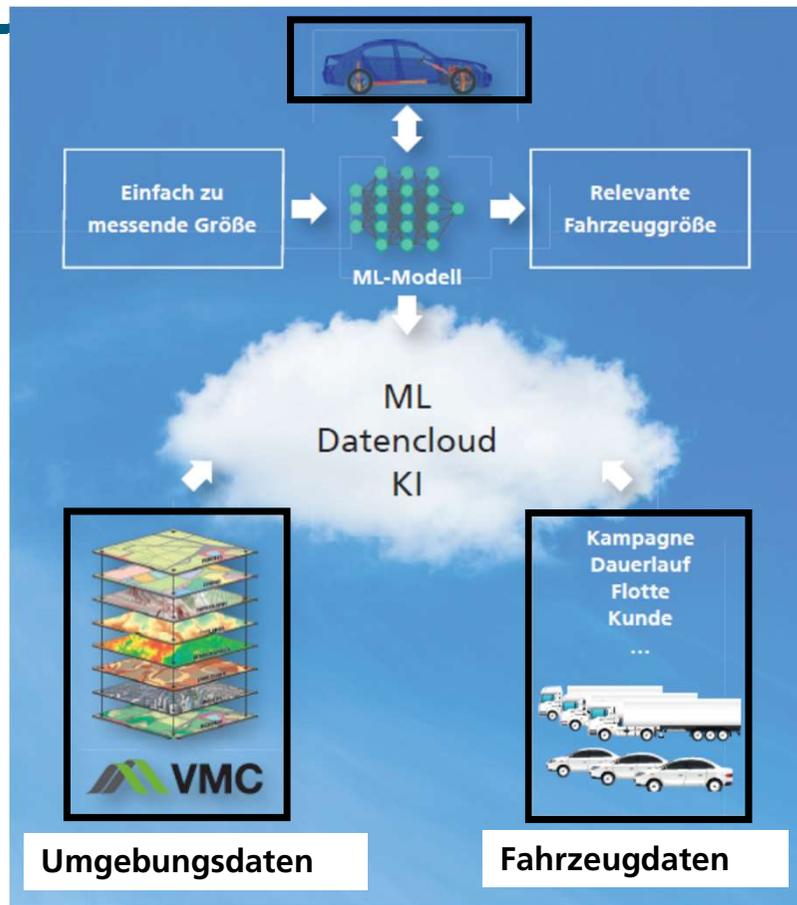


## Beispiele / Aktivitäten am ITWM

- ML-Modelle zur Applikationsklassifikation und Erkennung
- Approximation dynamischer Fahrzeugsysteme
- Datenbasierte Ersatzmodelle zur Effizienzsteigerung
- Bayes'sche Modellierung zur Nutzung von Vorerfahrung in der Erprobung / Absicherung
- ...

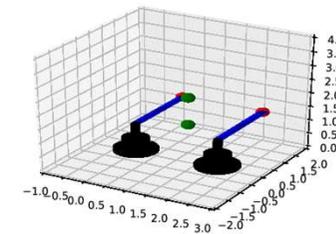
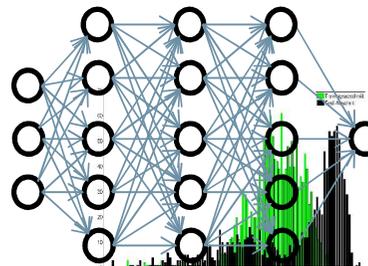


# Machine Learning damit die Maschine hält! KI in der Fahrzeugentwicklung



$$x_t = A \cdot x_{t-1} + B \cdot u_{t-1} + \zeta(x_t, u_t)$$

$$y_t = C \cdot x_t + D \cdot u_t + \eta(x_t, u_t)$$



# Herausforderung: Weil die Produktion streut, ist der Zuverlässigkeitsnachweis teuer

Zuverlässigkeit von Systemen & Komponenten im ppm-Bereich

## Streuende Produktion

- Keine Null-Fehler-Teile
- Six Sigma
- FMEA: Viele Ausfallstellen/-Ursachen
- Verschiedene Fahrzeugkonfigurationen

## Teurer Zuverlässigkeitsnachweis

- Frühe Prototypen sind teuer
- Viele Bauteile und lange Prüfdauern notwendig



# Um den Nachweis effizient zu planen, müssen viele Fragen beantwortet werden

Zuverlässigkeit von  
Systemen &  
Komponenten  
im ppm-Bereich

## Fragen zum effizienten Nachweis

*„Wie viele Prototypen müssen getestet werden?“*

*„... bis zu welcher Prüfdauer?“*

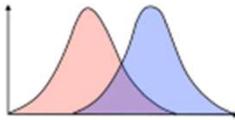
*„Lieber viele kurze oder wenige lange Versuche?“*

*„Wie geht man mit Durchläufern um?“*

Usw.

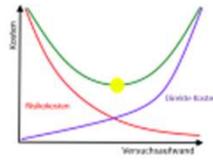


# Weitere Informationen zu Jurojin



Modul  
**AUSLEGUNG GEGEN VARIABLE LASTEN**

© Fraunhofer ITWM  
12



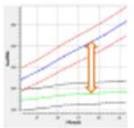
Modul  
**VERSUCHSPLANUNG  
& RELIABILITY DEMONSTRATION**

© Fraunhofer ITWM  
13



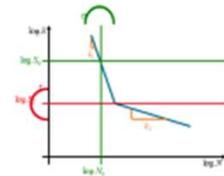
Modul  
**RELIABILITY ESTIMATION**

© Fraunhofer ITWM  
14



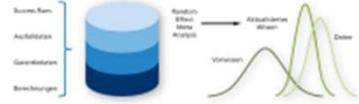
Modul  
**GARANTIEDATENANALYSE**

© Fraunhofer ITWM  
15



Modul  
**WÖHLERAUSWERTUNGEN**

© Fraunhofer ITWM  
16



Modul  
**NUTZUNG VON VORERFAHRUNG**

© Fraunhofer ITWM  
17



Weitere Informationen finden Sie unter:

[www.itwm.fraunhofer.de/jurojin](http://www.itwm.fraunhofer.de/jurojin)

Offen

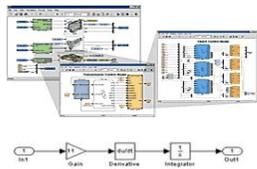




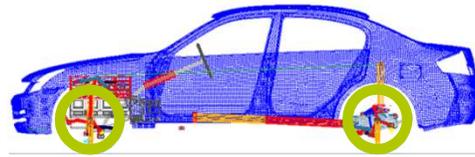
---

# Nutzungsvariabilität und Umgebungsdaten

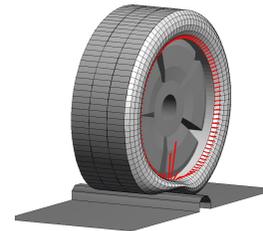
# Digitale Umgebungsdaten für die Fahrzeugentwicklung



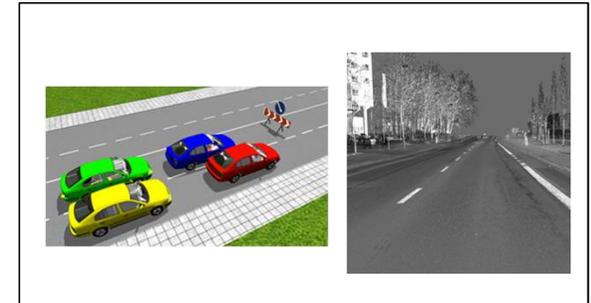
Fahrer (virtuell oder real)



Fahrzeug



Reifen



Umgebung / Straße / Verkehr

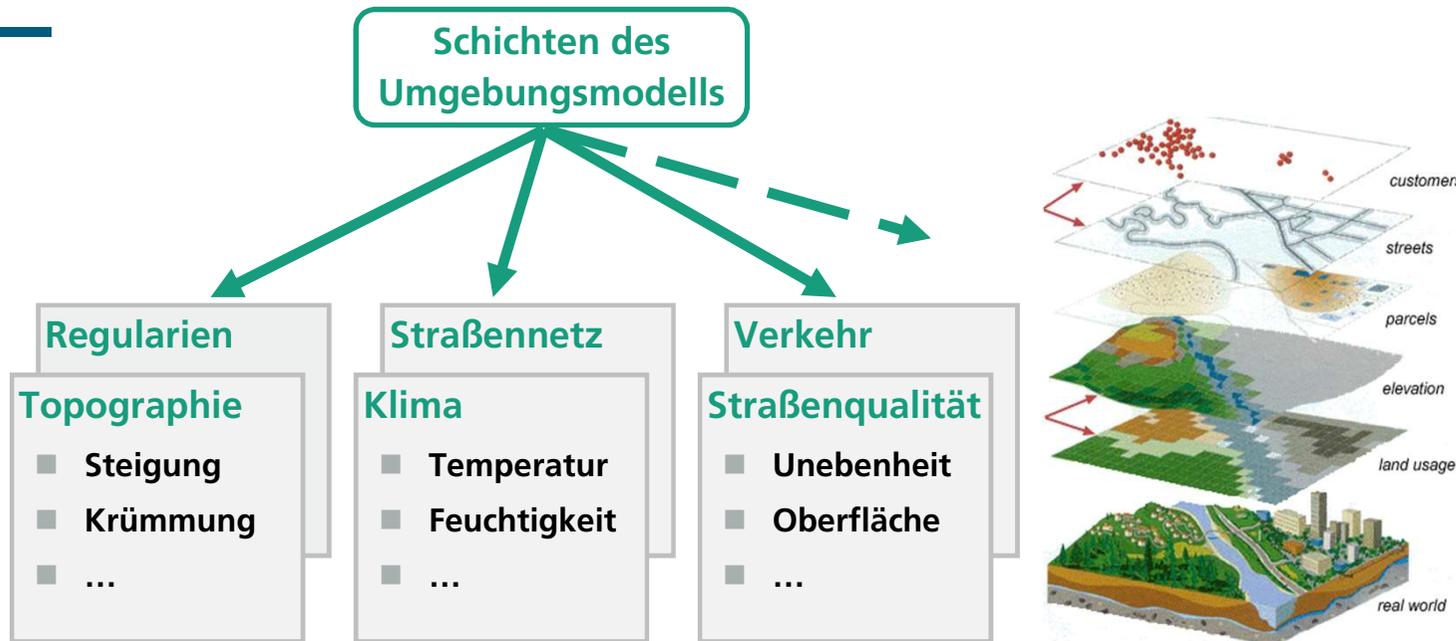
Nutzungs- und Umgebungsdaten:

- „Was kommt alles vor?“
- „Und wie häufig?“



→ Statistisch valide Absicherung von Betriebsfestigkeit, Energieeffizienz und automatisierten Fahrfunktionen

# VMC® - Virtual Measurement Campaign



**VMC**  
**GeoStatistics**

Statistische Analyse von Regionen und Routen

**VMC**  
**GeoLDA**

Geo-referenzierte Lastdatenanalyse

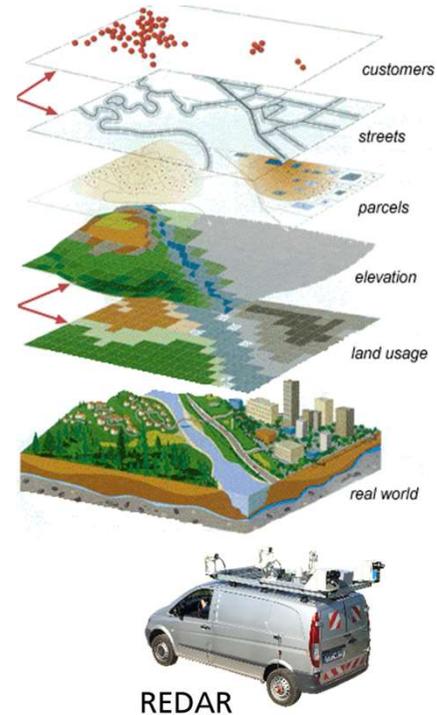
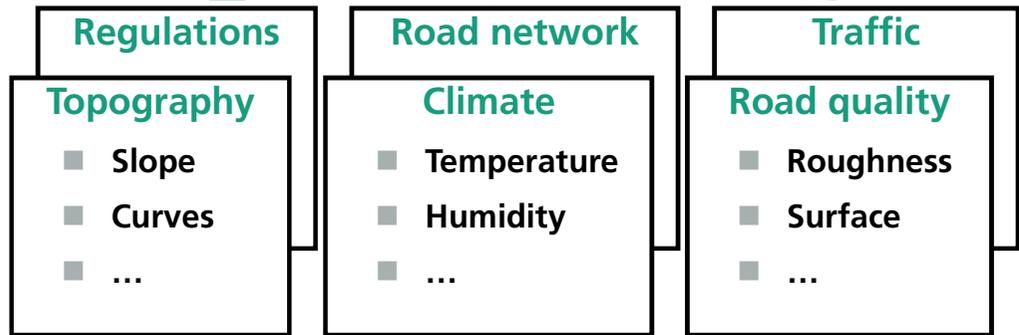
**U-Sim**

Simulation der Beanspruchungsverteilung über Nutzungsarten und Ableitung von Testszenarien

Datenquellen in VMC u.a.: OpenStreetMap, HERE Technologies; ASTER Global Digital Elevation Model, NASA SRTM, DLR and Airbus TanDEM-X Mission; University of East Anglia, Norwich(UK), University of California WorldClim - Global Climate Data; Swedish Transport Administration (Trafikverket); Finnish Transport Agency, Finnish Transport Agency, "Bundesanstalt für Straßenwesen" (BASt), Fraunhofer ITWM measurements, 3D Mapping Solutions GmbH ; Government of South Australia, Government of Western Australia, Department of Transport, Government of Victoria/Australia, Government of Queensland/Australia, Government of Northern Territory/Australia, New Zealand Transport Agency;...

<https://www.itwm.fraunhofer.de/de/abteilungen/mf/digitale-umgebungsdaten>  
<https://www.itwm.fraunhofer.de/de/abteilungen/mf/produkte-und-leistungen/vmc>

# VMC® - Virtual Measurement Campaign



**VMC GeoStatistics**  
statistics of regions & routes

**VMC GeoLDA**  
Load data analysis with geo-data

**U-Sim**  
usage simulation, statistics and derivation of test schedules

**VMC LinTim**  
Lineplanning and Timetabling

**VMC MicroTraffic**  
Dynamic and stochastic traffic simulation on complex road networks

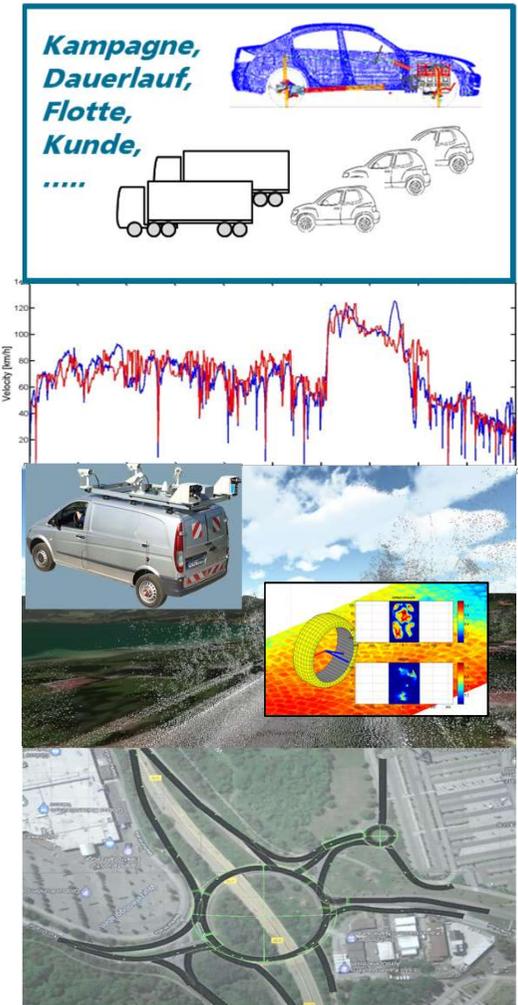
**VMC Road & Scene Generator**  
Roads, routes, environments and scenes for vehicle engineering

**VMC Simulation**  
Road-profiles, speed-profiles, energy consumption, emission and loads

# Nutzungsvariabilität und Umgebungsdaten



- Nutzung von **Betriebsdaten und geo-referenzierten Umgebungsdaten**
  - geo-referenzierte Datenanalyse & Nutzungsvariabilität - VMC®, USIM
  - Simulation der Nutzungsstatistik: **'was passiert und wie oft'**
  - Geo-referenzierte **Betriebsfestigkeits-LDA**
  - Planung und Auswertung von Messkampagnen
  - Ableitung **statistisch abgesicherter Prüfscenarien**
- Simulation von Fahrzeugnutzung und Verkehrssystemen - **VMC® Simulation**
  - Nutzungsbezogener Energiebedarf und **Energieeffizienz**
  - Systemzuverlässigkeit (virtuelle Szenarien, **Absicherung von Assistenzsystemen und autonomer Fahrfunktionen**)
  - Optimierung der **Betriebsstrategie**
    - Fahrzeuge, Vernetzung und Infrastruktur
  - **Verkehrssystemoptimierung** und **Mobilitätskonzepte**



Offen

