



# MATHEMATISCHE METHODEN IN DYNAMIK UND FESTIGKEIT



Interaktiver Simulator RODOS® mit montierter PKW-Kabine. Das verwendete Simulationsszenario basiert auf 3D-Laserscanner-Messdaten, aufgezeichnet mit REDAR. Mit diesem Aufbau werden Assistenz- und Automatisierungslösungen für PKW entwickelt und erprobt. Die Testfahrer erleben eine hoch immersive virtuelle Umgebung und können darin auch riskante Manöver durchführen. Verglichen mit Feldtests ist die Reproduzierbarkeit im Simulator hervorragend.



---

Die Abteilung beschäftigt sich mit der Modellierung und Simulation von Nutzungsvariabilität, Betriebsfestigkeit, Energieverbrauch und Emission von Fahrzeugen. Für diese Attribute ergibt sich die Schwierigkeit, dass höchst unterschiedliche zeitlich variable Vorgänge simuliert und zur Bewertung geeignet akkumuliert werden müssen. Hierfür muss man nicht nur das Fahrzeug selbst, sondern auch seine ‚Randbedingungen‘ oder seine ‚Wechselwirkung mit dem Rest der Welt‘ abbilden. Im Einzelnen braucht man zusätzlich zu den CAE-Fahrzeugmodellen auch gute Modelle für das Straßennetz, die Topographie, die Straßenbeschaffenheit, Verkehr, Reifen und Fahrerverhalten. Unter dem Aspekt der Absicherung betrifft diese Herausforderung in besonderem Maße auch die Ableitung und Qualifikation geeigneter (virtueller und physikalischer) Erprobungskonzepte, die der Variabilität der Beanspruchungen, Verbräuche und Emissionen im realen Betrieb gerecht werden. Seit 2007 widmet sich die Abteilung dieser Problematik systematisch im Fraunhofer-Innovationscluster »FUMI – Fahrzeug-Umwelt-Mensch Interaktion«, der nun seit 2016 in das Fraunhofer-Leistungszentrum »Simulations- und Software-basierte Innovation« integriert ist.

Darüber hinaus entwickeln wir neue Simulationsmethoden und Software zur produktionstechnischen Absicherung von Fahrzeugen. Hier arbeiten wir seit langem mit dem Fraunhofer-Chalmers Centre FCC an der Entwicklung von Software zur interaktiven Simulation von Kabeln und Schläuchen (IPS Cable Simulation) sowie zur ergonomischen Analyse dynamischer menschlicher Bewegungen.

## **SCHWERPUNKTE**

- Modellierung und Simulation der Nutzungsvariabilität in der Fahrzeugentwicklung (VMC®/U-Sim)
- Simulation der Fahrzeug-Umwelt-Mensch Interaktion
  - Reifen- und Gesamtfahrzeugsimulation (CDTire)
  - Interaktive Simulation/Simulator RODOS®
- Simulation von Kabeln und Schläuchen (IPS Cable Simulation)
- Simulation dynamischer menschlicher Bewegung: MAVO-Projekt »Ergo-dynamic Moving Manikin with Cognitive Control«

---

### **Kontakt**

klaus.dressler@itwm.fraunhofer.de  
www.itwm.fraunhofer.de/mdf





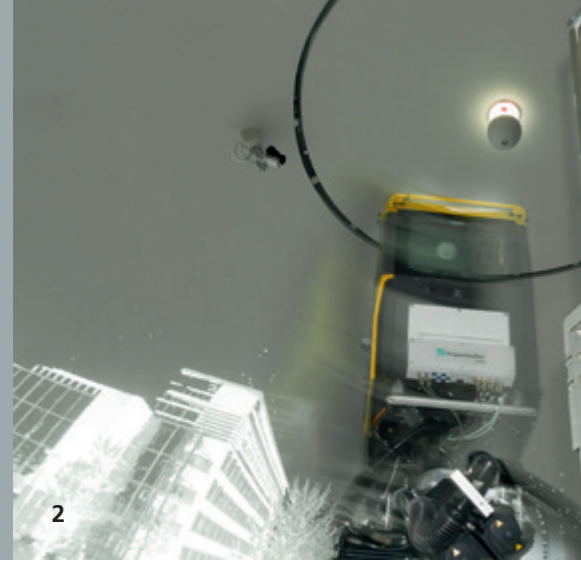
## MODELLIERUNG DER NUTZUNGSVARIABILITÄT VON FAHRZEUGEN MIT VMC®

**1** *Automatisch generierter Routenverlauf einer Pendlerstrecke: In rot sind die direkten Verbindungslinien des Start- und Endpunkts sowie ein Zwischenpunkt einer Pendlerstrecke dargestellt; in blau der durch VMC® berechnete tatsächliche Routenverlauf.*

In der Abteilung wird seit mehreren Jahren intensiv an der Berücksichtigung von georeferenzierten Daten zur Modellierung der Nutzungsvariabilität und Herleitung von Beanspruchungsverteilungen geforscht. Daraus hat sich das umfangreiche Softwarepaket »Virtual Measurement Campaign« (VMC®) entwickelt, welches einen wichtigen Beitrag zur Auslegung und Auswertung von Messkampagnen leistet. Zusätzlich zur Erfassung und Auswertung von Messdaten erhalten die Hersteller vertiefende Erkenntnisse über die Fahrzeugnutzung. Diese werden benötigt, um die Messdaten auf das gesamte Fahrzeugleben für verschiedene Kundengruppen hochzurechnen. Das folgende Projektbeispiel gibt dazu einen Einblick in die Zusammenarbeit mit Volkswagen Nutzfahrzeuge, in der die Methoden erfolgreich eingesetzt wurden.

Mithilfe des Softwaremoduls VMC® GeoStatistics wird eine Messkampagne in einer gewünschten Zielregion detailliert geplant. Dabei werden insbesondere zuvor als relevant eingestufte topographische Faktoren wie Straßentyp, Steigungs- oder Kurvigkeitswerte berücksichtigt. Ziel ist es, einen möglichst umfassenden Ausschnitt der Zielregion mit all ihren charakteristischen Gegebenheiten zu erfassen und auf die Routenführung der Messkampagne abzubilden. Die detailliert geplante Messkampagne erfasst somit alle relevanten topographischen Faktoren und beinhaltet alle relevanten Fahrzustände in einer statistisch ausreichenden Breite. Parallel dazu wird die Fahrzeugnutzung thematisiert. Abhängig vom Fahrzeugtyp sind verschiedene Branchen und Einsatzgebiete mit ihren Fahrprofilen relevant, etwa Verteiler- und Paketdienste oder Handwerker. Dieser fährt von seinem Betrieb aus zu verschiedenen Kunden und muss zusätzlich bei Bedarf notwendige Verbrauchsmaterialien einkaufen. Die Darstellung der täglich gefahrenen Strecken innerhalb des Einsatzgebiets des Fahrzeugs besitzt somit einen sternförmigen Charakter. Dem gegenüber liefert ein Verteiler- und Paketdienst seine Waren eher auf einem Rundkurs aus und hat im Gegensatz zum Handwerker mehr Zwischenstopps pro Tour. Um repräsentative Streckenverläufe der verschiedenen Kundengruppen automatisch zu generieren, werden Gebietsinformationen und konkrete Einzelziele benötigt, welche der VMC®-Datenbank entnommen werden. Pro Kundengruppe werden mehrere tausend Routen generiert, wobei die Ergebnisse mit allgemein zugänglichen Statistiken, etwa Entfernungen bei Pendlern, sowie mit spezifischen Messdaten abgeglichen werden. Anhand des digitalen Kartenmaterials können anschließend die Zusammensetzung nach Streckentypen und die topographischen Gegebenheiten der befahrenen Straßen bestimmt werden. Mit diesen Parametern erfolgt die Hochrechnung der Messdaten auf zu erwartende Beanspruchungsverteilungen. Insbesondere werden Sensitivitätsstudien und Vergleiche zwischen unterschiedlichen Kundengruppen ermöglicht, die beispielsweise zur maßgeschneiderten Konfiguration eines Fahrzeugs eingesetzt werden können.





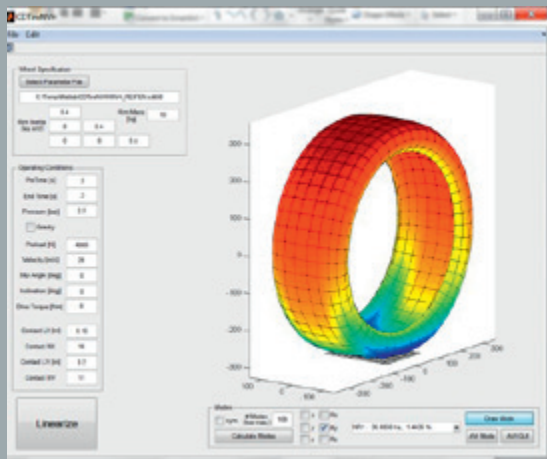
## INTERAKTIVE FAHR- UND BETRIEBSSIMULATION MIT RODOS®

Bei der simulationsbasierten Erprobung neuer Fahrzeugkonzepte müssen in sehr frühen Projektphasen alle relevanten Einflüsse auf das Fahrzeugmodell richtig abgebildet werden. Dabei stellt die Umgebung sowie die Mensch-Fahrzeug-Interaktion eine besondere Herausforderung dar. Mit der rasant zunehmenden Komplexität von Fahrzeugen, die den Fahrer bei einer Vielzahl von Entscheidungen nicht mehr nur unterstützen, sondern in wachsendem Maße sogar das eigentliche Fahren teilweise oder auch ganz übernehmen, ergeben sich auch neue Anforderungen an die Simulationskette im Entwicklungsprozess. Die Zahl und Art der Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug, Umwelt und Mensch (Fahrer), die in der Fahrzeugentwicklung berücksichtigt werden müssen, hat in der jüngeren Vergangenheit stark zugenommen.

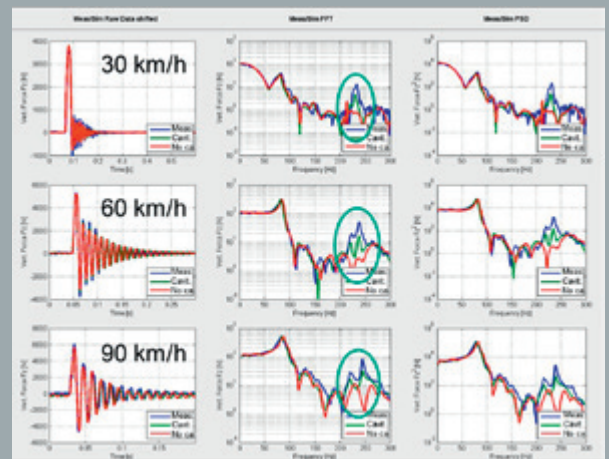
Traditionell lag der Fokus in der Simulation im Wesentlichen auf einer korrekten Abbildung der physikalischen Eigenschaften des Fahrzeuges unter Berücksichtigung einiger weniger Teilaspekte der Umwelt (z. B. der Straßenoberfläche) und des Fahrers (z. B. als Bahnregler). Auch für die zu berücksichtigende Kopplung dieser Eingangsgrößen führten weniger komplexe Ansätze bislang in der Regel zu aussagekräftigen Ergebnissen. Mit zunehmender Intelligenz des Fahrzeuges und der damit einhergehenden aktiveren Rolle des Fahrzeuges ist eine relativ einfache Modellierung des Fahrerverhaltens nicht mehr ausreichend. Die Reaktionen und Empfindungen des Menschen sind nunmehr auch unmittelbar und sehr stark von den ‚Entscheidungen‘ des Fahrzeuges selbst abhängig. Das subjektive Gefühl des Fahrens resultiert nicht mehr nur aus den physikalischen Eigenschaften des Fahrzeuges, sondern zusätzlich auch aus dessen ‚intelligenten‘ Verhalten (aktiver Eingriff in den Prozess des Fahrens) sowie zusätzlich dem (teilweise autonomen) Verhalten anderer Fahrzeuge. Weiterhin steigt der notwendige Detaillierungsgrad der Umwelt, da die verbauten Sensoren einen hohen Komplexitätsgrad der Umgebung erfassen und beispielsweise eine Beschreibung der Straßenoberfläche als Eingangsgröße in das Modell bei weitem nicht mehr ausreichend ist. Insbesondere der Mensch, dessen Immersionserlebnis stark von visuellen und vestibulären Eindrücken geprägt ist, reagiert signifikant auf unterschiedliche Komplexitäts- und Realitätsgrade der dargestellten Umgebung. Dazu wurde am ITWM eine neue Werkzeugkette entwickelt, die mit einer hochgenauen laserbasierten 3D-Erfassung (REDAR) der Umgebung beginnt und letztendlich den Fahrer mittels eines roboterbasierten Fahrsimulators (RODOS®) mit einem außerordentlich hohen Immersionsgrad in die Simulationsumgebung integriert. Die Fahrzeugsimulation selbst nutzt neben der Fahrerinteraktion auch die Umgebungsdaten als Input, z. B. über einen eigens entwickelten Terrainserver für die Reifenmodelle. Die Umgebungs-darstellung auf Punktwolkenbasis ist trotz der immensen Datenmengen aufgrund neuer ‚out of core‘-Ansätze echtzeitfähig.

**1** *Simulationsszenario auf Basis gemessener 3D-Punktwolken (Trippstadter Straße in Kaiserslautern)*

**2** *Baggersimulation in einem punktwolkenbasierten Szenario*



1



2

## EINFLUSS DER FÜLLGASDYNAMIK AUF BETRIEBS-ZUSTÄNDE DES REIFENS

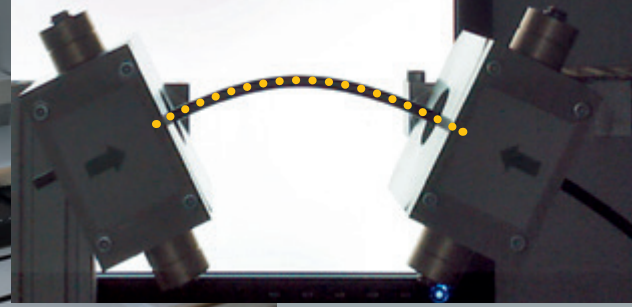
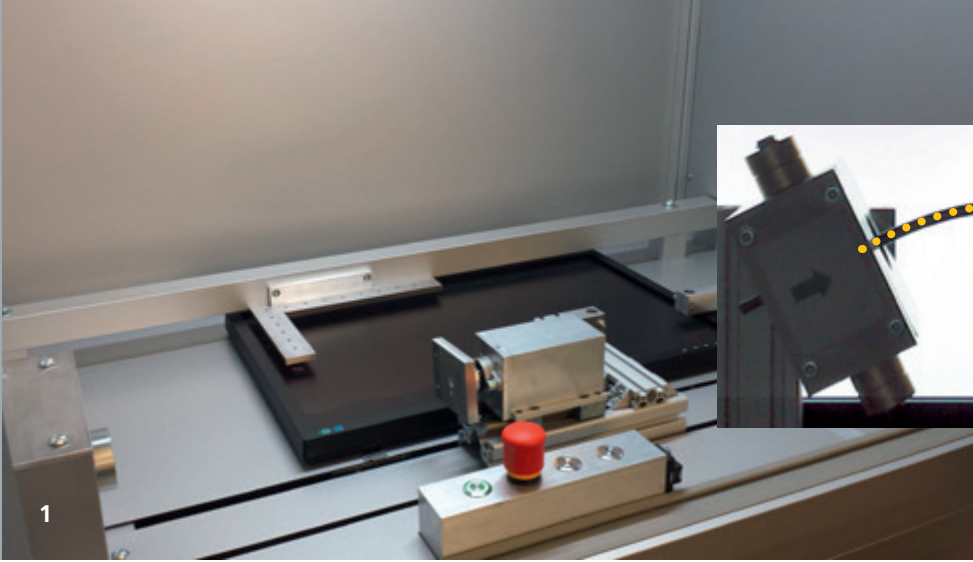
1 *CDTire/NVH: Linearisierung des rollenden Reifens*

2 *Vergleich vertikaler Radnabenkräfte bei Schwellenüberfahrt: Messung (blau) gegen Simulation mit (grün) und ohne (rot) Dynamik des Füllgases*

Am ITWM wird das Reifenmodell CDTire/3D als Teil der Reifenfamilie CDTire weiterentwickelt. Bei diesem Modell sind die Seitenwände und der Gürtel des Reifens über Schalenmodellierung dargestellt. Der reale Reifen besteht aus unterschiedlichen Lagen wie Innerliner, Karkasse, Stahlgürtellagen, Bandage und Laufstreifen, wobei diese Komponenten meist aus fadenverstärkten Gummischichten mit eindeutiger Fadenrichtung bestehen. All diese funktionalen Einzellagen finden eine separate Repräsentation im Reifenmodell, so dass auch deren Struktureigenschaften separat und örtlich lokal parametrisiert werden können. Die Rechenzeiten von CDTire/3D liegen derzeit im Bereich gängiger, in der Mehrkörperdynamik verwendeter Reifenmodelle und somit um Größenordnungen unter denen von FEM-Modellen.

CDTire/3D modelliert den Reifen von Wulstkern zu Wulstkern, also insbesondere inklusive der Seitenwand. Damit kann der Fülldruck physikalisch korrekt auf die innere Lage (Innerliner) des Reifens appliziert werden. Für viele Anwendungen ist es ausreichend, den Druck des Füllgases als zeitlich vorgegeben zu modellieren. Mit dieser Modellvorstellung können schon fortgeschrittene Fragestellungen wie der plötzliche totale Druckverlust auf sicherheitsrelevante Auslegungen von Steuerungskomponenten des Fahrzeugs virtuell getestet werden. Allerdings gibt es auch Fragestellungen, bei der die Interaktion des Füllgases mit der Innenlage des Reifens dynamisch zu modellieren ist. Ein solches Beispiel ist die Erweiterung des Frequenzbereichs in NVH-Anwendungen (Noise-Vibration-Harshness) auf und über 250 Hz. Für typische Pkw-Reifen liegt nämlich die erste Resonanzfrequenz der Füllgas-Schwingung bei etwa 230 Hz. In diesem Frequenzbereich koppelt die Dynamik des Füllgases mit der Reifenstruktur und produziert signifikante Peaks im Spektrum der resultierenden Reifenkraft auf die Felge.

Um diesen Anwendungen gerecht zu werden, hat CDTire/3D jetzt optional die Möglichkeit, die Dynamik des Füllgases durch eine isentrope kompressible Euler-Gleichung mit zeitlich veränderlichen Reifenquerschnitten zu beschreiben. Dabei breiten sich Druckstörungen, wie zum Beispiel durch plötzliche Querschnittsänderungen bei Schwellenüberfahrten induziert, ungefähr mit Schallgeschwindigkeit in beide Umfangsrichtungen aus. Interessant wird es jetzt, wenn der Reifen dreht. Wird jetzt das ebenfalls drehende Füllgas zu Druckänderungen gezwungen, breiten sich die beiden Druckstörungen im drehenden Füllgas zwar immer noch ungefähr mit Schallgeschwindigkeit aus, jedoch wird ein raumfester Beobachter (wie eine Kraftmessung) jetzt zwei verschiedene Frequenzen registrieren. Dieser rollgeschwindigkeitsabhängige Split des sog. Cavity-Modes ist auch messtechnisch nachweisbar.



## ERMITTLUNG VON MODELLPARAMETERN FÜR IPS CABLE SIMULATION MIT MESOMICS

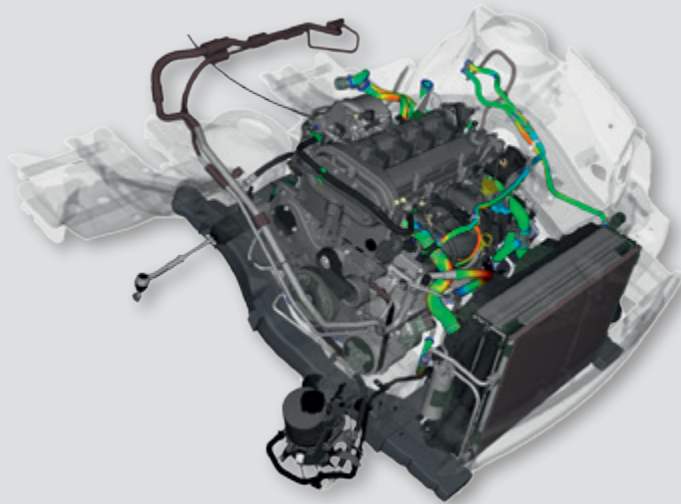
Bei der numerischen Simulation von realen Systemen oder Bauteilen kommt es im Allgemeinen auf zwei Dinge an. Einerseits ist ein gutes mathematisches Modell des Systems zwingend erforderlich, um verwertbare Simulationsergebnisse zu erhalten. Andererseits muss das Modell mit den richtigen Parametern gefüttert werden, die auch den realen Gegebenheiten entsprechen. Oft ist das Bestimmen dieser Parameter schwierig, muss für jede neue Situation individuell durchgeführt werden und ist somit sehr zeit- und kostenintensiv.

Genauso verhält es sich auch für die von FCC und ITWM entwickelte Software IPS Cable Simulation, welche eine interaktive und gleichzeitig exakte Simulation hochflexibler Bauteile wie Kabel und Schläuche für Montage- und Betriebssimulation ermöglicht. Um die physikalischen Effekte bei der Verformung von Kabeln und Schläuchen korrekt vorhersagen zu können, ist es notwendig, die mechanischen Bauteileigenschaften als Modellparameter zu ermitteln. Hierfür wurde im vergangenen Jahr eine hoch automatisierte Messmaschine (MeSOMICS) entwickelt, konstruiert, aufgebaut und zum Patent angemeldet. MeSOMICS steht für »Measurement System for the Optically Monitored Identification of Cable Stiffnesses«. Es handelt sich dabei um ein Messsystem zur Identifikation von Kabelsteifigkeiten, welches neben klassischen Messgrößen wie Kräften und Momenten auch eine optische Auswertung der Biegelinie beinhaltet und damit die Messung überwacht.

Die Messmaschine ist speziell auf eine unkomplizierte Handhabung und automatische Datenauswertung hin optimiert. So ist das Einsetzen der Proben schnell und einfach möglich, die anschließende Messung läuft vollautomatisch ab und die gesuchten Modellparameter für IPS Cable Simulation werden umgehend aus den aufgenommenen Daten abgeleitet. Darüber hinaus zeichnet sich die neu entwickelte Biegeprüfung unter anderem durch einen großen Gültigkeitsbereich und das Einstellen praxisrelevanter kleinster Krümmungsradien aus. Dies ist mit Standardversuchen wie dem 3-Punkt-Biegeversuch nicht zulässig. Mithilfe einer innovativen, ein nichtlineares Strukturmodell zugrunde legenden Auswertung werden aus den aufgenommenen Daten die Steifigkeiten des Prüflings identifiziert. In diese Auswertung fließen sämtliche aufgenommenen Größen – Kräfte, Momente, Verschiebungen und die genannten optischen Aufnahmen – ein und ermöglichen so ein sehr robustes algorithmisches Vorgehen. Darüber hinaus wird die gemessene Biegesteifigkeit unmittelbar durch eine theoretisch ermittelte Lösung der Biegelinie verifiziert. Schlussendlich liefert MeSOMICS einen vollständigen Satz an Steifigkeiten für die numerische Simulation in IPS Cable Simulation.

**1** *Probenkammer von MeSOMICS*

**2** *Optische Überwachung der Biegeprüfung mit theoretisch ermittelter Biegelinie*



## DYNAMISCHE SIMULATION VON KABELN UND SCHLÄUCHEN

### 1 *Komplexer Kabelbaum im Motorraum*

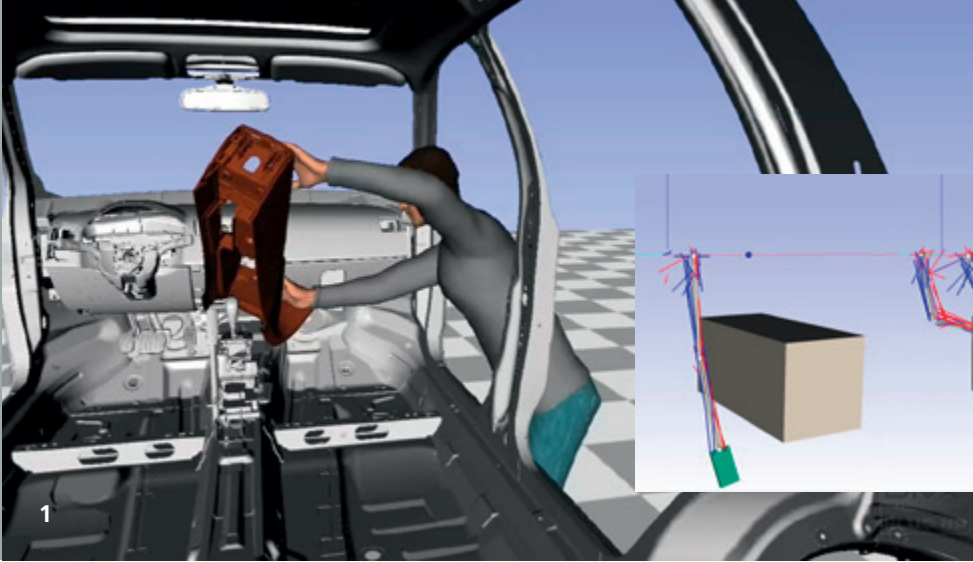
Die numerische Simulation ist aus modernen Produktionsprozessen in der Fahrzeugindustrie nicht mehr wegzudenken. Schon sehr früh in der Prozesskette – idealerweise vor der Fertigung von Prototypen – werden Simulationen zur digitalen Absicherung von bestimmten Komponenten eingesetzt. Eine besondere Herausforderung stellt die Simulation von hochflexiblen Bauteilen wie Kabeln und Schläuchen dar, welche keinen schädlichen Belastungen ausgesetzt sein dürfen. Für quasi-statische Fälle, d. h. für Situationen mit langsamen Bewegungen, ist bereits seit einigen Jahren die vom FCC in Göteborg und dem ITWM entwickelte Software »IPS Cable Simulation« im industriellen Einsatz, deren Vertrieb durch das ITWM-Spin-off fleXstructures GmbH erfolgt. Diese Software ermöglicht eine interaktive und gleichzeitig hochgenaue Montagesimulation.

Treten jedoch schnelle Bewegungen mit hohen Frequenzen auf, so müssen Trägheitseffekte berücksichtigt werden und die dynamische Simulation von Kabeln und Schläuchen ist unumgänglich. Um auch für diese rechnerisch aufwändigere Simulation schnelle und genaue Lösungen zu gewährleisten, wird das Kabel als geometrisch exakter Cosserat-Balken formuliert. Dieses Modell liefert in Verbindung mit modernen Ansätzen aus der diskreten Differentialgeometrie auch bei sehr wenigen Freiheitsgraden – und damit kurzen Rechenzeiten – robuste und realistische Ergebnisse.

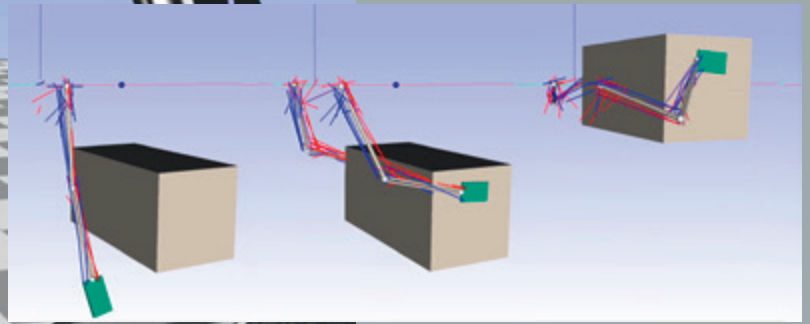
Aktuell wird die dynamische Kabelsimulation in IPS Cable Simulation integriert. Somit können erfahrene Nutzer wie gewohnt flexible Kabel und Schläuche generieren, digital verlegen und verschiedene Varianten komfortabel vergleichen. Gegenüber quasi-statischen Simulationen müssen lediglich folgende zusätzliche Informationen definiert werden: die dynamische Anregung und die Dämpfungseigenschaften des Bauteils.

Ein ganz wesentliches Hilfsmittel zur Bewertung von Einbausituationen sind akkumulierte Schädigungswerte, welche im Nachgang der Simulation in der Beanspruchungsanalyse berechnet werden. In diesem Zusammenhang unterscheiden wir zwei Fälle. Einerseits können schon jetzt vergleichende Lastdatenanalysen (LDA) durchgeführt werden. Dabei werden Pseudo-Schädigungswerte auf der Kabeloberfläche berechnet, welche nicht die absolute Lebensdauer ausdrücken, es aber erlauben, verschiedene Konfigurationen bzgl. Schädigung zu vergleichen. Andererseits besteht auch großes Interesse an absoluten Lebensdauervorhersagen. Zu deren Berechnung ist die algorithmische Vorgehensweise ähnlich der vergleichenden LDA, jedoch werden bauteilspezifische Wöhlerkurven benötigt, welche die Anzahl zulässiger Schwingspiele bei bestimmten Amplituden angeben. Die Bewertung dieses Prozesses ist Gegenstand der aktuellen Forschung.





1



2

## DIGITALE MENSCHMODELLIERUNG ZUR AUSLEGUNG ERGONOMISCHER ARBEITSPLÄTZE

Ziel des MAVO-Projektes »Ergo-dynamic Moving Manikin with Cognitive Control« (EMMA-CC) ist die Entwicklung eines Werkzeuges zur ergonomischen Bewertung dynamischer menschlicher Bewegungen mittels validierter Simulation. Dies ermöglicht in Zukunft die komfortable Konzeption gesunder und sicherer Arbeitsplätze in der Produktentwicklung und Produktionsplanung. Das am FCC entwickelte digitale Menschmodell IPS IMMA liefert hierfür die Basis und wird durch Kernkompetenzen der im MAVO-Projekt beteiligten Fraunhofer-Institute unter Federführung des ITWM substantziell erweitert. Methodische Schwerpunkte der Projektarbeiten in EMMA-CC sind Biomechanik und Optimalsteuerung (ITWM), biomechanische 3D-Muskelmodellierung und Validierung (IPA), hybride Parallelisierung der Simulationssoftware (IGD), Arbeitsplatzergonomie (IAO) und kognitive Steuerungsmodelle (IPK).

ITWM und FCC arbeiten im Teilprojekt Biomechanik und Optimalsteuerung eng zusammen, mit dem Ziel, aus möglichst generischen Aufgabenstellungen und Arbeitsanweisungen (z. B. montiere ein Anbauteil) die benötigten realitätsnahen Bewegungen des digitalen Menschmodells zu generieren. Mithilfe eines solchen Modells lassen sich bereits in einer frühen Phase der Konstruktion, in welcher noch keine physischen Prototypen vorliegen, Aussagen über Montierbarkeit und Erreichbarkeit sowie über die physische Beanspruchung des interagierenden Menschen machen. Hierzu modellieren wir den Menschen als biomechanisches Mehrkörpersystem, wobei Muskeln als Aktuatoren verwendet werden. Mit diesem dynamischen System und der gestellten Arbeitsanweisung wird ein Optimalsteuerungsproblem gelöst. Durch Minimierung einer bestimmten Bewertungsfunktion gelingt es, menschenähnliche Bewegungen zu erzeugen. Dieser neue Ansatz ermöglicht es außerdem, quantitative Aussagen über physische Belastungen wie benötigte Muskelkräfte oder Gelenkbelastungen zu machen. Dies liefert wichtige Indikatoren für eine gezieltere Ergonomiebewertung. Mit dem in EMMA-CC entwickelten Modell wird es möglich sein, Ergonomierichtlinien für dynamische Bewegungsvorgänge neu und besser festzulegen. Dies schafft die Basis für eine ergodynamisch optimierte Montageplanung oder eine personalisierte ergonomische Arbeitsplatzgestaltung. Mittels effizienter Numerik auf moderner Computerhardware wird das Modell echtzeitnah simulierbar und damit auch produktiv für Optimierungsaufgaben einsetzbar sein. Seine Praxistauglichkeit wird mittels Validierung der biomechanischen Modellkomponenten am Fraunhofer IPA und in einem am Fraunhofer IPK aufgebauten Virtual-Reality-Demonstrator unter Beweis gestellt.

1 In IPS IMMA simulierter Einbau der Mittelkonsole

2 Hochheben einer Kiste durch ein digitales Menschmodell, angetrieben durch Muskeln