



---

Dietmar Weber, Christoph Mühlbach, Christine Biedinger, Dr. Sascha Feth, Michael Kleer, Dr.-Ing. Joachim Linn, Eduardo Pena Vina, Fabio Schneider, René Reinhard, Dr. Andrey Gizatullin, Thomas Halfmann, Dr. Michael Burger, Dr. Klaus Dreßler, Christine Rauch, Tim Rothmann, Dr. Sebastian Steidel, Björn Wagner, Michael Lübke, Axel Gallrein, Marius Obentheuer, Dr. Michael Speckert, Thomas Stephan, Thorsten Weyh, Johannes Krebs, Dr. Clément Zémerli

---

# MATHEMATISCHE METHODEN IN DYNAMIK UND FESTIGKEIT

- **MODELLIERUNG UND SIMULATION VON NUTZUNGSVARIABILITÄT UND ZUVERLÄSSIGKEIT**

Bemessungsgrundlagen für die Zuverlässigkeit und Optimierung stark vom Einsatzspektrum abhängiger Größen wie Energieeffizienz und Kraftstoffverbrauch

- **SYSTEMSIMULATION IN DER FAHRZEUGENTWICKLUNG**

Reifen-, Boden- und Fahrermodelle

- **NICHTLINEARE STRUKTURMECHANIK**

Simulation stark deformierbarer Komponenten und Strukturen wie Reifen, Elastomer- und Hydrolager, Luftfedern, Kabel, Schläuche



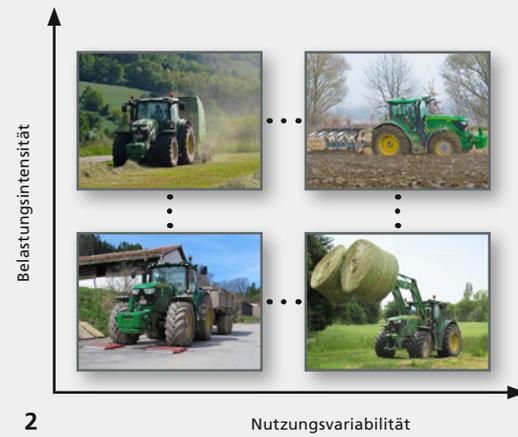
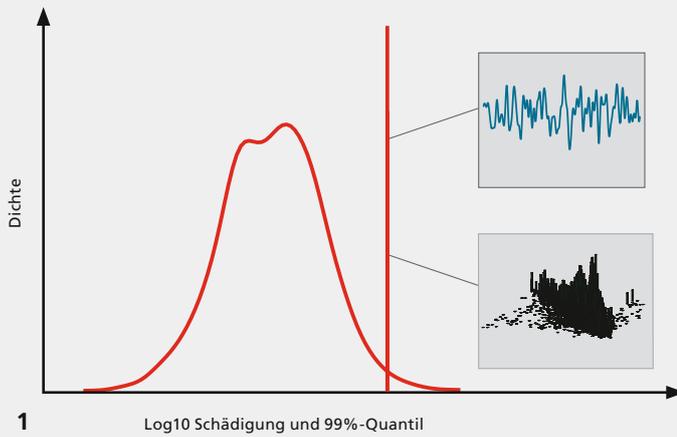


Die Abteilung Mathematische Methoden in Dynamik und Festigkeit beschäftigt sich mit der Modellierung und Simulation von Nutzungsvariabilität, Beanspruchung und Energieeffizienz von Fahrzeugen und Maschinen. Dabei kommen statistische Methoden zur Modellierung von Nutzungs- und Variantenvielfalt sowie Mehrkörpersystemsimulation (MKS) und Finite-Elemente-Methoden (FEM) zur System- und Bauteilanalyse zum Tragen. In unseren Industrieprojekten beschäftigen wir uns mit Zuverlässigkeit, Betriebsfestigkeit sowie Struktur- und Systemdynamik, überwiegend in der Fahrzeugindustrie.

Im Rahmen des Fraunhofer-Innovationsclusters Digitale Nutzfahrzeugtechnologie/Fahrzeug-Umwelt-Mensch ([www.nutzfahrzeugcluster.de](http://www.nutzfahrzeugcluster.de)), trägt die Abteilung MDF die Gesamtkoordination und bearbeitet mit den Industriepartnern Bosch, BPW, Daimler, Goodyear, John Deere, Liebherr, Schmitz Cargobull und Volvo die Teilprojekte Nutzungsvariabilität, Energieeffizienz, on-Board Simulation, Reifen- und Bodensimulation und Strukturmechanik. Hier verfolgen wir langfristig das Ziel, in der virtuellen Produktentwicklung nicht nur das Fahrzeug, sondern auch die Umgebung (»die Welt«) und den Fahrer simulierbar zu machen. Ein großer Schritt in diese Richtung ist unsere Virtual Measurement Campaign (VMC) zur systematischen Analyse der Nutzungsvariabilität von Fahrzeugen auf Basis georeferenzierter Daten. Hierdurch wird die Herleitung von Bemessungsgrundlagen für die Zuverlässigkeit und die Optimierung weiterer Größen wie Energieeffizienz und Kraftstoffverbrauch auf eine neue Grundlage gestellt.

Ein wichtiger Baustein ist die Einbeziehung elektronischer Steuergeräte und Assistenzsysteme sowie des Fahrers in die virtuelle Produktentwicklung. Daher ist die Entwicklung neuer Methoden zur hybriden und interaktiven Simulation für uns ein zentrales Thema. Wir arbeiten ferner an der Weiterentwicklung und Anwendung von Methoden der Mehrkörpersimulation (MKS) und der Simulation gekoppelter physikalischer Systeme. Dabei entwickeln wir Verfahren zur invariante Systemanregung, zur Reifensimulation (CDTire), zur Boden- und Materialsimulation sowie zur Simulation stark deformierbarer Strukturen wie Elastomerlager, Kabel und Schläuche (IPS Cable Simulation).

Die Einbeziehung des Fahrers bzw. Bedieners von Fahrzeugen und mobilen Arbeitsmaschinen steht auch im Mittelpunkt unserer Anwendungsprojekte mit dem interaktiven Fahrsimulator RODOS®. Das System wird aktuell zur Entwicklung von Fahrermodellen, zur Verbesserung der Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie zur Entwicklung und Absicherung von Assistenzsystemen eingesetzt.



## U-SIM – MODELLIERUNG UND SIMULATION DER NUTZUNGSVARIABILITÄT FÜR DIE FAHRZEUGENTWICKLUNG



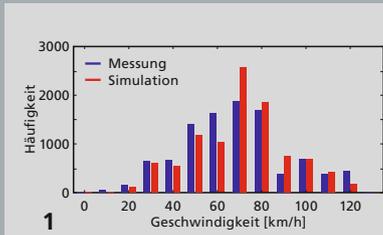
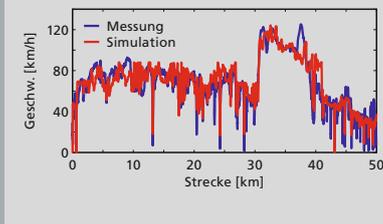
In der Fahrzeugentwicklung muss immer auch ein Kompromiss gefunden werden zwischen Zuverlässigkeit und Festigkeit auf der einen und Kosten- und Energieeffizienz auf der anderen Seite. Ein ideales Komponentendesign hat nur eine moderate Überdimensionierung als Sicherheitsfaktor. Für solch ein Design ist es notwendig, das tatsächliche Fahrzeugnutzungsverhalten im Betrieb durch verschiedene Kunden(-gruppen) während des gesamten Fahrzeuglebens zu verstehen. Zu diesem Zweck führen die meisten Fahrzeughersteller umfangreiche Messkampagnen auf öffentlichen Straßen durch. Um daraus ein qualifiziertes Designziel ableiten zu können, muss zunächst beantwortet werden, was wo zu messen ist und wie die Ergebnisse auf eine bestimmte Ziellaufleistung zu extrapolieren sind. Da Kunden sehr verschieden sind, genügt es nicht, einen einzelnen Kunden durch eine Messkampagne nachzubilden. Stattdessen sollte eine Messkampagne sicherstellen, dass insbesondere alle Randfälle und extremen Situationen gut erfasst sind, auch wenn diese nur durch einen kleinen Anteil aller Kunden erlebt werden.

Die Software U-Sim wurde entwickelt, um die Nutzungsvariabilität einer großen Anzahl verschiedener (virtueller) Kunden basierend auf ausgewählten Messungen für das gesamte Fahrzeugleben zu simulieren. Der Schlüssel zur Problemlösung liegt in der Trennung zwischen Vermessung verschiedener Betriebszustände (Was kommt vor?) und Kombination dieser Messungen zu virtuellen Kunden basierend auf einem Nutzungsmodell (Wie häufig kommt etwas vor?). U-Sim generiert mittels Monte-Carlo-Simulation Kunden, indem verschiedene Nutzungsprofile gemäß dem Nutzungsmodell generiert werden und dazu passende Messabschnitte (Atome) zufällig zugeordnet werden. Jeder so entstandene Kunde wird durch ein Mehrkanallastkollektiv – Rainflow-Matrizen für gemessene Kräfte, Momente, Beschleunigungen usw. – bestehend aus ausgewählten Atomen und Wiederholfaktoren, repräsentiert. Daraus ergeben sich Pseudoschädigungen und mithin eine empirische Verteilung in jedem Messkanal für alle simulierten Kunden. Die Quantilkunden (z. B. 99 % Kunde) definieren in Kombination mit Sicherheitsfaktoren und Sondermanövern (z. B. Bordsteinüberfahrten) ein Designtarget, das explizit mit Bedingungen im Feld verknüpft ist.

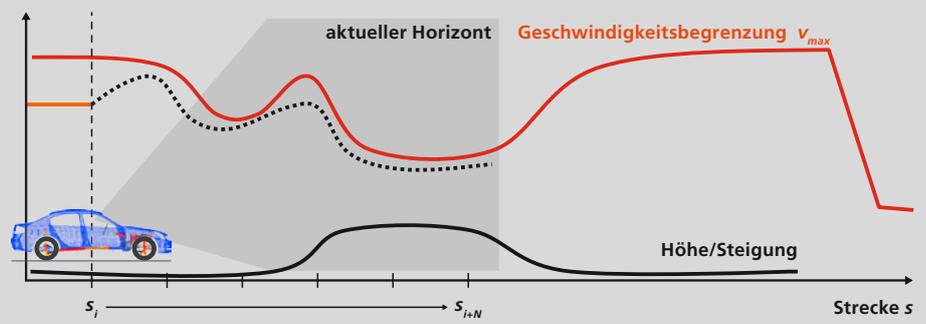
U-Sim ist bereits bei mehreren Herstellern produktiv im Einsatz. Aktuell wird der Prozess in einem Projekt inklusive einer Promotion bei John Deere in der Traktorenentwicklung implementiert. Auch in der Landwirtschaft steigen die Anforderungen an Effizienz, Emissionsgrenzwerte und Leichtbau stetig. Eine konventionelle Produktentwicklung wird dadurch zusehends unwirtschaftlicher. Durch die extrem hohe Variabilität in Nutzung und Belastung der Fahrzeuge, ist die Modellierung des Nutzungsmodells hier von besonderer Bedeutung. Der U-Sim Prozess unterstützt unsere Partner dabei und erhöht gleichzeitig Transparenz, Prozesssicherheit sowie Reproduzierbarkeit und verbessert die Dokumentation der Resultate und Entscheidungen.

1 Beanspruchungsverteilung

2 Nutzungsvariabilität vs. Belastungsintensität bei Ackerschleppern



1



2

## BERECHNUNG VON GESCHWINDIGKEITSPROFILIEN IN VMC

1 *Geschwindigkeitsprofil: Vergleich Messung (blau) und Simulation (rot) oben: Geschwindigkeit über zurückgelegtem Weg, unten: Häufigkeiten*

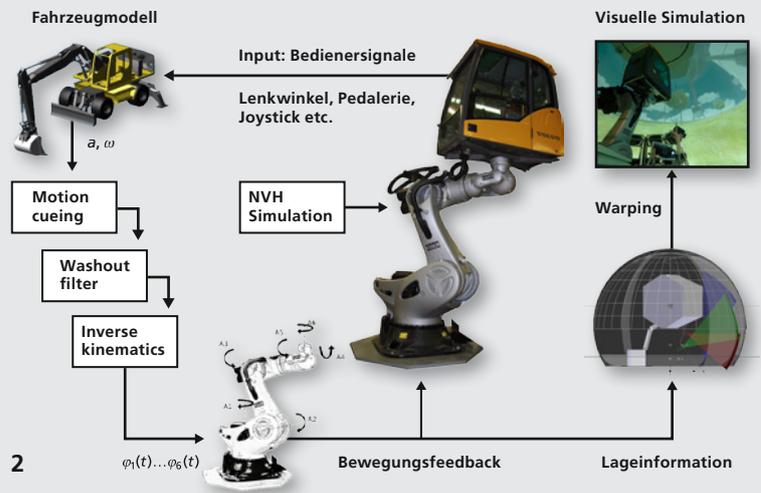
2 *Gleitender-Horizont-Ansatz zur Geschwindigkeitsprofilberechnung mit Optimalsteuerungsmethoden*

Gefahrenere Geschwindigkeitsprofile sind eine sehr wichtige Kenngröße für die fahrdynamische Beanspruchung eines Fahrzeugs während der Fahrt wie auch hinsichtlich Energie- und Ressourceneffizienz des Fahrzeugs. Es liegt daher nahe, Geschwindigkeitsprofile basierend auf gegebenen Streckendaten, Fahrer- und Fahrzeuginformationen im Vorfeld prädiktiv durch Simulation zu bestimmen, um die genannten Kriterien möglichst frühzeitig für ein Fahrzeug bzw. eine Strecke bewerten zu können. Das Software-Paket Virtual Measurement Campaign (VMC), das in den vergangenen Jahren am ITWM entwickelt wurde, stellt dazu die nötigen Daten und numerischen Methoden bereit.

Bei der Geschwindigkeitsprofil-Berechnung müssen im Wesentlichen drei Haupteinflussfaktoren berücksichtigt werden: Erstens sogenannte Streckendaten für eine gegebene Route; dazu gehören topographische Informationen (Steigung, Kurvigkeit) sowie Informationen über Ampeln, Verkehr und gesetzliche Geschwindigkeitsbeschränkungen. Zweitens spielt das Fahrerverhalten eine wichtige Rolle, welches z. B. durch maximal tolerierbare Beschleunigungen oder durch Fahrerziele mathematisch beschrieben werden kann. Die dritte wichtige Komponente ist das betrachtete Fahrzeug selbst. Hier wird ein vereinfachtes längsdynamisches Modell verwendet, das in verschiedenen Komplexitätsstufen eingesetzt werden kann. So reichen beispielsweise Kenngrößen wie Masse, maximale Antriebs- und Bremsleistung aus, um ein Profil zu berechnen. Wenn verfügbar, können aber auch detailliertere Daten wie z. B. Motorkennfelder oder Getriebekennfelder hinterlegt werden, um qualitativ hochwertigere Ergebnisse zu erzielen. Darüber hinaus können auch motorcharakteristische Verbrauchskennfelder zur direkten Analyse des Kraftstoffverbrauchs und zur Ermittlung verbrauchsoptimaler Geschwindigkeitsprofile eingesetzt werden.

Mathematisch wird ein (Optimal-)Steuerungsproblem formuliert, d.h. die gegebene Strecke soll unter ihren entsprechenden Randbedingungen unter Berücksichtigung der Längsdynamik sowie den Fahrereigenschaften und -wünschen durchfahren werden. Das Längsdynamikmodell stellt das dynamische System dar, Streckendaten und Fahrereigenschaften werden als Nebenbedingungen aufgefasst. Das Problem wird nun numerisch durch geeignete Diskretisierungs- und Optimierungsverfahren und einen sog. »gleitenden Horizont«-Ansatz gelöst, bei dem jeweils überlappend Daten aus einem vorausschauenden Streckenabschnitt berücksichtigt werden.

Das so ermittelte Geschwindigkeitsprofil kann nun für weitere Analysen innerhalb der VMC-Software benutzt werden, es kann aber auch als Input für ein komplexes Vollfahrzeugmodell verwendet werden, mit dem dann weitergehende Untersuchungen durchgeführt werden können.



## INTERAKTIVE FAHR- UND BETRIEBSSIMULATION MIT RODOS®

Fahrzeugsimulationen helfen, Attribute wie Energieeffizienz, Produktivität, Betriebsfestigkeit und Zuverlässigkeit einer neuen Entwicklung zu optimieren und abzusichern. Dazu müssen alle äußeren Einflüsse, die auf das Fahrzeug einwirken sowie die Einflüsse des Bedieners berücksichtigt werden. Die Arbeit mit Prototypen ist in frühen Entwicklungsphasen häufig nicht möglich. Hinzu kommt, dass Feldmessungen an Prototypen im Vergleich zur Simulation schlechter reproduzierbar sind. Zudem erschweren die notwendigen Umrüstzeiten etwa bei Variantentests die Bewertung durch Testfahrer, da die Tests unter Umständen mehrere Wochen auseinander liegen.

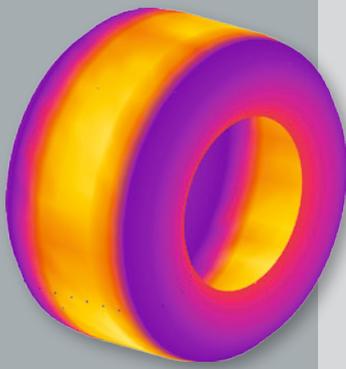
Abhilfe schafft der Einsatz einer interaktiven Simulation. Hierdurch lassen sich komplexe Situationen zusammen mit dem Fahrereinfluss reproduzierbar und unter Laborbedingungen untersuchen. Variantentests sind durch Umstellung der Parameter sehr einfach möglich, sodass die Dauer der Iterationszyklen drastisch gesenkt werden kann. Am Fraunhofer ITWM wurde dazu in den letzten Jahren der Simulator RODOS® aufgebaut, der auf Basis einer 6-achsigen Roboterkinematik mit 1000 kg Nutzlast einen besonders großen Bewegungsraum ermöglicht. RODOS® wird derzeit dazu genutzt, erweiterte Assistenz- und Sicherheitssysteme für Baumaschinen zu entwickeln, unter realistischen Bedingungen zusammen mit Experten zu studieren und weiter zu verbessern. Dabei werden neue Betriebskonzepte, Mensch-Maschine-Schnittstellen, Informationssysteme und Maschinenkonfigurationen als virtuelles Computermodell von Testfahrern, Experten und Entwicklern erprobt und optimiert, lange bevor ein erster Prototyp entstehen muss.

Daraus ergeben sich in der Praxis mehrere Vorteile: Größere Änderungen am Design einer neuen Maschine können auf Basis von Computermodellen durchgeführt und abgesichert werden. Zudem sind alle modellierten Systemzustände zur Laufzeit beobachtbar und manipulierbar, sodass leicht verschiedene Varianten durchgetestet werden können. Die Bewertung einer Variante ist dabei nicht nur auf die Auswertung von Messkurven beschränkt; ein Experte kann die neue Konfiguration mit allen Sinnen im Simulator erleben, indem er Arbeitszyklen durchfährt und dabei die Reaktion der Maschine erprobt.

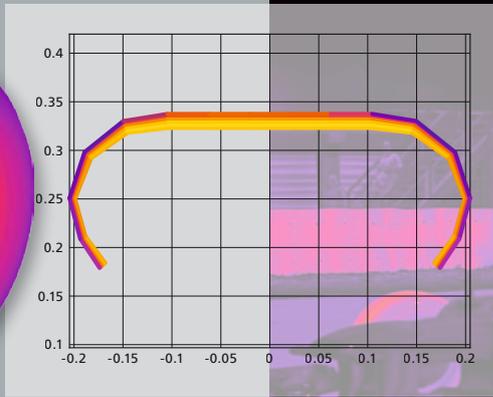
Da alle Algorithmen und Kernkomponenten von RODOS® innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft entwickelt wurden und als Quellcode zur Verfügung stehen, sind Anpassungen an neue Herausforderungen auch in Zukunft möglich. Auch die Integration diverser kommerzieller Simulationslösungen in RODOS® ist etabliert und ermöglicht in den laufenden Projekten eine effiziente Ankopplung der Modelle von Projektpartnern an den Simulator.

1 Interaktive Simulation mit RODOS®

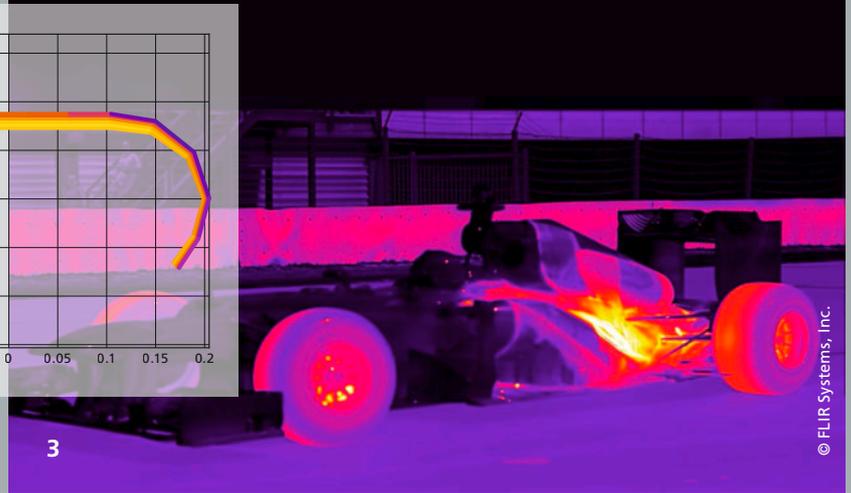
2 RODOS®: Hardware Set-up



1



2



3

© FLIR Systems, Inc.

## CDTire – KOPPLUNG DES STRUKTURMECHANISCHEN REIFENMODELLS MIT EINEM DETAILLIERTEN THERMODYNAMISCHEN MODELL

1 *Bremssimulation mit CDTire/3D und CDTire/Thermal*

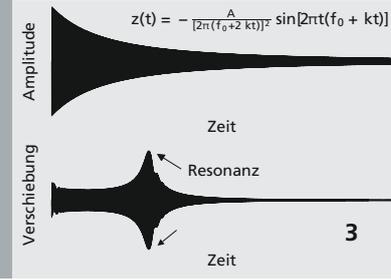
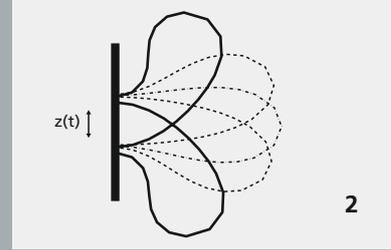
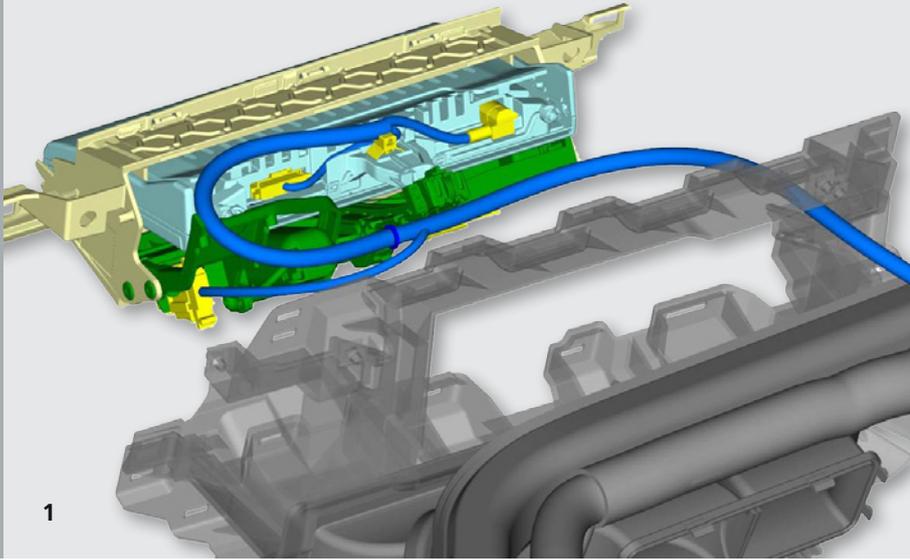
2 *Temperaturverteilung im Reifenquerschnitt*

3 *Wärmebild eines Formel 1-Fahrzeugs, aufgenommen mit einer FLIR Thermo-Kamera*

In den letzten Jahren wurde am ITWM das Reifenmodell CDTire/3D entwickelt; dabei handelt es sich um ein spezielles Schalenmodell, bei dem die Seitenwände und der Gürtel vollständig materiell modelliert werden. Speziell daran ist, dass alle funktionalen Lagen des realen Reifens wie Inner Liner, Karkasse, Stahlgürtellagen, Bandage und Laufstreifen durch separate Schalenlagen repräsentiert werden, die am Ende auf die geometrische Schalenrepräsentation kondensiert werden. Damit können die Struktureigenschaften der Lagen separat und auch örtlich lokal parametrisiert werden. Durch diese Art der Modellierung wurde ein idealer Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Genauigkeit gefunden, der es erlaubt, Gesamtfahrzeugsimulationen für alle gängigen Applikationen zur Bewertung und Optimierung von Fahrwerk, Fahrzeugstruktur und Fahrverhalten in mehr als akzeptablen Simulationszeiten durchzuführen.

Wurde die Temperaturabhängigkeit der Reifeneigenschaften in der Vergangenheit mangels entsprechender Modelle und Möglichkeiten weitgehend vernachlässigt, so gibt es seit einiger Zeit speziell bei den Herstellern sportlicherer Fahrzeuge die Erkenntnis, dass die Temperatur(abhängigkeit) gerade im fahrdynamischen Grenzbereich nicht außer Acht gelassen werden kann. Ähnliches gilt auch für die Prädiktion des Rollwiderstandes eines Reifens. Auch hier ist die Temperaturabhängigkeit nicht zu vernachlässigen. Um diesen Anforderungen Rechnung zu tragen, entwickelte das ITWM 2014 ein ganzheitliches thermodynamisches Modell des Reifens (CDTire/Thermal), das mit dem strukturmechanischen Modell CDTire/3D, aber auch mit anderen Submodellen der CDTire-Familie gekoppelt werden kann.

Das thermodynamische Modell beruht auf einer Finite-Volumen-basierten, dreidimensionalen Realisierung der Wärmeleitungsgleichung mit konduktivem Wärmeaustausch zur Innenluft, zur Felge und zur Straße und konvektivem Austausch zur Außenluft. Dabei wird der konvektive Austausch zur Außenluft über den von Nusselt stammenden vereinfachten Ansatz der Bestimmung einer geschwindigkeits- und reifengeometrieabhängigen Ersatzkonduktionszahl realisiert. Die Diskretisierung über Finite Volumen ist dabei in Lateral-, Umfangs- und Dickenrichtung frei wählbar. In Dickenrichtung kann darüber hinaus eine nicht-äquidistante Diskretisierung gewählt werden. Als Temperaturquellen wirken die lokalen Strukturdämpfungen des mechanischen Modells und die Reibkontakteinträge in der Kontaktfläche. Das Modell ist softwaretechnisch weitgehend entkoppelt vom strukturmechanischen Reifenmodell und kann deshalb auch an andere mechanische Reifenmodelle gekoppelt werden. Das Modell wurde in Zusammenarbeit mit Goodyear für Rollwiderstandsberechnungen von Lkw-Reifen und dem Sauber F1-Team zur Abstimmung der F1-Rennwagen validiert.



## VIRTUELLE MONTAGEPLANUNG MIT IPS CABLE SIMULATION

Moderne Fahrzeuge werden wegen der steigenden Elektrifizierung und neuen Sicherheitssystemen mit immer mehr Kabeln und Schläuchen gebaut. Studien der Automobilindustrie zeigen, dass ungefähr 25 Prozent aller Qualitätsprobleme mit diesen flexiblen Komponenten zusammenhängen. Das FCC und die Abteilung MDF haben mit IPS Cable Simulation ein innovatives, benutzerfreundliches Tool für die virtuelle Montageplanung und Designaufgaben mit flexiblen Komponenten entwickelt und zusammen mit Industriepartnern für die Anwendung optimiert. Für die physikalisch korrekte Simulation der Deformation von Kabeln und Schläuchen wird in IPS ein geometrisch exaktes Balkenmodell eingesetzt, das präzise Simulationen in Echtzeit ermöglicht.

In praktischen Aufgabenstellungen hat man es meist mit langsamen Bewegungen und Verformungen zu tun, die in IPS sehr gut durch eine sequenzielle Berechnung quasistatischer Gleichgewichtszustände abgebildet werden können. Die im Fahrbetrieb vorhandenen Schwingungen von Karosserie, Motor und Antriebsstrang und die Übertragung externer dynamischer Lasten von der Fahrbahn über Reifen und Fahrwerk verursachen jedoch einen dynamischen Lasteintrag in alle im Fahrzeug vorhandenen Kabel und Schläuche, der zu Schwingungen mit einer Varianz im Frequenz- und Amplitudenspektrum führt. Die Berücksichtigung solcher dynamischen Effekte wird zunehmend auch für die Montageplanung wichtig. Dies hat das IPS-Team veranlasst, das Balkenmodell für die dynamische Simulation von Kabeln und Schläuchen zu erweitern. Das dynamische Modell berücksichtigt durch große Deformationen bedingte geometrische Nichtlinearitäten, Trägheitseffekte und die Dämpfungseigenschaften von Kabeln. Ein auf die Anwendung angepasstes Zeitintegrationsverfahren ermöglicht dabei sehr effiziente und stabile Simulationen.

Für die Identifizierung kritischer Stellen eines angeregten Kabels bzw. Schlauchs wurde ein Tool für die Beanspruchungsanalyse entwickelt. Aus den Kräften und Momenten des Balkenmodells wird die örtliche Verteilung der Spannungen berechnet. Mit der Methodik der kritischen Schnittebenen ermittelt man die akkumulierte Beanspruchung eines Kabels bzw. Schlauchs unter dynamischen Lasten. Im aktuellen BMBF-Projekt MusiKa testen wir mit AUDI und STIHL als Industriepartnern diese neue Technologie in der Praxis. Eine wichtige Anwendung ist die Simulation von Prüfstandsversuchen zur Identifizierung von Resonanzfrequenzen und Abschätzung der Lebensdauer eines Kabels. Eine andere Anwendung ist die dynamische Simulation unter gemessenen Motoranregungen. Damit können Ingenieure schon in der Vorentwicklung entscheiden, welche Montagestrategie für Kabel und Schläuche sich im Betrieb günstig auswirkt und welche Anpassungen notwendig sind.



- 1 *Kabelauslegung und -analyse in IPS*
- 2 *Kabelschleife mit einem Sinus-Sweep auf beiden Endpunkten angeregt*
- 3 *Sinus-Sweep-Signal, Bewegung des Mittelpunktes und die Resonanz*