

# Prozesssichere Modellreduzierung: Der Schlüssel zur Echtzeit und effizienten MKS-Simulation in der Fahrzeugdynamik<sup>1</sup>

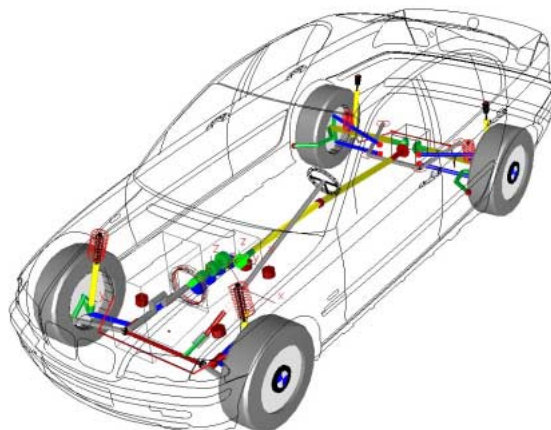
Dr. techn. Wolfgang Rulka, Dr.-Ing. Alexander Eichberger

INTEC GmbH, Wessling

## 1. Der Wunsch nach kurzen Simulationszeiten

Die Methode der MKS-Simulation wird in der Fahrzeugentwicklung heutzutage für eine Vielzahl von Anwendungsgebieten eingesetzt. Dies betrifft u.a. die kinematische und elastokinematische Achsanalyse, die Fahrdynamik- (Handling) und die Komfortauslegung (Ride, NVH) des Gesamtfahrzeugs sowie die Generierung von Lastdaten für Lebensdauerabschätzungen. Neben diesen Off-line Simulationsaufgaben hat sich die MKS-Methodik auch im Bereich der On-line Simulation und Echtzeitsimulation etabliert. Typische Anwendungsfelder sind hier der Entwurf von Regelsystemen für aktive Sicherheits- und Fahrerassistenzsysteme sowie für den Test von Steuergeräten mittels virtueller Prototypen.

Bild 1 zeigt den Aufbau eines typischen SIMPACK MKS-Simulationsmodells, bestehend aus den Subsystemen Aufbau, Vorderachse, Hinterachse, Lenkung, Motor/- Getriebeeinheit, Antriebsstrang, Rad und Reifen. Die parametrisierten Substrukturen bestehen wiederum aus den MKS-Basiselementen Körper, welche starr und/oder elastisch sein können, masselose ideale Gelenke für die Abbildung der kinematischen Eigenschaften und masselose Kraftelemente. Die Daten für MKS-Modelle stammen aus unterschiedlichsten Quellen wie CAD, Versuchsdaten, Messdaten, Zeichnungen, FE-Modellen, Konstruktionsunterlagen, PDM-Systemen und implizite Daten. In einem MKS-Modell laufen viele unterschiedliche Daten zusammen und ein sicherer Bedatungsprozess ist entscheidend.



**Bild 1:** SIMPACK MKS-Modell

Je nach Aufgabenstellung werden Modelle unterschiedlicher Komplexität und Detaillierung verwendet. Hochwertige Modellierungen und komplexe Anwendungen

---

<sup>1</sup> Die grundlegenden theoretischen Arbeiten zu dem Thema Makrogelenk sind auf Veranlassung und unter Mitwirkung von BMW AG, Herrn Dr. Pankiewicz erfolgt.

wie z.B. Parameteroptimierungen führten in der Vergangenheit trotz gesteigener CPU-Performance im Off-line Bereich zu stetig steigenden Rechenzeiten. Im On-line Bereich ist man durch die harte Anforderung Echtzeit auf umfangreiche Modellierungseinschränkungen angewiesen. Die unterschiedlichen Modelle werden oftmals unterschiedlich bedatet, was zu Datenredundanzen und inkompatiblen Modellzuständen führt. Ziel ist es, ein Modell mit einem Datenursprung und einem Bedatungsprozess für alle Aufgabenstellungen zur Verfügung zu haben. Doch die Verwendung hochwertiger Modelle für Systemaussagen, bei denen eine geringere Komplexität und Detaillierung ausreichend wäre, führt zu unnötig langen, oder im Fall der Echtzeit inakzeptablen Rechenzeiten. So werden z.B. zur vollständigen Nachbildung des nichtlinearen dynamischen Übertragungsverhaltens von Radaufhängungen viele Lenker und Dämpfer-Körper definiert, was häufig zu hochfrequenten Schwingungen von Achslenkern führt, insbesondere wenn die Modelle durch konstruktionsnahe Prozesse generiert wurden [2]. Die stark gedämpften, höherfrequenten Schwingungen der Achslenker sind bei Handling-Simulationen nicht von Interesse, können jedoch bei der Generierung von Lastdaten relevant sein. Aber auch bei hochwertigen Modellen kommt man durch Modellierungsansätze in Frequenzbereiche, die bei keiner Aufgabenstellung relevant sind. Ein Beispiel dafür ist die Modellierung von Stabilisatoren über eine Vielzahl kleinster Massen und Trägheiten verbunden mit hohen Steifigkeiten und geringen bis keinen (weil nicht bekannten) Dämpfungen.

Zur Modell- und damit Rechenzeitreduktion o.g. Modellbildungen bieten sich folgende Methoden an:

- Linearisierung,
- Teillinearisation von Subsystemen,
- dezentrale Simulation von dynamischen Subsystemen,
- Reduktion benötigter Rechenoperationen durch modellspezifisch optimierte Gleichungen (SIMPACT Symbolic Accelerator),
- bauteilorientierte Reduktion durch Ausblendung von nahezu masselosen Körpern.

In diesem Beitrag wird für die Subsystemklasse Radaufhängungen der Lösungsansatz „**Makrogelenk**“ vorgestellt, welcher eine bauteilorientierte, Modellreduktion ermöglicht. **Ziele** waren:

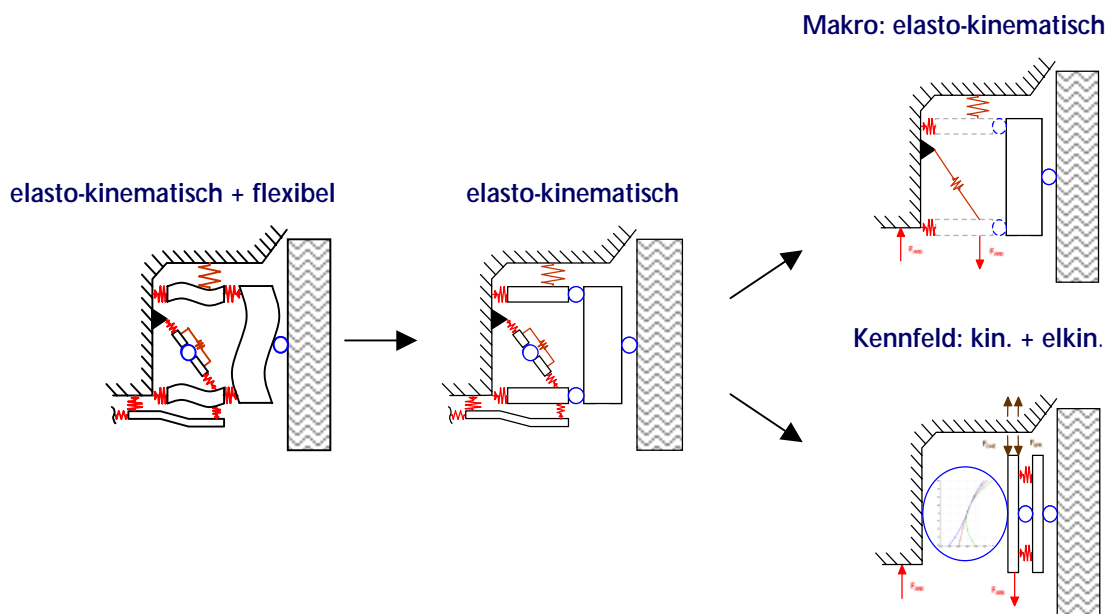
- Prozesssichere Modellreduktion,
- Transformation der Gleichungen von steifen differential-algebraischen Gleichungen (DAE) in nicht steife gewöhnliche Differentialgleichungen (ODE) zur Verwendung echtzeitfähiger Integrationsverfahren in HIL-Umgebungen,
- Reduktion von Rechenzeiten für Off-line und On-line Anwendungen bis hin zur Echtzeit,
- ein Modell- und Datenursprung für komplexes und reduziertes Modell,
- Ergänzung zu kennfeldbasierten Ansätzen.

## 2. Makrogelenk - bauteilorientierte Reduktion für Radaufhängungen

### 2.1 Reduktionsansatz

Bild 2 zeigt grundsätzlich die Reduktionskette, ausgehend von einer sehr umfassenden Modellierung, bei der alle Körper massebehaftet, flexibel und

untereinander mit nachgiebigen Lagern verbunden sind. In einem ersten Schritt wird die Verformung der Bauteile vernachlässigt und nicht relevante Lagernachgiebigkeiten durch ideale Gelenke ersetzt. Ergebnis ist die elastokinematische Modellierung einer Achse. Ersetzt man sämtliche Lager durch ideale Gelenke erhält man die rein kinematische Modellierung (nicht dargestellt). Im folgenden Reduktionsschritt werden nun die dynamischen Eigenschaften kleiner Massen vernachlässigt. Dafür gibt es zwei unterschiedliche Ansätze. Die Kennfeldmethode, bei der die Achskinematik und die elastischen Nachgiebigkeiten der Achse über ein Kennfeld beschrieben werden. Eine Alternative dazu ist die Methode des Makrogelenks, bei welcher die Achskinematik und die elastischen Eigenschaften über die einzelnen Bauteileigenschaften erfasst werden.



**Bild 2:** Reduktionskette

Sowohl der Ansatz über das Makrogelenk als auch die Kennfeldmethode haben ihre Anwendungsgebiete und werden in SIMPACK z.V. gestellt. Das Makrogelenk weist folgende Vorteile auf:

- Struktur und Topologie bleiben erhalten.
- Parametrierung des Ausgangsmodells bleibt erhalten.
- Bei Änderung von Geometrie- und Steifigkeitsparametern ist keine erneute Erzeugung eines Kennfelds in einem realen oder virtuellen Versuch erforderlich.
- Anlenkpunkte für Dämpfer, Aufbaufeder, Stabi und Anschläge müssen nicht umgerechnet werden.

Die dem Reduktionsprozess des Makrogelenks zugrundeliegenden vereinfachenden Annahmen sind im wesentlichen:

- Die Voraussetzung starrer Körper. Hiermit werden die hohen Frequenzen der inneren *Bauteil*-Verformungen vernachlässigt.
- Die Vernachlässigung des Einflusses der Massen- und Trägheitskräfte der Radlenkerkörpern auf das dynamische Gesamtübertragungsverhalten. Dies vermeidet die Berechnung unnötiger Schnittkräfte an den Gelenken der Radstangen, vermeidet hochfrequente Baugruppenschwingungen und reduziert erheblich die benötigte Zahl an Differentialgleichungen und algebraischen

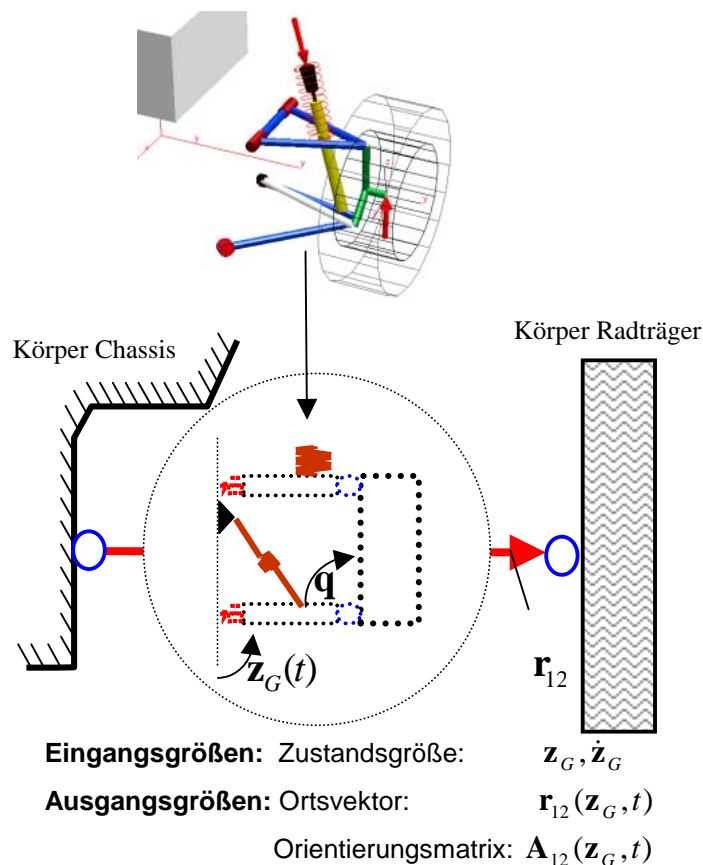
Zwangsbedingungen. Die Baugruppe „Radaufhängung“ kann als reine ODE dargestellt werden.

## 2.2 Gleichungen des Makrogelenks

Die Bewegungsgleichungen eines MKS stellen die Beschleunigungen als Funktion der Lage- und Geschwindigkeits-Zustandsgrößen dar:

$$\ddot{\mathbf{z}} = \mathbf{f}(\dot{\mathbf{z}}, \mathbf{z}, t)$$

Der SIMPACK Relativkoordinaten-Algorithmus benötigt zur Bereitstellung der Bewegungsgleichungen die Kinematikgleichungen der Gelenke [1]. Durch sie werden die kinematischen Ausgangsgrößen wie z.B. der Relativvektor  $\mathbf{r}_{12}$  bzw. die Relativorientierungsmatrix  $\mathbf{A}_{12}$  über das Gelenk als Funktion der 1 bis maximal 6 Bewegungsfreiheitsgrade  $\mathbf{z}_G$  des Gelenks bereitgestellt (Bild 3).



**Bild 3:** Kinematische Größen

Im Fall der Voraussetzung masseloser Lenkerstangen reduzieren sich die dynamischen Gleichungen der „inneren“ Körper der Achsaufhängung zu einer rein kinematischen Gelenkgleichung als Funktion der Bewegungsfreiheitsgrade  $z_{G,K}$  für Einfederung und evtl. Lenkung und zusätzlicher elastischer Freiheitsgrade  $z_{G,E}$  für die elastische Deformation in den Bushings.

Die Gleichungen des Makrogelenks erhält man durch die Aufteilung der beschreibenden Kinematik-Zustandsgrößen in die unabhängigen Zustandsgrößen  $\mathbf{z}_G$  und die abhängigen Winkel  $\mathbf{q}$  der Lenker (Bild 3). Das heißt die Relativvektoren über die gesamte Achsaufhängung sind zunächst eine Funktion der gegebenen Geometriegrößen (Lenkerlängen), sowie der abhängigen und unabhängigen Zustände:

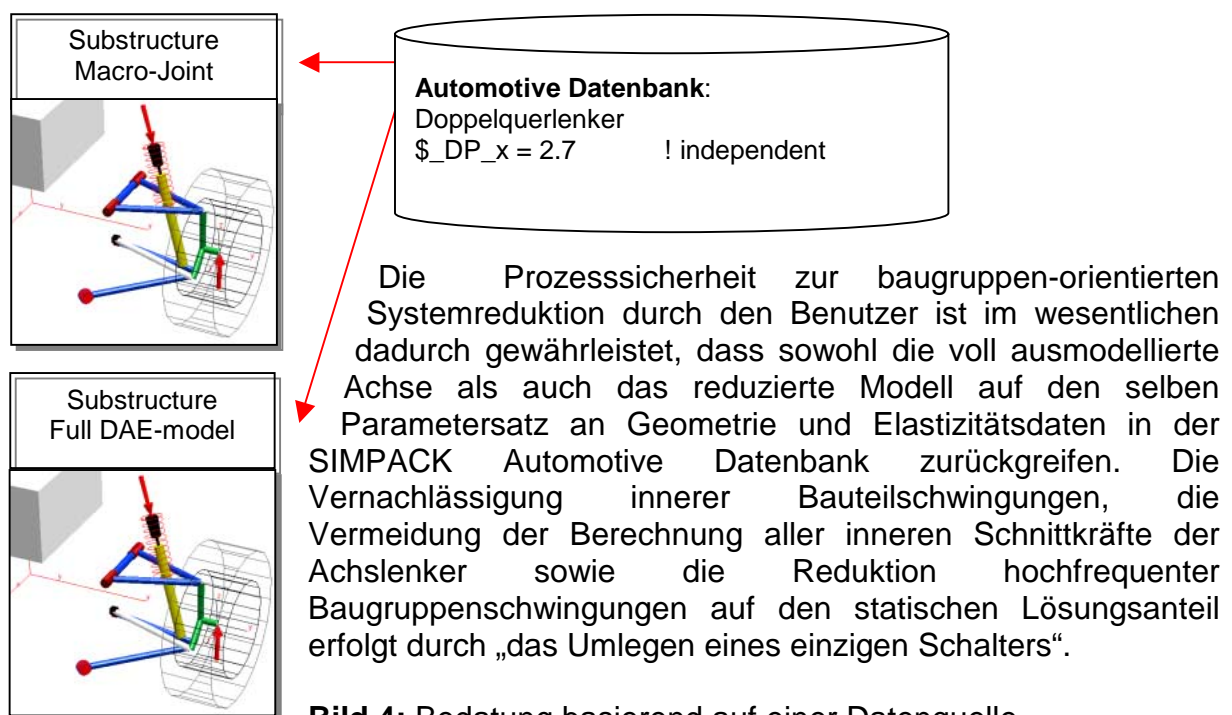
$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{12} &= \mathbf{r}_{12}(\mathbf{z}_G, \mathbf{q}) \\ \mathbf{A}_{12} &= \mathbf{A}_{12}(\mathbf{z}_G, \mathbf{q}) \end{aligned}$$

Die abhängigen Größen  $\mathbf{q}$  und deren zeitliche Ableitung  $\dot{\mathbf{q}}$  bestimmen sich durch die Schleifenschließbedingungen der Lenker auf Lage- und Geschwindigkeitsebene.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(\mathbf{z}_G, \mathbf{q}) &= 0 \\ \mathbf{H}(\mathbf{z}_G, \mathbf{q}) \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{z}_G, \mathbf{q}) \cdot \dot{\mathbf{z}}_G &= 0 \end{aligned}$$

Im Gegensatz zu allgemeinen MKS Systemen (DAE) sind die Nebenbedingungen jedoch nur von den *lokalen* Zuständen der jeweiligen Achse abhängig. Die Lösung der Nebenbedingung kann damit dem Berechnungsprozess von der Vorgabe  $\mathbf{z}_G$  zu den Ausgangsgrößen  $\mathbf{r}_{12}$  und  $\mathbf{A}_{12}$  für die jeweilige Achse zugeordnet werden. Für allgemeine Achstypen lassen sich die Nebenbedingungen auf Lageebene nicht explizit auflösen. Zur Bestimmung der abhängigen Winkel  $\mathbf{q}$  der Lenker wurden in SIMPACK zwei verschiedene Verfahren implementiert. Als Ergebnis erhält man damit die gewünschte ODE-Darstellung der Radaufhängung mit erheblicher Reduktion der Zahl an beschreibenden Zustandsgleichungen, Elimination der hochfrequenten Anteile und Reduktion der Rechenzeiten.

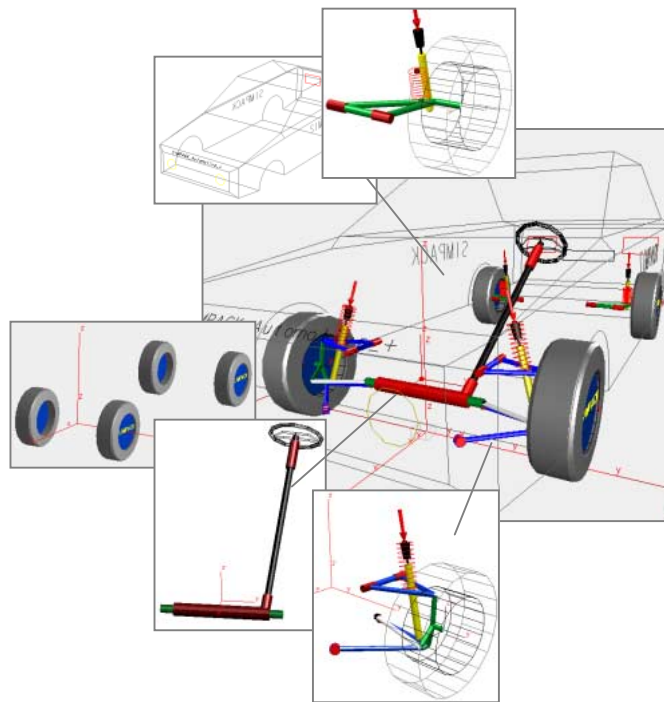
### 3. Prozess-Sicherheit



**Bild 4:** Bedatung basierend auf einer Datenquelle.

## 4. Anwendungsbeispiel

Die geschilderte baugruppenspezifische Reduktion einer voll ausmodellierten Achse durch die Makro-Gelenkmodellierung wird im folgenden Beispiel auf ein Gesamtfahrzeug (Bild 5) angewendet und mit der Zielrichtung einer „Handling“ Simulation demonstriert.



**Bild 5:** Anwendungsbeispiel

Das Gesamtfahrzeug ist aufgebaut durch den Chassiskörper, den Vorderachstyp „aufgelöste Doppelquerlenkerachse mit Lenkung“, den Hinterachstyp Schräglenkerachse, den Körpern des Lenkgetriebes und den Reifenkörpern. Als Reifengesetz dient die Approximation nach der Pacejka Magic Formula unter Berücksichtigung des kombinierten Quer- und Längsschlupfes. Elastische Achsanschläge sind modelliert. Die Feder am Dämpferbein liegt außerhalb der Längsachse des Dämpferbeins und das Dämpferbein ist außermittig an der unteren Lenkerachse abgestützt.

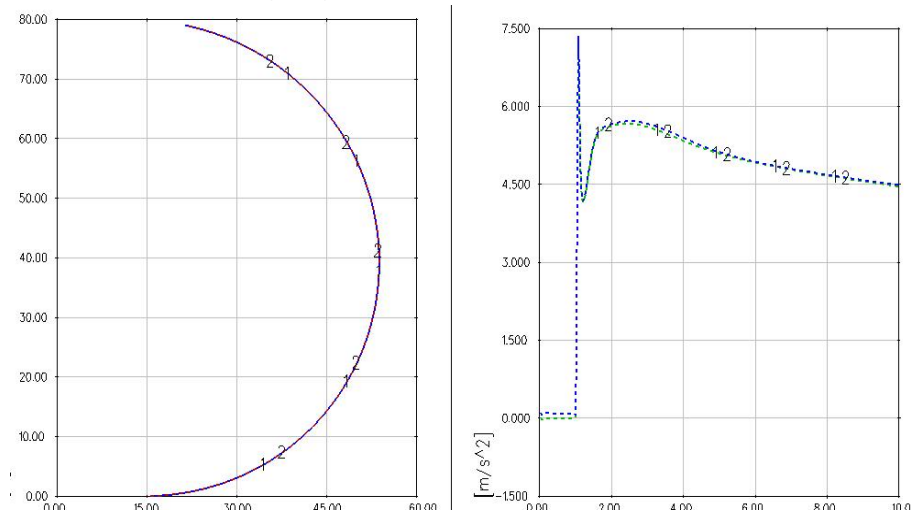
Tabelle 1 zeigt die Modell-Statistikgrößen des voll ausmodellierten DAE-Referenz-Modells im Vergleich zum reduzierten Modell.

Kenngröße	DAE-Referenzmodell	ODE-Makrogelenkmodell
Anzahl an Zustandgrößen erster Ordnung $n_x$ .	130	28
Anzahl an Gelenkzuständen $n_{zg}$ :	48	14
Anzahl an Zwangsbedingungen	34	0
Anzahl an Körpern	45	21
Anzahl an Markern	222	98

**Tabelle 1:** MKS Systemstatistik des Referenz- und des reduzierten Modells

Das reduzierte Modell besitzt ODE-Form und eine erheblich reduzierte Zahl von Zustandsgrößen.

Das Simulationsszenario ist eine Kurveneinfahrt auf ebener Strasse, wobei insgesamt 10[sec] des Manövers simuliert werden. Die Simulationsergebnisse (Bild 6) sind nahezu identische zwischen dem reduzierten und dem Ausgangsmodell. Der linke Kurvenplot stellt die x-y-Position des Fahrzeugs dar. Der rechte Kurvenplot gibt die Querbeschleunigung über der Zeit wieder.



**Bild 6:** Ergebnisvergleich reduziertes (1) vs. Ausgangsmodell (2)

Auf einer 800 MHz CPU wurden folgende Simulationszeiten erzielt:

- Komplexes Modell mit Integrationsverfahren für steife DAE-Systeme mit variabler Schrittweite und Ordnung: 19,2 CPU-Sek.
- Mit Methode des Makrogelenks reduziertes Modell mit Integrationsverfahren mit variabler Schrittweite und Ordnung: 2,6 CPU-Sek.
- Mit Methode des Makrogelenks reduziertes Modell mit Integrationsverfahren mit variabler Schrittweite und Ordnung und SIMPACK Symbolic Accelerator: 1,3 CPU-Sek.

Insgesamt konnte bei gleicher Ergebnisgüte mit der Makrogelenkmethode eine Reduktion der Rechenzeit um den **Faktor 15** erreicht werden, womit diese Methode auch für ein Vielzahl von Off-line Simulationsaufgaben im Bereich Handling, Ride und Lastdatengenerierung attraktiv ist. Die erreichte Rechenzeit ist um den Faktor 7 geringer als Echtzeit. Die Schrittweite und Ordnung der verwendeten Integratoren ist jedoch nicht konstant und die Rechenzeit hängt stark von den jeweiligen Fahrmanövern ab, womit diese Integrationsverfahren für Echtzeitanwendungen (On-line Simulationen) nicht geeignet sind.

Zum Test der Eignung für die Echtzeitsimulation wurde deshalb das reduzierte Modell mit dem Eulerverfahren und einer konstanten Integrationsschrittweite von  $h=1\text{ms}$  simuliert. Folgende Simulationszeiten konnten erzielt werden:

- Mit Methode des Makrogelenks reduziertes Modell mit Eulerverfahren [1ms]: 14,2 CPU-Sek.
- Mit Methode des Makrogelenks reduziertes Modell mit Eulerverfahren [1ms] und SIMPACK Symbolic Accelerator 5,5: CPU-Sek.

Bei Verwendung des Eulerverfahrens ist die Rechenzeit unabhängig von dem simulierten Manöver. Es konnte ein **Faktor 0,55 im Verhältnis von Rechenzeit/Echtzeit** erreicht werden.

## 5. Ergebnisse

Die Methode des Makrogelenks ist eine bauteilorientierte, nichtlineare Modellreduktion für die MKS-Formulierung der Dynamik und Kinematik von Radaufhängungen. Folgende Einzelergebnisse konnten erzielt werden:

- Prozesssichere Reduktion.
- Ein Datenpool für Vollmodell und reduziertes Modell.
- Reduktion der Rechenzeiten für Off-line Simulationen um den Faktor 15.
- Die bauteilorientierte Darstellung erlaubt eine direkte Anwendbarkeit für Designstudien und Optimierungsaufgaben wie z.B. der Optimierung der Lage von Anlenkpunkten.
- ODE Darstellung der Bewegungsgleichungen von Radaufhängungen zur Anwendung in Echtzeitsystemen.
- Echtzeitfaktor von 0,55 bei Verwendung des expliziten Eulerverfahrens.

## Literatur

[1] Dr. W. Rulka: *Effiziente Simulation der Bewegungsgleichungen mechatronischer Systeme für industrielle Anwendungen*, Dissertation an der TU-Wien 1998 bzw. DLR IB-532-01-06.

[2] Dr. W. Trautenberg: *Bidirektionale Kopplung zwischen CAD- und Mehrkörpersystemen*, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 342, Düsseldorf, VDI Verlag 2001.

[3] Dr. A. Eichberger: *Generating Multibody Real-Time Models for Hardware-in-the-Loop Applications*; to appear in Proceedings of AVEC 2002, Hiroshima.