

Eine flexibel konfigurierbare Modellumgebung für die Fahrdynamiksimulation

S. Klotzbach,

DMecS Development of Mechatronic Systems GmbH und Co. KG, Köln

T. Herfeld, H. Henrichfreise,

Cologne Laboratory of Mechatronics (CLM), Fachhochschule Köln

Kurzfassung

Dieser Beitrag beschreibt eine auf Matlab/Simulink basierende Modellumgebung für die Fahrdynamiksimulation. Mit ihr werden Fahrzeugmodelle, zugeschnitten auf eine bestimmte Entwicklungsaufgabe, flexibel konfiguriert. Dies wird durch eine komponentenbasierte Struktur unterstützt, in die Modelle von Fahrzeugkomponenten wie Aufbau und Räder, Fahrwerk, Reifen, Antriebsstrang etc. eingefügt werden. Eine Bibliothek mit echtzeitfähigen Modellen bildet dafür die Grundlage. Darüber hinaus unterstützt ein selbst entwickeltes Software-Tool das Aufstellen der Modellgleichungen für Fahrzeug-Mehrkörpersysteme. Damit besitzt die Modellumgebung ein großes Anwendungsspektrum im Bereich der Fahrdynamiksimulation und Entwicklung von Fahrzeugkomponenten. Dies wird anhand von Beispielen dargestellt.

Abstract

This paper describes a MATLAB/Simulink based environment for the simulation of vehicle dynamics. It allows the flexible configuration of vehicle models, which are customized for a specific application. This is supported by a component-based structure, into which models of vehicle components like body and wheels, suspension, tire, and powetrain are inserted. The necessary basis is formed by a library of real-time capable vehicle component models. Furthermore, a self-developed software tool supports the generation of the model equations for multi-body systems. Consequently, the model environment features a broad range of applications in the field of vehicle dynamics simulation and development of vehicle components. This will be shown by examples.

1. Einleitung

Innovationen in der Fahrzeugtechnik sind immer häufiger geprägt durch aktive Systeme, die einen gezielten Eingriff in das Fahrverhalten ermöglichen und somit für mehr Sicherheit und Komfort sorgen. Zu deren Entwicklung setzt sich die mechatronische Entwicklungsmethodik zunehmend durch und löst konventionelle Methoden ab. Die modellbasierte Vorgehensweise ermöglicht es, Aktorik, Mechanik, Sensorik sowie Steuer- und Regelalgorithmen in einem ganzheitlichen Entwurf optimal zu gestalten und aufeinander abzustimmen. In diesem Rahmen gewinnen Fahrzeugmodelle und die HIL-Simulation immer mehr an Bedeutung.

In einem Kooperationsprojekt der DMecS - Development of Mechatronic Systems GmbH & Co. KG und dem Labor für Mechatronik (Cologne Laboratory of Mechatronics, CLM) der Fachhochschule Köln wurde eine Modellumgebung für die Fahrdynamiksimulation entwickelt. Diese enthält ein modular aufgebautes Simulationsmodell, eine Bibliothek mit Komponentenmodellen und verschiedene Software-Werkzeuge. Damit lassen sich Fahrzeugmodelle für unterschiedliche Aufgabenstellungen flexibel konfigurieren.

2. Simulationsmodell

Das in Bild 1 dargestellte Simulationsmodell enthält in der ersten Modellebene Subsysteme für Fahrer und Straße, für die einzelnen Fahrzeugkomponenten Aufbau und Räder, Radaufhängung, Motor, Antriebsstrang, Bremsanlage, Lenkung und Reifen, für Aerodynamik, Steuerungs- und Regelungsfunktionen (ABS, ASR etc.) sowie für die Realisierung von Schnittstellen bei einer HIL-Anwendung.

Die Einbindung von eigenen Komponentensubsystemen in die Modellstruktur ist ebenfalls möglich. Alle Subsysteme kommunizieren über einen Signalbus, der die Ausgangssignale der einzelnen Komponentenmodelle in Sub-Bussen enthält.

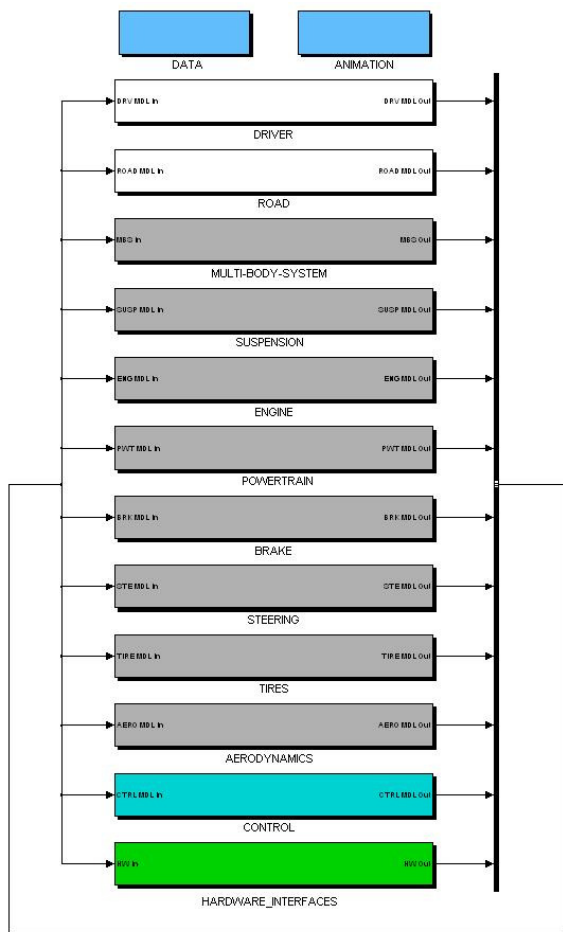


Bild 1: Erste Modellebene mit Komponentensubsystemen

Den Aufbau der Komponentensubsysteme in der zweiten Modellebene zeigt Bild 2.

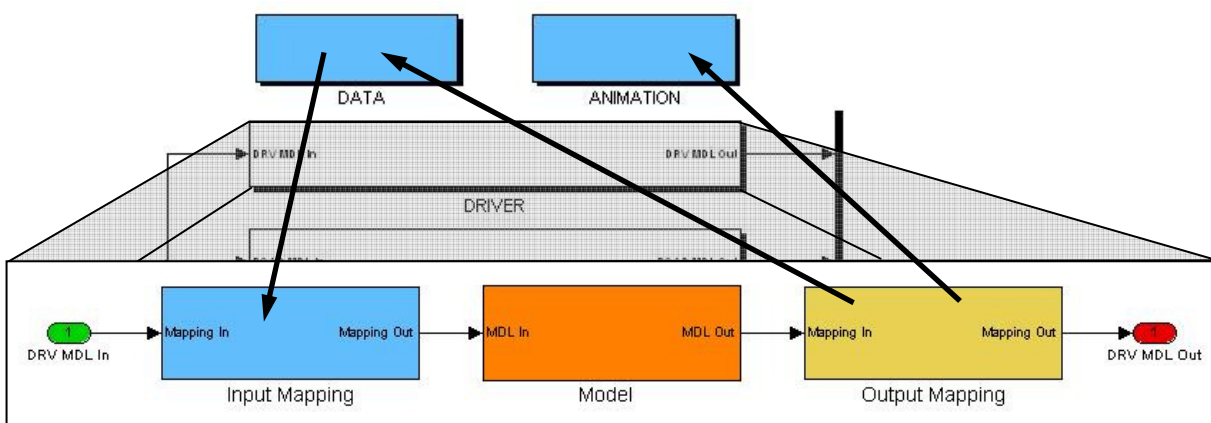


Bild 2: Zweite Modellebene eines Komponentensubsystems und Verbindung zu Subsystemen für den Zugriff auf Daten und die Animation

Neben einem Modell-Subsystem, in dem sich das eigentliche Komponentenmodell befindet, sind in dieser Modellebene sogenannte Mapping-Subsysteme enthalten. Diese Subsysteme

stellen Verbindungen zu einem Daten- und einem Animations-Subsystem auf der ersten Modellebene her. Im Daten-Subsystem werden die Ausgänge der Komponentenmodelle gesammelt, so dass für die Ergebnisdarstellung auf alle benötigten Signale an einer zentralen Stelle zugegriffen werden kann. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Eingänge der Komponentenmodelle mit Testsignalen zu beschalten. Auf diese Weise kann komfortabel überprüft werden, ob ein Komponentenmodell bei einer bestimmten Anregung die erwarteten Zeitantworten liefert, ohne es aus dem Simulationsmodell herauslösen zu müssen. Das Subsystem für die Animation verarbeitet die für die dreidimensionale Darstellung der Fahrzeugbewegungen benötigten Signale. Durch diesen Aufbau des Simulationsmodells ist der Zugriff auf Signale unabhängig von den gewählten Komponentenmodellen.

Das Modell-Subsystem enthält, wie in Bild 3 dargestellt, in einer dritten Modellebene weitere Subsysteme für die Anpassung der Ein- und Ausgangssignale und die Implementierung der eigentlichen Modellgleichungen.

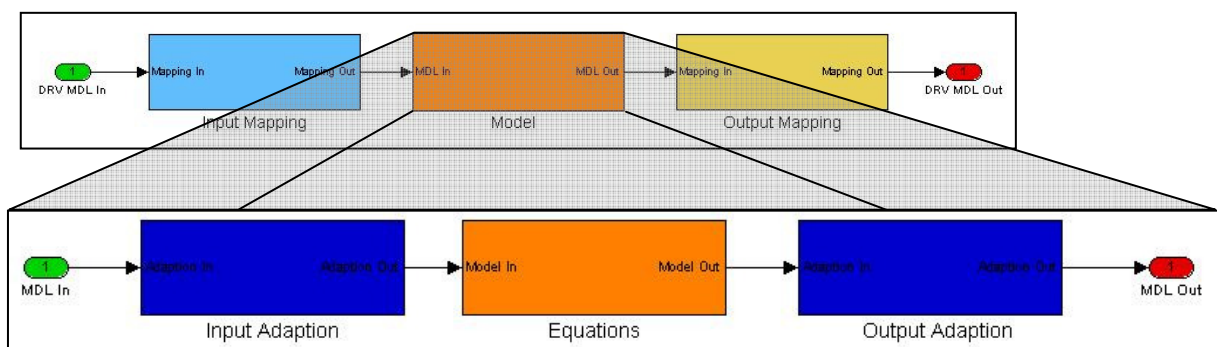


Bild 3: Dritte Modellebene mit Subsystemen für die Signalanpassung und Implementierung der Modellgleichungen

Eine Anpassung der Signale kann beim Einsatz von Komponentenmodellen, die nicht aus der Modellbibliothek stammen, erforderlich sein. Solche Modelle können dadurch ohne Veränderung in das Simulationsmodell integriert werden.

3. Modellbibliothek

Die Modellbibliothek (Bild 4) stellt für alle im vorherigen Abschnitt erwähnten Komponentensubsysteme die Modelle bereit. Diese berücksichtigen verschiedene Varianten von Komponenten in gegebenenfalls unterschiedlicher Modellierungstiefe.

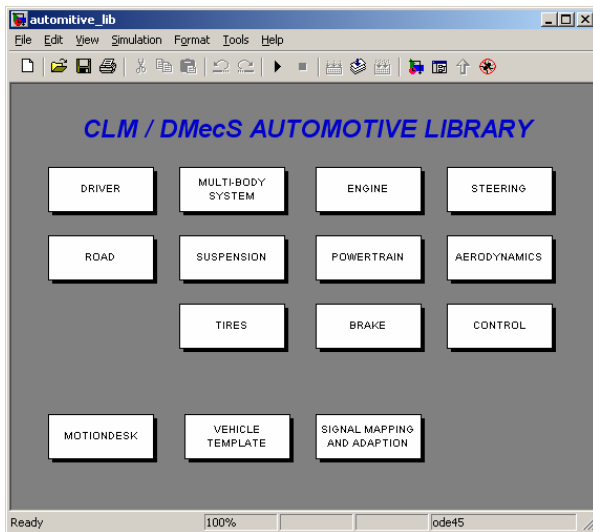


Bild 4: Modellbibliothek

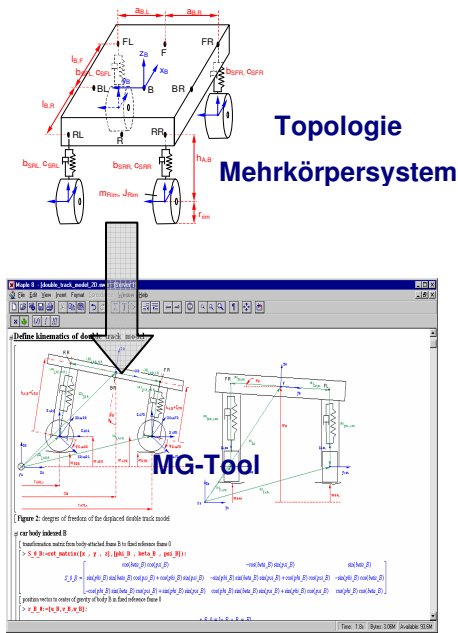
Alle Komponentenmodelle sind echtzeitfähig. Strukturumschaltungen, wie sie zum Beispiel beim Blockieren von Rädern oder Schaltvorgängen auftreten, werden für numerisch zuverlässige Simulationsergebnisse durch eine spezielle Implementierung berücksichtigt. Zu jedem Komponentenmodell existiert eine eigene Parameterdatei.

Im Folgenden wird auf die zur Verfügung stehenden Modelle in den einzelnen Gruppen der Bibliothek eingegangen.

Aufbau und Räder

Der Aufbau und die Räder eines betrachteten Fahrzeugs werden als Mehrkörpermodell beschrieben. In der Bibliothek befinden sich unterschiedliche Ein- und Zweispurmodelle, die zwischen drei und sechzehn Freiheitsgraden aufweisen. Die Schnittstellen der Modelle sind so beschaffen, dass man frei in der Wahl der Art der Radaufhängung und des Antriebs ist, die in separaten Komponentenmodellen realisiert sind.

Die Mehrkörpermodelle wurden mit Hilfe eines in Maple implementierten Software-Werkzeugs, dem Model-Generation-Tool (MG-Tool), generiert. Das MG-Tool erzeugt ausgehend von einer Beschreibung der Topologie eines Mehrkörpersystems nach dem Verfahren von Newton-Euler oder Lagrange [1] die nichtlinearen Bewegungsgleichungen. Diese werden automatisch in Form einer C-codierten S-Funktion zusammen mit dem zugehörigen Simulink-Block und der Parameterdatei nach MATLAB exportiert. Bild 5 verdeutlicht die Arbeitsweise des Werkzeugs.



The screenshot shows a MATLAB script editor with a Simulink block parameter file. The code includes comments in German and MATLAB commands for loading models and deconstructing force vectors. A table of parameters is visible at the bottom of the script.

```

1 % M-SKRIPT
2 % Load model
3 %
4 % FILE
5 % ...dtv_test
6
7 % Deconstruct force to its components in x- and y-direction
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30

```

| | |
|---|--------|
| 8 | Col 17 |
|---|--------|

Bild 5: Generierung von Mehrkörpermodellen mit dem MG-Tool

Zusätzlich bietet das MG-Tool die Möglichkeit die Bewegungsgleichungen in linearisierter Form nach MATLAB zu exportieren. Dort können sie für Analyse- und Entwurfszwecke genutzt werden.

Mit dem MG-Tool lässt sich die Bibliothek bequem um andere auf bestimmte Entwicklungsaufgaben zugeschnittene Mehrkörpermodelle erweitern.

Radaufhängung

Die Bibliothek enthält zur Zeit zwei verschiedene Modelle von Radaufhängungen. Ein einfaches Modell einer Teleskopaufhängung und ein detailliertes Modell einer Mc-Pherson-Aufhängung. Die Radhubkinematik ist mit Hilfe von Tabellen realisiert. So können zum Beispiel Spur- und Sturzänderungen eines Fahrzeugs vermessen und die entsprechenden Kennlinien im Modell hinterlegt werden. Die Kopplung des Modells der Radaufhängung mit dem Mehrkörpermodell erfolgt über die auf Räder und Aufbau wirkenden eingprägten Kräfte und Momente sowie die durch Bindungen hervorgerufenen Zwangsbewegungen und deren Ableitungen nach der Zeit. Die darin enthaltenen Ableitungen der Zwangsbewegungen nach dem Radhub sind ebenfalls in Tabellen hinterlegt.

Weitere Modelle von Verbund- und Schräglenkerachsen sind in Entwicklung.

Antriebsstrang

Zur Erzeugung realitätsnaher Antriebsmomente enthält die Bibliothek ein kennfeldbasiertes Motormodell. Der Aufbau eines Antriebsstranges erfolgt mit Hilfe von Modellen für Schalt- und Automatikgetriebe, Drehmomentenwandler, Trocken- und Naßkupplungen sowie für einfache bis variabel sperrbare Differentiale. Die elastischen Antriebswellen werden mit Feder-Dämpfer-Modellen nachgebildet. Für das Automatikgetriebe ist eine als Zustandsautomat realisierte Schaltlogik verfügbar, die zusätzlich Tiptronik-Modus ermöglicht.

Lenkung

Für einfache Anwendungen stellt die Bibliothek eine Lenkkinematik nach der Ackermannformel zur Verfügung. Zusätzlich existiert ein detailliertes Modell der Lenkmechanik, das Reibung im Lenkgetriebe und die ungleichförmige Übersetzung von Spurstange und Spurhebel berücksichtigt. Für eine Servounterstützung können Modelle von elektromechanischen und hydraulischen Aktoren verwendet werden.

Bremsanlage

Bild 6 zeigt die in der Bibliothek verfügbare hydraulische Zweikreisbremsanlage. Im Modell enthalten sind das Pedal mit Übersetzung, der Bremskraftverstärker sowie der Haupt- und die Radbremszylinder. Die Leitungen zu den Radbremszylindern werden mit ihren hydraulischen Widerständen und Kapazitäten berücksichtigt. Für den Eingriff von ABS, ASR oder ESP sind alle erforderlichen Ventile, Pumpen und Speicher integriert.

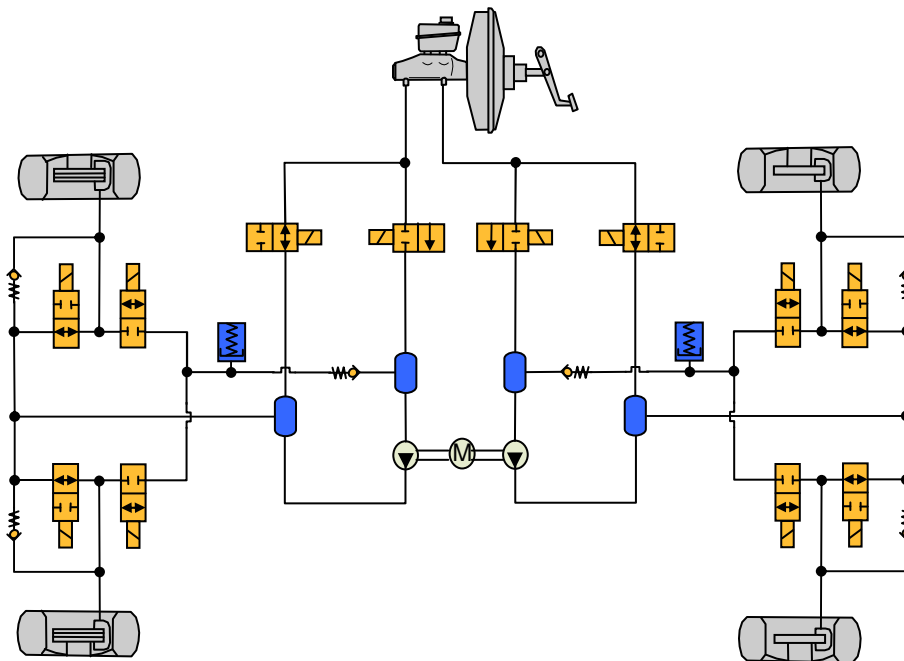


Bild 6: Hydraulische Bremsanlage

Zur Nachbildung der Reibmomente an den Bremsscheiben kommt das Reibmodell aus [2] zum Einsatz. Anstelle des detaillierten Modells steht ein vereinfachtes Modell ohne Bremshydraulik zur Verfügung.

Reifen

Als Reifenmodell wurde ein einfaches semiempirisches Modell implementiert, das auf dem Modell aus [3] basiert. Die Kennlinien des Reifens werden darin mit mathematischen Funktionen approximiert und sein Einlaufverhalten mit Hilfe eines einfachen physikalischen Ersatzmodells erster Ordnung dargestellt. Das Modell berücksichtigt neben der Umfangs- und Seitenkraft, die Kräfte und Momente infolge Radsturz sowie das Rückstell- und das Bohrmoment. Die Schnittstelle des Reifenmodells ist mit der komplexer kommerzieller Modelle identisch, so dass es bei Bedarf leicht durch diese ersetzt werden kann.

Straße

Die Straße ist im Simulationsmodell mit Hilfe einer S-Funktion realisiert. Diese erhält Daten zum Verlauf und Reibwert der Straße. Hinzu kommt für die Animation eine VRML-Datei, die den Straßenverlauf dreidimensional darstellt.

Für Standardmanöver, wie μ -Split-Bremmung, stationäre Kreisfahrt oder doppelter Spurwechsel, sind bereits fertige Datensätze vorhanden. Eigene Straßenverläufe können mit Hilfe des in Bild 7 dargestellten Software-Werkzeuges erzeugt werden.

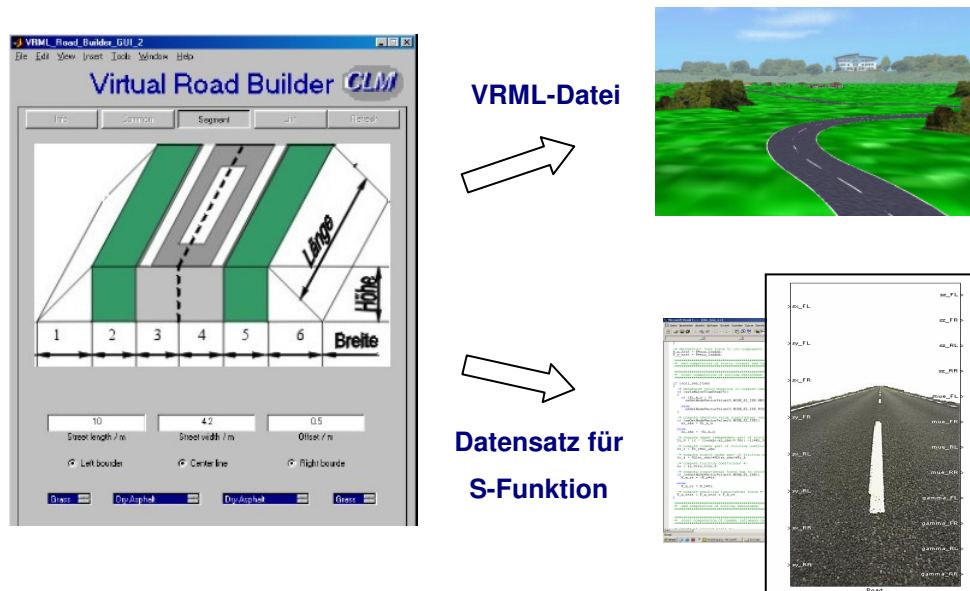


Bild 7: Software-Werkzeug zur Erzeugung von Straßenverläufen

Aus einem eingegeben Straßenverlauf werden automatisch der Datensatz für die S-Funktion und die VRML-Datei für die Animation generiert. Das Werkzeug verarbeitet ebenso gemessene Straßenverläufe.

4. Anwendungsbereiche

Durch ihren modularen Aufbau eröffnet die entwickelte Modellumgebung, wie in Bild 8 dargestellt, vielfältige Anwendungsbereiche.

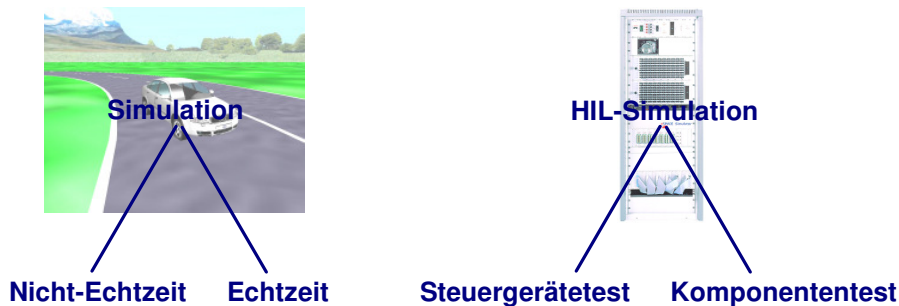


Bild 8: Anwendungsbereiche

Die Simulation unterstützt die Entwicklung von Fahrzeugkomponenten bereits in einem sehr frühen Entwicklungsstadium, in dem zum Teil keine Prototypen vorhanden sind. Dabei wird zum Beispiel das Zusammenspiel von Fahrzeugkomponenten mit einem Fahrzeug durch Simulation analysiert und optimiert. In gleicher Weise wird auch die Funktion und Robustheit von Gleit- oder Festkomma-Code für Steuergeräte durch SIL-Simulation überprüft.

Ein weiteres Einsatzgebiet für die entwickelte Modellumgebung ist die Realisierung von HIL-Simulatoren für den Steuergeräte- oder Komponententest. Im ersten Fall wird das Steuergerät oder ein Steuergeräteverbund am simulierten Restsystem betrieben und die Steuergeräte-Software wird auf ihr Verhalten im Fehlerfall oder in kritischen Fahrsituationen getestet. Beim Komponententest durch HIL-Simulation wird das Zusammenspiel realer Fahrzeugkomponenten mit dem simulierten Restsystem überprüft. Beispiele hierfür sind Motoren-, Antriebsstrang-, Lenkungs- oder Fahrwerksprüfstände, bei denen ein Fahrzeugmodell die von den Prüfstandsaktoren einzustellenden Sollgrößen liefert.

Der Einsatz der Modellumgebung wird im Folgenden anhand von zwei Anwendungsbeispielen dargestellt. Das erste Beispiel befasst sich mit dem Entwurf und Test von Fahrdynamikreglern und -beobachtern. Für diese Aufgabenstellung bieten das MG-Tool und die entwickelte Modellumgebung, wie in Bild 6 gezeigt, eine durchgängige Unterstützung.

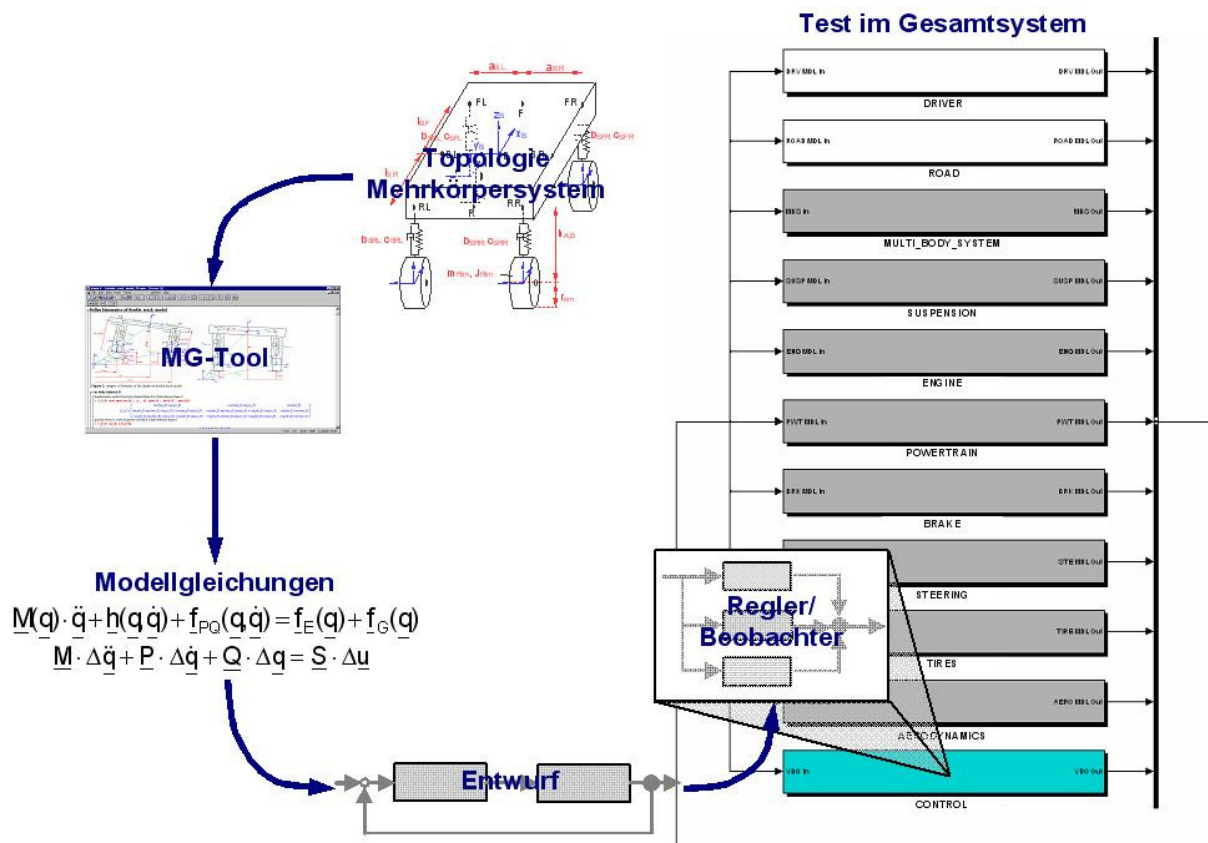


Bild 9: Entwurf und Test von Fahrodynamikreglern und –beobachtern

Ausgangspunkt für den Entwurf von Fahrodynamikreglern und –beobachtern sind zumeist speziell zugeschnittene Fahrzeugmodelle, wie z.B. vereinfachte Ein- oder Zweispurmodelle, die später auch auf Seriensteuergeräten implementiert werden können. Die Herleitung solcher Modelle erfolgt mit Hilfe des MG-Tools. Nach einer Beschreibung der Topologie des zugehörigen Mehrkörpersystems werden die Modellgleichungen in nichtlinearer bzw. linearisierter Form generiert, nach MATLAB/Simulink exportiert und der Regler bzw. Beobachter entworfen. Schließlich werden die entworfenen Funktionen in einem eigenen Komponentensubsystem (“CONTROL“ in Bild 9) in die Modellumgebung integriert. Mit den darin enthaltenen Fahrer-, Straßen- und Fahrzeugmodellen erfolgt der systematische Test im Gesamtsystem durch Simulation.

Im zweiten Anwendungsbeispiel wird die Modellumgebung für die HIL-Simulation genutzt. Betrachtet wird der in Bild 10 dargestellte Aufbau eines HIL-Prüfstandes, mit dem ein realer Motor und Antriebsstrang an Lastmaschinen betrieben wird, die die während eines Fahrmanövers auftretenden Drehmomente an den Rädern einprägen.

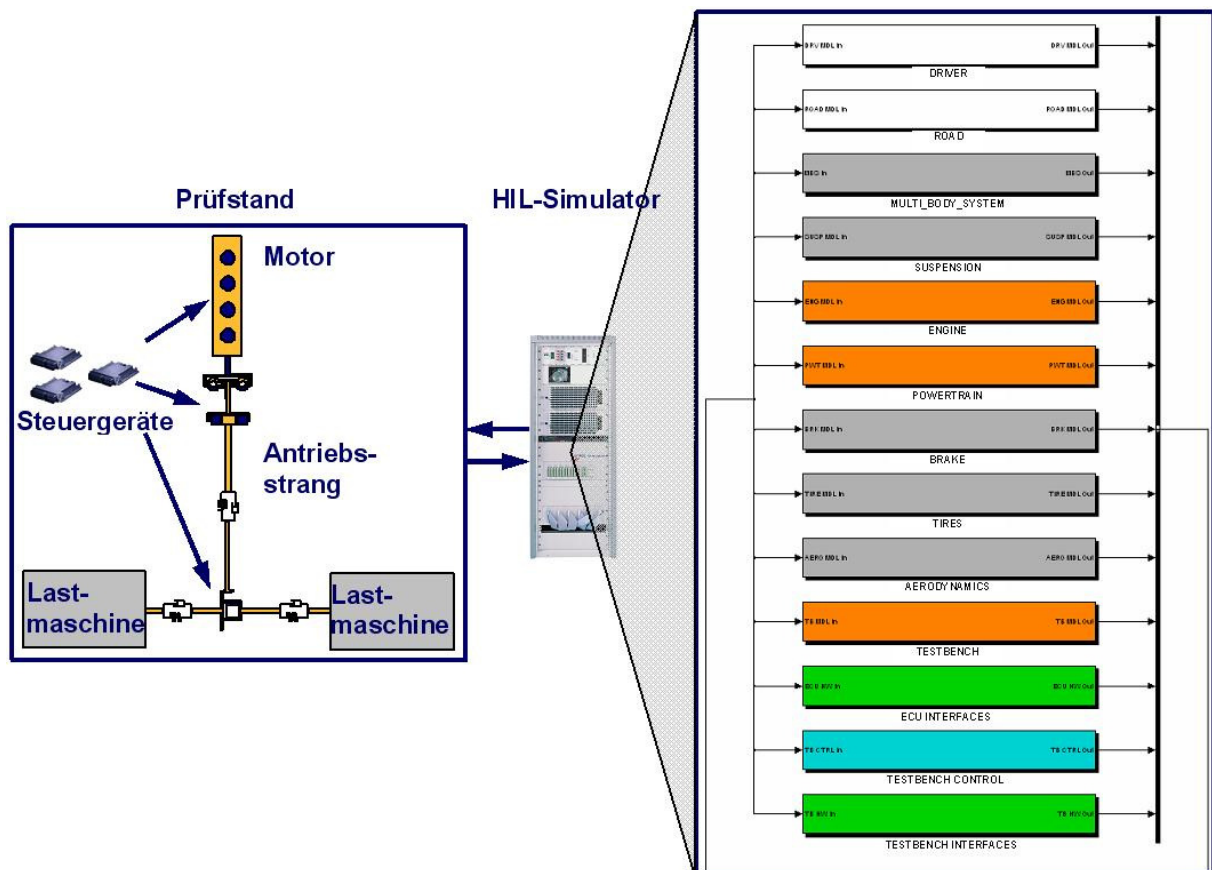


Bild 10: HIL-Prüfstand

Die Berechnung der Sollgrößen für die geregelten Lastmaschinen erfolgt mit Hilfe der in der Modellumgebung enthaltenen Strassen- und Fahrzeugmodellen, die im geschlossenen Kreis mit dem Prüfstand arbeiten. Das Straßenmodell ermöglicht dabei die Vorgabe von Straßenverläufen, die in Testszenarien von einem Fahrermodell reproduzierbar abgefahren werden.

Als weitere Hardware-Komponenten sind in dem dargestellten Aufbau Steuergeräte für Motor, Kupplung, Getriebe und für ein variabel sperrbares Differential enthalten, deren Funktionen während der Prüfläufe getestet und kalibriert werden können. Dazu liefert das Fahrzeugmodell zusätzliche Größen an die Steuergeräte. Ebenso benötigen die Steuergeräte Signale vom Fahrermodell, wie zum Beispiel Gas-, Brems- oder Kupplungspedalstellung sowie für den Gangwechsel.

Für den Gesamtaufbau des Prüfstands bedeutet dies, dass Motor und Antriebsstrang, die Lastmaschinen und die verwendeten Steuergeräte im geschlossenen Kreis mit der Modellumgebung betrieben werden. Dafür sind zusätzliche Komponentensubsysteme ("ECU INTERFACES" und "TESTBENCH INTERFACES" in Bild 10) mit Schnittstellen für die Kommunikation mit Steuergeräten und Prüfstand integriert. Ebenso erfolgt die Regelung der

Lastmaschinen selbst innerhalb der Modellumgebung, in dem die Regelungsalgorithmen in einem Komponentensubsystem ("TESTBENCH CONTROL" in Bild 10) eingebunden werden. Alternativ zum Prüfstandsbetrieb kann der HIL-Simulator mit der Modellumgebung aber auch für den reinen Steuergerätetest genutzt werden. Die erforderlichen Größen von Motor, Antriebsstrang und Lastmaschinen werden dann simuliert. Zu diesem Zweck sind Modelle dieser Komponenten in weiteren Subsystemen ("ENGINE", "POWERTRAIN" und "TESTBENCH" in Bild 10) ebenfalls in die Modellumgebung integriert. In dieser Konfiguration können zum Beispiel neue Software-Versionen auf den Steuergeräten getestet oder neue Testszenarien zunächst in der Simulation überprüft werden, bevor diese am Prüfstand in Betrieb genommen werden.

5. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine flexibel konfigurierbare Modellumgebung für den Einsatz in der Fahrdynamiksimulation vorgestellt. Die Modellumgebung verfügt über eine komponentenbasierte Struktur, in die aus einer Bibliothek Modelle für Komponenten eingefügt werden. Auf diese Weise lassen sich auf unterschiedliche Anwendungen zugeschnittene Fahrzeugmodelle konfigurieren. Dabei können, wie die Anwendungsbeispiele zeigen, eigene Komponentenmodelle leicht in die Modellumgebung eingebunden werden.

Für die Entwicklung zugeschnittener Fahrzeug-Mehrkörpermodelle, wie sie beispielsweise für den Entwurf von Fahrdynamikreglern oder -beobachtern benötigt werden, liefert das vorgestellte MG-Tool durch automatische Generierung der Bewegungsgleichungen und den automatischen Export nach MATLAB/Simulink durch Code-Generierung eine wichtige Unterstützung.

Mit den beschriebenen Eigenschaften stellt die entwickelte Modellumgebung zusammen mit der Modellbibliothek und dem MG-Tool ein leistungsfähiges Paket für die flexible Konfiguration von Fahrzeugmodellen für die Nicht-Echtzeit- und Echtzeit-Simulation sowie die HIL-Simulation für Steuergeräte- oder Komponententests dar.

- [1] P.C. Müller, W. Schiehlen; Technische Dynamik, B.G.Teubner Verlag, 1986
- [2] H. Henrichfreise, S. Klotzbach; Entwicklung, Implementierung und Einsatz eines nichtlinearen Reibmodells für die numerische Simulation reibungsbehafteter mechatronischer Systeme, ASIM 2002, Rostock
- [3] G. Rill; Simulation von Kraftfahrzeugen, Vieweg Verlag, 1994