



Zur Untersuchung des Fahrereinflusses in frühen Projektphasen gibt es am ITWM die Simulationsplattform RODOS® und das 3D-Laserscanner-Fahrzeug REDAR. Das Szenariodesign nutzt georeferenzierte 3D-Laserscanner-Punktwolken mit Subzentimeter-Auflösung, so dass die optische Komplexität der Szenen nahezu der Realität entspricht. Mit dieser Technik können ganze Städte zur virtuellen Fahrzeugerprobung in der Echtzeitsimulation nachgebildet werden.

MATHEMATISCHE METHODEN IN DYNAMIK UND FESTIGKEIT

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

Bemessungsgrundlagen für die Betriebsfestigkeit und Optimierung stark vom Einsatzspektrum abhängiger Größen wie Kraftstoffverbrauch und Emission

- **SYSTEMSIMULATION IN DER FAHRZEUGENTWICKLUNG**

Reifen-, Boden- und Fahrermodelle sowie interaktive Simulation

- **NICHTLINEARE STRUKTURMECHANIK**

Simulation stark deformierbarer Komponenten und Strukturen wie Reifen, Lager, Kabel, Schläuche



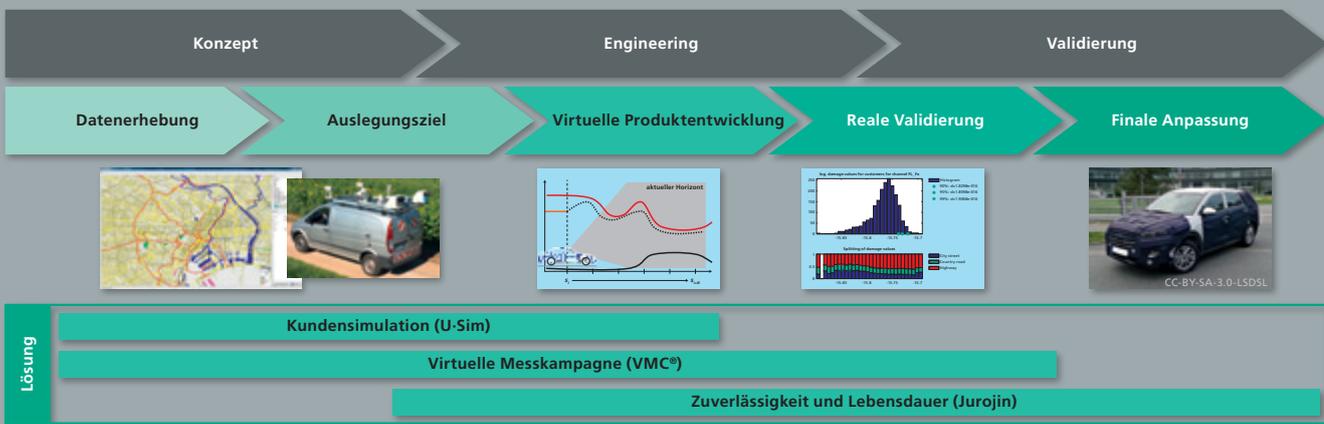


In der Abteilung Mathematische Methoden in Dynamik und Festigkeit beschäftigen wir uns mit der Modellierung und Simulation der Nutzungsvariabilität, Betriebsfestigkeit und Energieeffizienz von Fahrzeugen. Für diese Attribute ist es entscheidend, Fahrzeuge über ihre gesamte Lebensdauer in Wechselwirkung mit der Umgebung (Straße, Untergrund, Fahrer) simulieren und bewerten zu können. Wir entwickeln dazu mit unseren Partnern aus Pkw-, Lkw-, Land- und Baumaschinen-industrie Methoden der virtuellen Produktentwicklung:

- Statistische Methoden zur Monte-Carlo-Simulation unter Einbeziehung geo-referenzierter Daten (**U-Sim** und **VMC®** – Virtuelle Messkampagne). **VMC®** bietet ein ‚Modell der Welt für die Fahrzeugentwicklung‘, bestehend aus einer geo-referenzierten Datenbank und darauf aufsetzender Software zur systematischen Analyse der Nutzungsvariabilität von Fahrzeugen.
- Simulation der Fahrzeug-Umwelt-Interaktion (**CDTire**/Reifen- Boden- und Wechselwirkungs-simulationen)
- Simulation der Fahrzeug-Mensch-Interaktion/Fahrsimulator **RODOS®**
- Nichtlineare Strukturmechanik: Hochperformante (interaktive) Simulation der Funktion und Montage von Kabeln und Schläuchen (**IPS Cable Simulation**)

Auch 2015 spielte der Fraunhofer-Innovationscluster Digitale Nutzfahrzeugtechnologie/Fahrzeug-Umwelt-Mensch (www.nutzfahrzeugcluster.de) eine wichtige Rolle bei der Weiterentwicklung des oben beschriebenen Portfolios. Der Innovationscluster seinerseits stellt eine der drei Säulen des neu eingerichteten Leistungszentrums »Simulations- und Software-basierte Innovation« dar.

Ein besonderes Highlight des vergangenen Jahres war die erfolgreiche Inbetriebnahme unseres Umgebungsmessfahrzeugs **REDAR** (Road & Environmental Data Acquisition Rover). Das System besteht aus einem Messfahrzeug mit hochgenauen Laserscannern und einer hochgenauen Inertialplattform. Damit lassen sich Straßen- und Umgebungsdaten sehr effizient erfassen – einerseits so genau, dass sie direkt als Input für **CDTire**-Fahrzeugsimulationen (digitale Straße) taugen und andererseits so weitreichend, dass die Daten als Eingangsgrößen für interaktive Fahrsimulationen mit **RODOS®** verwendet werden. Mehr dazu findet sich auf den folgenden Seiten.



1

WERKZEUGE ZUR STATISTISCHEN BEWERTUNG VON FAHRZEUGBELASTUNG UND BELASTBARKEIT

Entlang des gesamten Betriebsfestigkeitsprozesses in der Fahrzeugentwicklung können statistische Methoden zur Beschreibung und Modellierung der Belastung und der Belastbarkeit von Systemen und Bauteilen enormen Mehrwert generieren. Drei Produkte im Rahmen unserer **VMC®**-Aktivitäten (Virtual Measurement Campaign) begleiten diesen Prozess bei unseren Kunden von der Vorentwicklung bis hin zur serienbegleitenden Prüfung.

1 *Einordnung der Werkzeuge in die Prozesskette*

VMC® unterstützt die Analyse von Zielmärkten, etwa Südamerika, hinsichtlich der relevanten Umgebungsbedingungen und den Vergleich mit bekannten Märkten wie Mitteleuropa durch eine Vielzahl von Methoden und Grafiken. Insbesondere das Straßennetzwerk, die topographischen Bedingungen und auch klimatische Bedingungen können dabei mit **VMC® GeoStatistics** aufbereitet und ausgewertet werden. Dies ist sowohl in einer frühen Konzeptphase hilfreich, als auch für die Planung von Datenerhebungen oder die Analyse von Garantiefällen.

Bei der Planung einer Messkampagne stellt sich die Frage, auf welchen Straßen einer Region wie lange gemessen werden soll, um statistisch belastbare Daten zu erhalten. Auch hierzu bietet **VMC® GeoStatistics** umfangreiche Hilfestellungen an. Die spätere Auswertung der Daten wird durch **VMC® GeoLDA** über eine automatisierte Abbildung der Daten auf die Straßen inklusive Segmentierung und Klassierung für die spätere Hochrechnung wesentlich vereinfacht und aufgewertet. Entscheidend ist dabei die systematische Trennung der zu erwartenden Betriebszustände (vollbeladene Fahrt über Land in ebener Region oder Verteilerverkehr in der Stadt) und der Häufigkeit, mit der diese Zustände in einer Kundengruppe zu erwarten sind. Diese Trennung erlaubt die Hochrechnung der entsprechend aufbereiteten Daten mit **U-Sim** (Usage Simulation) auf die Ziellaufleistung für eine bestimmte Kundengruppe und die Ableitung von Quantilen der Belastungsverteilung für die Komponentenauslegung. Alle genannten Methoden sind genauso einsetzbar in der Auslegung von TriebstrangkompONENTEN hinsichtlich Verbrauch und Emission.

Die Freigabe der Bauteile zur Produktion erfordert die bestmögliche Balance zwischen teuren Versuchen und höchsten Qualitätsanforderungen. **Jurojin** berechnet effiziente Versuchspläne, was zu schnelleren Freigaben, reduzierten Prüfkosten und vor allem einem reduzierten Risiko der Überdimensionierung von Bauteilen führt. Sollten nun Bauteile bei Kunden dennoch zu Beanstandungen führen, sind qualifizierbare Entscheidungen über mögliche Gegenmaßnahmen wichtig. Gerade in frühen Phasen mit wenigen Beanstandungen ist das aber klassisch kaum möglich. **Jurojin** löst dieses Problem, durch eine Modellierung der intakten Bauteile. Sobald dieses Missing-Data-Problem gelöst ist, sorgen speziell angepasst Maximum-Likelihood-Algorithmen für gute Prognosen.



1



2

REDAR – LASERBASIERTE 3D-UMGEBUNGS- ERFASSUNG MIT EINEM MESSFAHRZEUG

1 Digitalisierte Umgebung

2 3D-Messfahrzeug
REDAR

Kernaufgabe des laserbasierten Messwerterfassungssystems **REDAR** (Road & Environmental Data Acquisition Rover) ist die millimetergenaue dreidimensionale Erfassung und Digitalisierung der Umgebung. REDAR wurde nach einer mehrjährigen Konzeptions- und Aufbauphase Mitte 2015 in Betrieb genommen und in ersten Projekten mit namhaften Vertretern aus dem Landmaschinen- und Automobilbau sowie dem Motorsport eingesetzt. Die derzeitige Kernausrüstung des Trägerfahrzeuges besteht aus:

- zwei Hochleistungs-Laserscannern
- einer hochpräzisen IMU
- GPS
- Wegstreckensensor
- vier Farbbild-Industriekameras
- Onboard-Messwerterfassungsrechner
- Generator und unterbrechungsfreie Stromversorgung

Der modulare Aufbau kann an die jeweilige Situation und Aufgabenstellung bedarfsgerecht angepasst werden. Möglich ist der Einsatz zusätzlicher Sensorik wie auch anderer Trägerfahrzeuge (Luft- oder Wasserfahrzeuge).

REDAR als kinematische Messeinheit kann Straßen im fließenden Verkehr erfassen, so dass auf teure Absperrungen und Messungen bei Nacht verzichtet werden kann. Bei reduzierter Geschwindigkeit kann die Datendichte um ein Vielfaches erhöht werden. So ist es beispielsweise möglich, kleinste Risse in Straßenoberflächen oder Tunneln zu detektieren und darzustellen. Diese detailgetreue Erfassung und die daraus resultierenden hochpräzisen Daten können auf vielfältige Art und Weise im Bereich der Betriebsfestigkeit oder der Zustandserfassung eingesetzt werden. Neben dem Einsatz in Kundenprojekten wird REDAR auch in der Evaluierung, Weiterentwicklung und ergänzender Unterstützung anderer Aktivitäten des ITWM genutzt. Die erfassten Umgebungen bieten im Fahrsimulator **RODOS®** einerseits visuell eine Simulationsumgebung mit hohem Realitätsgrad und andererseits eine hochgenaue Beschreibung der Straßenoberfläche. Zusätzlich befüllt REDAR mit jedem gefahrenen Kilometer und den daraus abgeleiteten Größen die umfangreiche Datenbank von **VMC®**. Die synchrone Erfassung ‚billiger‘ Messdaten (Beschleunigung etc.) in Verbindung mit der genauen Kenntnis der realen Straßenoberfläche ermöglicht es erstmalig Verfahren zu validieren, die auf Basis einfach zu erfassender Daten auf die Straßenoberfläche zurückrechnen (»invariante Anregung«). Insgesamt gesehen wird im Zuge der ansteigenden Bedeutung von virtueller Produktentwicklung im Fahrzeugbau (Stichwort »Autonomes Fahren«) der Bedarf an qualitativ hochwertigen Bestandsdaten realer Straßen/Umgebungen weiter steigen. REDAR ist hierbei ein wichtiger Faktor, um diese Nachfrage zu bedienen und Simulation und Realität noch weiter zu verschmelzen.



INTERAKTIVE FAHR- UND BETRIEBSSIMULATION MIT RODOS®

Bei der Fahrzeugauslegung müssen in sehr frühen Projektphasen Attribute wie Betriebsfestigkeit und Zuverlässigkeit untersucht werden. Um die relevanten Vorgänge in der Simulation richtig abzubilden, müssen alle äußeren Einflüsse auf das Fahrzeug berücksichtigt werden. Dazu zählen der Fahrer sowie die Fahrerassistenzsysteme, die die Reaktion des Fahrers auf das Fahrzeug beeinflussen. Für die Auslegung von aktiv rückwirkenden Systemen muss daher die Fahrerreaktion beachtet werden, um etwa die Bedienbarkeit neuer Automatisierungssysteme zu gewährleisten.

Prototypentests sind in frühen Entwicklungsphasen jedoch häufig nicht möglich. Hinzu kommt, dass Feldmessungen im Vergleich zur Simulation schlechter reproduzierbar sind. Zudem lassen sich nicht alle Zustände beobachten und nur wenige davon steuern. Aus diesem Grund wurde am Fraunhofer ITWM in den letzten Jahren die Rapid Prototyping Plattform **RODOS®** auf Basis einer sechsachsigen Roboterkinematik mit 1000 kg Nutzlast entwickelt, installiert und seit der Inbetriebnahme im Jahr 2012 stetig weiterentwickelt. RODOS® wird seitdem zur virtuellen Entwicklung und Erprobung neuer Fahrzeuge und Maschinen eingesetzt.

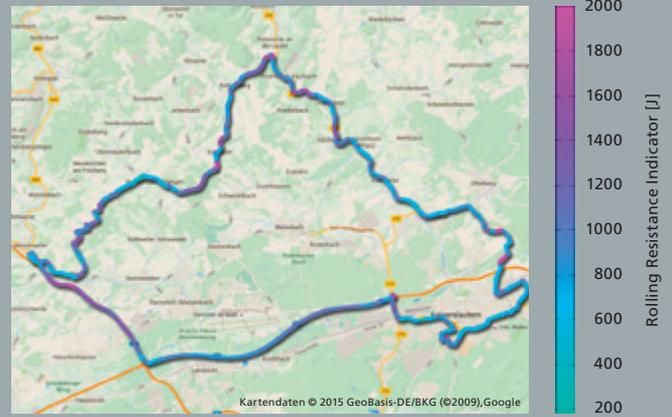
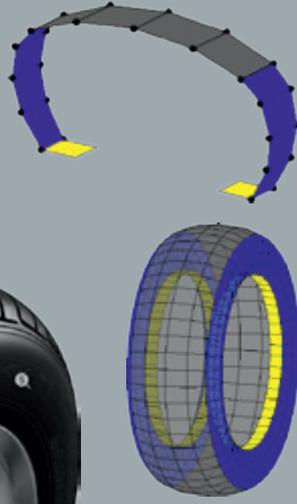
Die jüngste Erweiterung stellt die Integration von 3D-Laserscannermessdaten in die interaktive Simulation dar. Dabei dienen die mit Hilfe von **REDAR** erfassten Umgebungsdaten als Grundlage für die Erstellung einer virtuellen Welt. Die sehr umfangreichen Daten (bereits eine z. B. 20 km lange Messstrecke besitzt ein Datenvolumen von über 4TB) müssen dazu von einem Netzlaufwerk gelesen und in Echtzeit verarbeitet werden können. Die Datenbasis wird sowohl für die visuelle Anzeige in der virtuellen Realität als auch für die Fahrzeugsimulation, wie z. B. die Reifensimulation, genutzt. Mit dieser neuen Technik lassen sich in RODOS® beliebig große Szenarien abbilden, die bezüglich optischer Komplexität und Detailreichtum der Realität entsprechen. Größter Vorteil dabei: Die Modellierzeit zum Erstellen einer Szene ist minimal.

Mit diesem Ansatz sind interaktive Simulationen wie etwa eine Fahrt von Kaiserslautern nach Berlin möglich. Hierbei können innovative Assistenz- und Automatisierungssysteme für Fahrzeuge unter realistischen Bedingungen zusammen mit typischen Fahrern und der realen Strecke studiert und getestet werden. Darüber hinaus werden neue Betriebskonzepte, Mensch-Maschine-Schnittstellen, Informationssysteme und Fahrzeugkonfigurationen als virtuelle Computermodelle von Testfahrern, Experten und Entwicklern erprobt und optimiert. Im nächsten Schritt werden die Punktwolke-daten mit Farbinformationen aus Bildern ergänzt, so dass die damit erstellten virtuellen Welten noch realistischer wirken. Diese Arbeiten sind Teil der aktuellen Entwicklungen an RODOS® und REDAR.

1 Georeferenzierte 3D-Punktwolke vom Fraunhofer-Zentrum

2 Interaktive Simulation mit RODOS® in einem Punktwolkeszenario

1. Stahlgürtel
2. Gürtelabdecklage
3. Lauffläche und Profil
4. Verstärkerstreifen
5. Seitenwand
6. Kernreiter
7. Wulstkern
8. Innerliner
9. Karkasse



© 2009 Goodyear Dunlop

1

2

VORHERSAGE VON ROLLWIDERSTAND UND REIFENVERSCHLEISS IN REALISTISCHEN BETRIEBSSZENARIOEN

1 Aufbau eines realen Gürtelreifens (links)

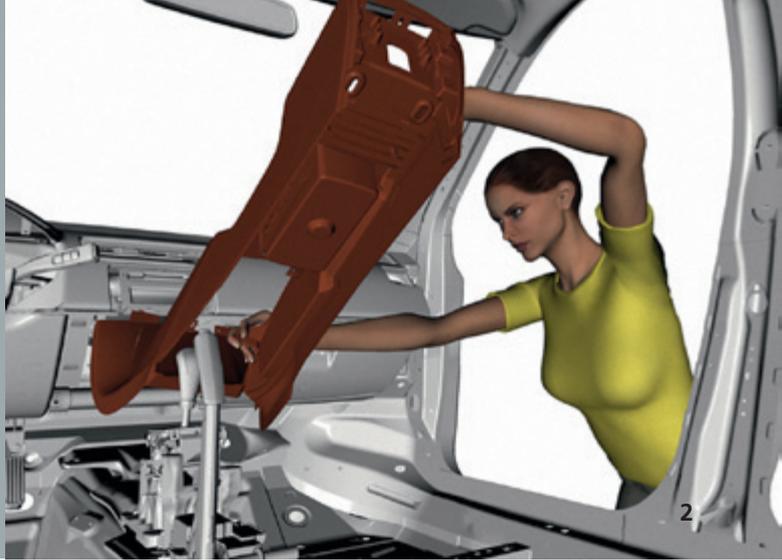
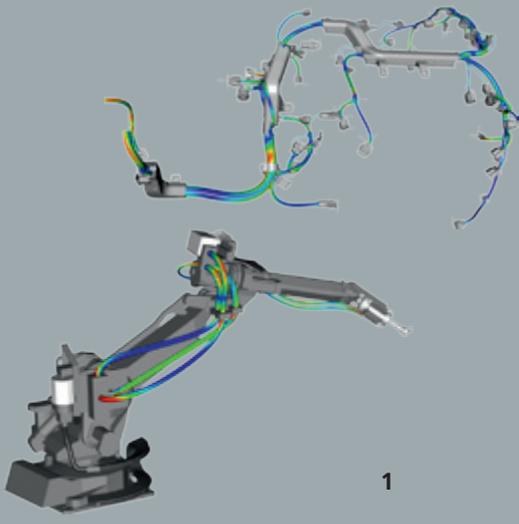
Aufbau des Reifenmodells CDTire/3D: Gesamtreifen mit diskreter Massenpunktverteilung, Modellaufbau des Reifenquerschnitts, Schichtenmodell zur Modellierung der funktionalen Reifenkomponenten (rechts)

2 Darstellung des Verbrauchsindikators Rollwiderstand entlang einer Referenzstrecke

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 realisiert. 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.

Um den Rollwiderstand des Reifens zu berechnen, werden für alle dissipativen Strukturelemente lokal die Verlustenergien berechnet und akkumuliert. Verlustenergiequellen sind dabei viskose lokale Dämpfungsterme in Gummi und Verstärkungslagen, innere Reibungsterme – vor allem im Laufstreifengummi – und Reibungsverluste zwischen Reifen und Straße. Der Reifenverschleiß kann nicht direkt berechnet werden, so dass der Reibenergieverlust zwischen Reifen und Straße als Ersatzgröße verwendet wird. Der Reifenabrieb steht in einem direkten, streng monotonen Zusammenhang mit dieser Größe. Mit dieser Ersatzgröße können unmittelbar A/B-Vergleiche auf Reifen- und Streckenebene durchgeführt werden, über eine entsprechende Kalibrierung kann jedoch auch der Reifenverschleiß quantifiziert werden.

Im von Goodyear koordinierten europäischen FP7-Förderprojekts LORRY wird am ITWM eine Methode entwickelt, mit der man Indikatoren für die Verlustgrößen Rollwiderstand und Verschleiß im Reifen für realistische Einsatzszenarien vorhersagen kann. Die Grundidee ist die Unterteilung der realen Fahrt in einen geeigneten Satz von Lastfällen in Abhängigkeit von Krümmungsradius, Längsneigung und Geschwindigkeit. Für sämtliche Lastfälle werden die entsprechenden Energieverluste im Reifen anhand eines Simulationsmodells des Fahrzeugs mit einem CDTire/3D-Reifenmodell berechnet und in einem Ergebniskatalog gespeichert. Um nun den Energieverlust für ein realistisches Betriebsszenario vorhersagen zu können, werden reale Fahrten (Strecken/Geschwindigkeitsprofile) in die definierten Lastfälle partitioniert und der Gesamtenergieverlust aus dem Ergebniskatalog superponiert. Diese Methode erlaubt anwendungsbedingte Einflussfaktoren wie spezifische Kunden, Einsatzgegebenheiten, regionale Abhängigkeiten etc. bei der Vorhersage von Rollwiderstand und Verschleiß von Reifen zu berücksichtigen.



INTERAKTIVE SIMULATION FLEXIBLER STRUKTUREN FÜR DIE VIRTUELLE PRODUKTENTWICKLUNG

Die Abteilung arbeitet seit mehr als einer Dekade intensiv mit der Abteilung Geometry and Motion Planning des FCC in Göteborg zusammen; Schwerpunkt sind strukturmechanische Simulationsmodelle flexibler schlauch- bzw. kabelartiger oder flächiger Bauteile, die äußerst schnell gerechnet werden können und damit die Möglichkeit zum interaktiven Arbeiten mit stark verformbaren Geometrien eröffnen.

Motivation des ersten, 2004 gestarteten Projektes war die Berechnung der Verformung von Schlauchpaketen an Industrierobotern, um damit die Bewegung für solche Roboter im Computer optimal planen zu können. Die Bewegungen und Verformungen der Schläuche im Raum sollte dabei mit berücksichtigt werden, jedoch möglichst ohne Einbußen in der Rechengeschwindigkeit. Der zielführende Lösungsansatz für diese Aufgabenstellung bestand darin, die zur Simulation verwendeten geometrisch exakten Cosserat-Modelle vom methodischen Ballast nichtlinearer Finite-Elemente-Formulierungen zu befreien und mittels neuartiger Ansätze aus der diskreten Differentialgeometrie in Verbindung mit effizienten Simulationsmethoden aus der Computergraphik interaktiv handhabbar zu machen. Bald zeigte sich, dass die interaktive Simulation flexibler Kabel und Schläuche in der digitalen Absicherung von Montageprozessen ein weiteres Anwendungsgebiet für die von FCC und ITWM entwickelten Modelle und Algorithmen ist. Dies war schließlich der Ausgangspunkt von **IPS Cable Simulation**, einem Modul der am FCC entwickelten Software **IPS** (Industrial Path Solutions) zur automatischen Pfadplanung für die Ein- und Ausbausimulation von Bauteilen. Mit der Software kann die Montage von Kabelsystemen virtuell geplant und validiert werden. Zeit- und Kostenaufwände für Hardwareprototypen werden dadurch minimiert oder sogar auf Null reduziert. Die Software wird aktuell bei allen führenden Automobilherstellern eingesetzt und erweist sich auch für die Zulieferindustrie (Kabel- und Schlauchhersteller) als nützliches Werkzeug zur Systemauslegung. Um Vermarktung und Vertrieb der Software kümmern sich die beiden Ausgründungen IPS AB (Göteborg) und flexStructures GmbH (Kaiserslautern).

Diffizile Montagevorgänge, wie sie z. B. in der Automobilindustrie in der Endmontage vorkommen, erfordern nach wie vor die menschliche Feinmotorik. Um solche Montagearbeitsplätze ergonomisch günstig auszulegen und dabei die menschliche Arbeit mittels geeigneter Vorrichtungen und Werkzeuge optimal unterstützen zu können ist es erforderlich, den Menschen in der Montagesimulation adäquat mit zu berücksichtigen. Dieser Thematik widmen sich ITWM und FCC unter Beteiligung von vier weiteren Instituten (IPA, IPK, IGD und IAO) aktuell im Forschungsprojekt EMMA-CC (Ergo-dynamic Moving Manikin with Cognitive Control). Schwerpunkte von ITWM und FCC sind hierbei die Erweiterung des vom FCC entwickelten Menschmodells IMMA für dynamische Simulationen mit Muskelmodellen zur Abschätzung physischer Belastungen.

1 *IPS-Modell eines Kabelbaums mit verschiedenen Kabelsträngen mit farbiger Darstellung der durch die Verformung der Schläuche, Kabel und Kabelstränge verursachten Spannungen (oben) und Industrieroboter mit externem Schlauchpaket (unten)*

2 *Mit dem digitalen FCC-Menschmodell IMMA simulierte Montage einer Mittelkonsole im Innenraum einer Fahrzeugkarosserie*