

Titel: Gekoppelte, unternehmensübergreifende Simulation mobiler Arbeitsmaschinen

Autor: Dr.-Ing. Heinz Böhler
Firma: AGCO GmbH, Marktoberdorf

Co-Autor: Dipl.-Ing. Lars Völker
Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen, KIT

Zusammenfassung

Im Entwicklungsprozess von mobilen Arbeitsmaschinen spielt die Simulation eine immer wichtigere Rolle. Dabei müssen komplexe Systeme aus Mechanik, Hydraulik und Regelung abgebildet werden. Die heute verfügbaren Simulationsprogramme bieten nur mit Einschränkungen die Möglichkeit, diese Systeme mit einem Programm komplett abzubilden. Daneben ist es möglich, für jede Disziplin ein spezialisiertes Programm zu verwenden und durch eine so genannte Co-Simulation zu verbinden. Zahlreiche Programme bieten bereits derartige Schnittstellen an, aber insbesondere bei der Einbindung komplexer hydraulischer Systeme sind noch verschiedene Schwierigkeiten zu überwinden.

Hier soll das Projekt GUSMA Grundlagen erarbeiten und die Anwendung einer Co-Simulation an einem typischen Beispiel einer geregelten Komforthydraulik aufzeigen. Der Prozess der Co-Simulation soll standardisiert und eine Plattform etabliert werden, auf der die gekoppelte Simulation anhand einer standardisierten Vorgehensweise durchgeführt werden kann. Um die gewachsene enge Lieferantenbeziehung, die für den Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen typisch ist, auszubauen, soll die Möglichkeit geschaffen werden, Teilsimulationsmodelle des Lieferanten in das Gesamtmodell einzubauen. Dabei muss ein besonderes Augenmerk auf das Thema Know-how Schutz gelegt werden.

1 Ausgangssituation aus Sicht des Fahrzeugherstellers

Als Hersteller der Traktoren der Marke Fendt steckt die AGCO GmbH in einem Spannungsfeld, das auch viele andere Hersteller und Zulieferer von Mobilien Arbeitsmaschinen betrifft. Auf der einen Seite werden hochkomplexe Systemfahrzeuge entwickelt, die viele Technologien aus den Bereichen Automatisierung, Hydraulik und Pneumatik mit der Fahrzeugmechanik verbinden, und dies bei immer kürzeren Entwicklungszeiten. Auf der anderen Seite zwingen die im Vergleich zum On Road Bereich (PKW, Truck) kleineren Stückzahlen und die dadurch kleineren Entwicklungsbudgets den Fahrzeughersteller dazu, die häufig noch im Aufbau befindlichen eigenen Simulationskapazitäten möglichst effektiv zu nutzen und dabei auch die Kompetenz der Zulieferer mit einzubinden.

Die Komplexität der Fahrzeuge soll beispielhaft an den Komfortsystemen eines Fendt-Großtraktors aus der Vario 900 Baureihe (**Abbildung 1**) vorgestellt werden [1]:

- Hydropneumatische Einzelradfederung an der Vorderachse mit einer fahrgeschwindigkeitsabhängigen Wankabstützung (FSC: Fendt Stability Control) und mit automatischer Niveauregulierung
- Drei-Punkt-Kabinenlagerung mit Luftfederelementen mit automatischer Niveauregulierung
- Fahrersitz mit semiaktiver Luftfederung und mit automatischer Niveauregulierung
- Aktive Schwingungstilgung des Krafthebers beim Gerätetransport im Heck
- Passive Federung des Krafthebers bei Gerätetransport in der Front

- Hohe Automatisierung, z.B. Motor-Getriebe-Management-System TMS mit dem stufenlosen VARIO Getriebe, Vorgewendemanagement Variotronic, GPS basiertes automatisches Spurführungssystem Autoguide

Diese Ausstattung ergibt einen Federungs- und Lenkkomfort auf LKW-Niveau und ermöglicht erstmals eine Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h bei Standardtraktoren. Das Gesamtfederungspaket muss dabei auf unterschiedliche Fahrprofile und Einsätze abgestimmt werden.

Zukünftige Entwicklungen werden verstärkt aktiv regelnde Systeme beinhalten, so dass eine effektive Abstimmung z.B. des Fahrkomforts und eine Erprobung der dazugehörigen Software ohne Simulation kaum mehr möglich sein wird.



Abbildung 1: Großtraktor Fendt 900 Vario (265 kW)

Um diese komplexen Systeme simulieren und optimieren zu können, müssen die Teilsysteme Mechanik, Hydraulik bzw. Pneumatik und Regelung miteinander verknüpft betrachtet werden. Das Ziel ist es, dass die entsprechenden Teilmodelle vom jeweiligen Fachexperten mit dessen bevorzugtem Programm erstellt werden und in eine der jeweiligen Aufgabenstellung angepasster Detaillierungstiefe auch den anderen Bereichen für deren Aufgaben zur Verfügung gestellt werden können. Ein Gesamtmodell muss also verschiedene Modelle durch eine Co-Simulation verknüpfen.

Für jede der genannten Disziplinen Mechanik, Hydraulik, Regelung gibt es spezialisierte Software, die die Modellierung durch z.B. zahlreiche Bibliothekselemente unterstützen, aber andere Disziplinen nur sehr schlecht abbildet.

Für die Modellierung der mechanischen Struktur mit den Fahrzeugreifen haben sich Mehrkörpersimulationsprogramme wie z.B. ADAMS oder SIMPACK bewährt. Hydraulische Systeme können mit Programmen wie z.B. AMESIM oder DSHplus gut modelliert werden. Für die Entwicklung und Modellierung von Regelkreisen hat das Programm Matlab/Simulink eine große Verbreitung gefunden.

Da zum Teil komplette mechatronische Systeme von Zulieferern gekauft werden (z.B. Fahrersitz), kann hier eine Modellierung nur mit Unterstützung des Zulieferers erfolgen.

Die im Projekt verwendete Software wird oft auch von den Zulieferern verwendet, so dass dort im Prinzip Teilmodelle von deren Komponenten zur Verfügung gestellt werden könnten, wenn die gleiche Software genutzt wird und sichergestellt werden könnte, dass deren Know-how dabei geschützt wird. Die Zulieferer verfügen oft über geeignete Prüfstände, um deren Modelle parametrieren und validieren zu können, so dass eigene aufwändige Versuche zur Parameterbestimmung überflüssig würden.

2 Stand der Simulationstechnik

Zur Abbildung technischer Systeme in der Simulation haben sich im Laufe der Jahre verschiedene Simulationsmöglichkeiten entwickelt. So gibt es heutzutage für jedes Fachgebiet ein spezialisiertes Softwaretool, mit dem dieses Gebiet simuliert werden kann. Teilweise wurden diese Tools zu so genannten Multi-Domänen-Tools weiterentwickelt, indem dem Anwender Programmbibliotheken aus verschiedenen Fachgebieten zur Verfügung gestellt werden. Somit lassen sich komplexe Systeme in einem Tool abbilden, wobei die mögliche Detaillierungstiefe der Modelle bei manchen Fachgebieten begrenzt ist und die Bedienfreundlichkeit leidet. [2]

Darüber hinaus wurden Schnittstellen entwickelt, um verschiedene Softwaretools und somit auch verschiedene Fachgebiete miteinander koppeln zu können. Diese Simulationsform wird mit dem Begriff der Co-Simulation oder der gekoppelten Simulation bezeichnet. Grundlage dieser Simulationsform ist der Austausch von Energien und Leistungen über Zustandsvariablen. Zustandsvariablen beschreiben die Zustände eines Systems (Wege, Geschwindigkeiten, Drücke, etc.). Sie werden durch Integration aus den Eingangsgrößen berechnet und stellen die Systemreaktion auf die Eingangsgröße dar.

Mit Hilfe der gekoppelten Simulation können somit fachgebietsübergreifende Systeme abgebildet werden. Im Gegensatz zu Multi-Domänen-Tools wird bei dieser Art der Simulation für jedes Fachgebiet ein hierfür speziell entwickeltes Softwareprodukt eingesetzt. Grundsätzlich ist die Wahl der jeweiligen fachgebietsspezifischen Software frei, lediglich die Austauschgrößen müssen zum jeweils anderen Modell passen.

Durch die Verwendung spezialisierter Software lassen sich die Teilsysteme und somit auch das Gesamtsystem sehr detailliert abbilden. Allerdings wächst mit der Detaillierung der Modelle auch der Rechenaufwand, wodurch die Rechenzeit ansteigt. Selbst bei einfachen Modellen liegt die Rechenzeit bei der gekoppelten Simulation deutlich über der Rechenzeit bei einer Simulation mit einem Multi-Domänen-Tool. Dies hängt mit der festen Kommunikationsschrittweite bei der gekoppelten Simulation gegenüber der variablen Simulationsschrittweite bei der Simulation mit einem Softwaretool zusammen.

Darüber hinaus benötigt es spezielles Wissen auf dem Gebiet der Simulation z.B. im Bereich der Kommunikationsintervalle, um eine gekoppelte Simulation durchführen zu können. Viele Firmen aus dem Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen haben dazu noch wenig Erfahrung. Auch für die Erstellung der einzelnen Teilmodelle besitzt nicht jede Firma die dafür notwendigen Experten. Daher wird die gekoppelte Simulation heute nur in wenigen Unternehmen eingesetzt.

Allerdings bietet die gekoppelte Simulation neben der hohen möglichen Modellierungstiefe theoretisch die Möglichkeit, Zulieferer besser in die Modellerstellung einzubinden, da das Gesamtsystem aus verschiedenen Teilmodellen aufgebaut wird und so eine Arbeitsteilung relativ einfach möglich ist. Hierfür sind jedoch Themen wie der Know-how-Schutz der Teilmodelle oder die Parameter- und Datenverwaltung bei der gekoppelten Simulation zu klären.

Die Untersuchung der gekoppelten Simulation hinsichtlich einer unternehmensübergreifenden Nutzbarkeit und eine Verbreitung der Methode der gekoppelten Simulation im Bereich der Mobilien Arbeitsmaschinen sind Inhalt des Projekts GUSMA, dessen Projektidee nachfolgend beschrieben werden soll [3].

3 Projektidee GUSMA

Mit Hilfe der gekoppelten Simulation kann der Entwicklungsprozess mobiler Arbeitsmaschinen im Bereich der Simulation unterstützt werden. Das Projekt GUSMA – **G**ekoppelte **U**nternehmensübergreifende **S**imulation **M**obiler **A**rbeitsmaschinen – hat sich daher zum Ziel gesetzt, den Simulationsprozess bei der gekoppelten Simulation an einem Beispiel aus dem Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen zu untersuchen und zu vereinfachen, so dass diese Simulationsart eine breitere Anwendung auf dem Gebiet der mobilen Arbeitsmaschinen findet. Hierfür soll der Prozess standardisiert werden. Besonderes Augenmerk wird auf den Know-how-Schutz der Teilmodelle gelegt, um eine unternehmensübergreifende Verwendung von (Teil-) Modellen bei der Simulation zu ermöglichen.

Kernstück der Projektidee ist der Gedanke einer Plattform, auf der die gekoppelte Simulation anhand einer standardisierten Vorgehensweise durchgeführt werden soll. Das zu simulierende System soll dabei in Teilmodelle unterschiedlicher Fachdisziplinen aufgeteilt werden. Mit Hilfe spezialisierter Software werden die einzelnen Teilmodelle erzeugt und auf der gemeinsamen Plattform zu einem Gesamtmodell zusammengefügt. Durch die Einbindung der Softwarehersteller soll ein Know-how Schutz der Teilmodelle realisiert werden.

Auf der Plattform soll der Benutzer die Möglichkeit haben, über eine grafische Benutzeroberfläche durch Vernetzung der einzelnen Teilemodelle das Gesamtmodell aufzubauen. Anschließend muss eine Parameterverwaltung die für verschiedene Teilmodelle gemeinsamen Parameter identifizieren und eine Bestimmung der Startwerte für die Simulation ermöglichen. Während der Simulation wird eine Visualisierung der Ein- und Ausgabegrößen benötigt. Eine Möglichkeit der Datenspeicherung schließt die Anforderungsliste an eine Plattform ab.

Die Vorgehensweise soll an einem konkreten Beispiel aus dem Bereich der Komforthydraulik untersucht werden. Die Simulationsergebnisse werden mit Prüfstandsversuchen verglichen.

Die Projektleitung liegt beim Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen MOBIMA des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Daneben sind noch die Firmen AGCO GmbH als Fahrzeughersteller, die HYDAC International GmbH als Komponentenhersteller für Hydraulik und die Firmen FLUIDON GmbH, LMS Deutschland GmbH und SIMPACK AG als Hersteller von Simulationssoftware beteiligt. Das Projekt wurde am 01.08.2008 gestartet und hat eine Laufzeit von 3 Jahren.

Nachfolgend soll der bisherige Stand des Projektes dargestellt und auf bestimmte Details eingegangen werden.

4 Umsetzung der Projektziele

Im Projekt GUSMA wird die Vorgehensweise für die gekoppelte Simulation am Beispiel einer hydropneumatischen Vorderachsfederung eines Traktors mit automatischer Niveauregulierung untersucht, die in dieser Form bereits seit vielen Jahren auf dem Markt ist [4]. Diese besteht aus mechanischen, hydraulischen und Regelungs-Elementen. In **Abbildung 2** ist das Prinzip der Vorderachsfederung dargestellt.

An einer Rahmenkonstruktion (1) ist die Federschwinge (2) angekoppelt, die eine Federung der Vorderachse ermöglicht. Die Pendelachse (3) lässt eine Pendelbewegung der Vorderachse zu. Die Federwirkung der Vorderräder wird durch zwei Hydraulikzylinder (4) ermöglicht. Diese sind an zwei Hydrospeicher (5) angeschlossen, zwischen denen ein Ölaustausch stattfinden kann. Durch eine Regelung der Drücke auf der Bodenseite des Zylinders wird eine Niveauregulierung bei verschiedenen Betriebszuständen des Fahrzeugs realisiert.

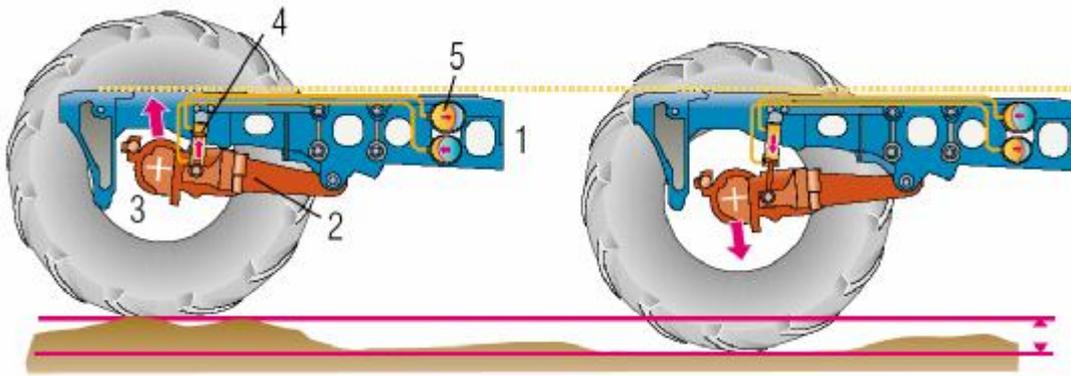


Abbildung 2: Detaildarstellung der Vorderachsfederung

Die Vergleichsmessungen werden an einem servohydraulischen Prüfstand des Lehrstuhls MOBIMA durchgeführt (**Abbildung 3**). Dabei können sowohl synthetische Sinusanregungen als auch reale Fahrmanöver aufgebracht werden.

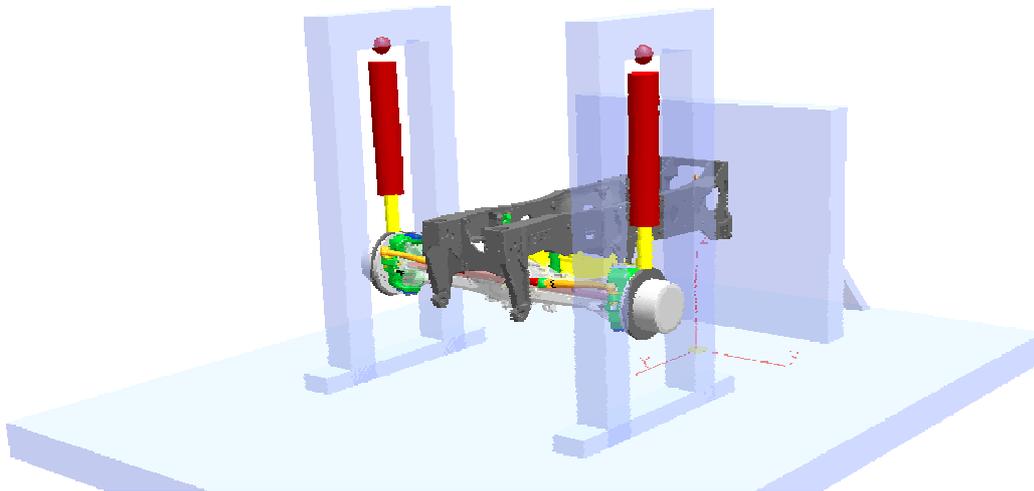


Abbildung 3: Modell des Prüfstandsbaus am Lehrstuhl MOBIMA

Der mechanische Teil des gesamten Prüfstandsbaus wurde bei der Modellierung mit dem Mehrkörpersimulationstool SIMPACK in einzelne Substrukturen (Vorderachse mit allen Federungselementen, Fahrzeugrumpf, Prüfstandsbaus mit Anregung) untergliedert. Dadurch kann die Substruktur der Vorderachse nach einer Validierung am Prüfstand direkt in ein Fahrzeugmodell übernommen werden.

Das Regelungsmodell wurde mit der Software MATLAB/ Simulink erstellt. Dieser Regler könnte zukünftig im Rahmen eines Rapid Control Prototyping Prozesses nach einer Überprüfung an den Simulationsmodellen für die Entwicklung des Seriencodes verwendet werden.

Die Fachabteilung Hydraulik oder in diesem Projekt der Zulieferer stellt ein hydraulisches Teilmodell mit dem Simulationsprogramm AMESIM der Fa. LMS auf, bestehend aus den Zylindern, Speichern und der Ventilbetätigung. Ein Modell der Hydraulikversorgung wird mit dem Programm DSHplus der Fa. Fluidon erstellt.

Die Simulation des Gesamtsystems in Form einer gekoppelten Simulation erfolgt in diesem Projekt durch den Lehrstuhl MOBIMA, der damit die Rolle des Fahrzeugherstellers übernimmt.

Als Plattform für eine Zusammenführung der Teilmodelle wird zunächst MATLAB/Simulink gewählt. Dieses Softwaretool ist speziell für die Regelungsentwicklung weit verbreitet und bietet dem Anwender eine grafische Benutzeroberfläche mit Visualisierungs- und Speichermöglichkeiten.

Die Teilmodelle werden über ihre jeweiligen Zustandsgrößen miteinander verknüpft. Zustandsgrößen sind zeitabhängige, während der Simulation veränderliche Größen, die die Input- und Outputgrößen der Teilmodelle darstellen. Die Zustandsgrößen ergeben sich aus der mathematischen Beschreibung der Teilmodelle und verändern sich während der Integration des Gesamtmodells.

Die Verknüpfung verschiedener Teilmodelle ist in **Abbildung 4** beispielhaft dargestellt. Dieses fiktive System besteht aus einem mechanischen, zwei hydraulischen und zwei regelungstechnischen Teilmodellen. Für jedes Teilmodell sind die jeweiligen Input- und Outputgrößen dargestellt.

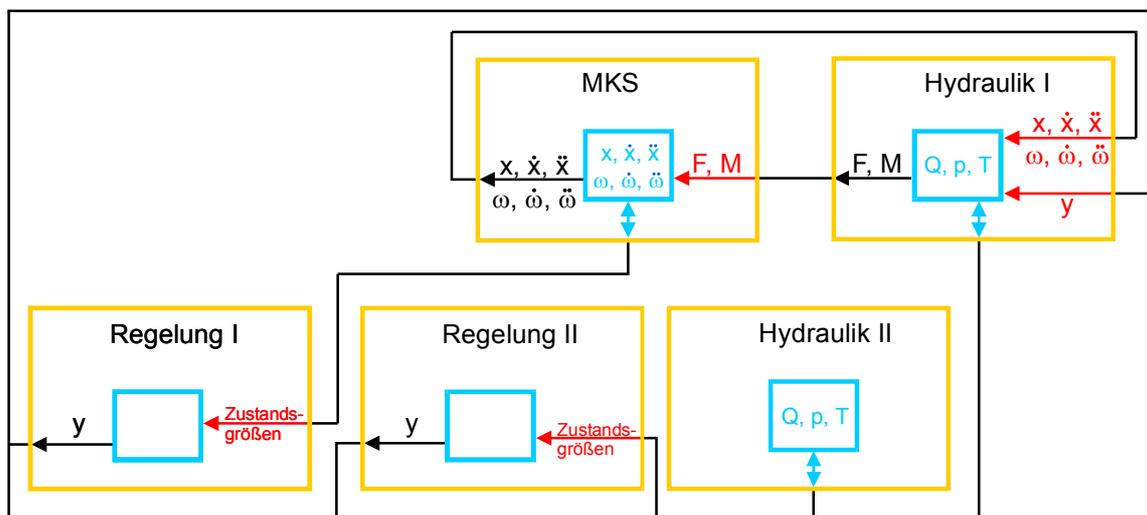


Abbildung 4: Verknüpfung der einzelnen Teilmodelle unterschiedlicher Simulationsprogramme

Die Grundlage dieser Struktur sind die Material-, Energie- und Informationsflüsse zwischen den Teilmodellen. Die Plattform ermöglicht sowohl Teilmodelle aus unterschiedlichen wie auch aus gleichen Fachdisziplinen miteinander zu koppeln. Die Austauschgrößen lassen sich somit noch in interne (innerhalb einer Fachdisziplin, blaue Pfeile) und externe (fachdisziplinübergreifend, schwarze Pfeile) unterscheiden.

Ein wesentlicher Bestandteil bei der Erstellung der Teilmodelle ist die Parametrierung der Modelle. Parameter sind zeitunabhängige, während der Simulation unveränderliche Größen. Mit Parametern werden beispielsweise Geometrien beschrieben. Im Projekt GUSMA werden drei Parametergruppen unterschieden. Es gibt geschützte Parameter: Sie können nur vom Modellersteller gelesen und verändert werden. Mit ihrer Hilfe soll das Know-how geschützt werden. Änderbare Parameter können vom späteren Anwender geändert werden (z.B. Blendengröße). Dadurch sollen Optimierungsrechnungen beim Anwender ermöglicht werden. Als Drittes gibt es noch gemeinsame Parameter. Dies sind Parameter, die von verschiedenen Teilmodellen verwendet werden müssen (z.B. Kolbendurchmesser) und daher im Gesamtsimulationsmodell einheitlich gesetzt werden sollen.

Somit ergibt sich für die standardisierte gekoppelte Simulation folgender, in **Abbildung 5** dargestellter Ablauf. Nachdem die Teilmodelle auf die Plattform gebracht und miteinander vernetzt wurden, wird ein Pre-Process durchlaufen. Im Pre-Process werden alle Ein- und Ausgabegrößen visualisiert und bei Bedarf deren Startwerte berechnet. Die gemeinsamen Parameter werden identifiziert und zusammen mit den änderbaren Parametern gesetzt. Die im Pre-Process erzeugten Simulationsdatensätze werden im anschließenden

Initialisierungsprozess auf die Teilmodelle übertragen. Anschließend kann die Simulation gestartet werden. Die Simulationsdaten werden fortlaufend in eine Datei geschrieben und können auch visualisiert werden. Mit dem Simulationseende werden die Daten in einer oder mehreren Dateien gespeichert und stehen anschließend für den Post-Prozess zur Verfügung.

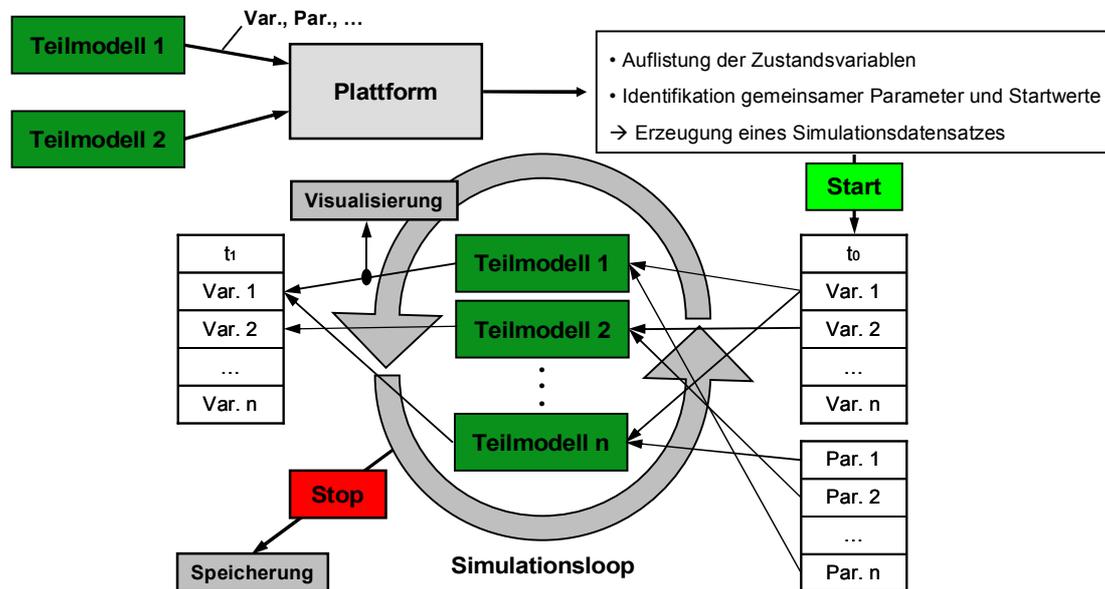


Abbildung 5: Ablauf einer standardisierten Co-Simulation

Der Fahrzeughersteller kann mit Hilfe des vorgestellten Konzepts sein Fahrzeug als virtuellen Prototyp aufbauen. Er nutzt dabei das Know-how der spezialisierten Fachabteilungen und kann die Zulieferer einbinden. Dadurch liegt ein detailliertes Modell des Gesamtfahrzeugs mit validierten Teilmodellen vor.

Der Zulieferer hingegen stärkt durch die Erweiterung seiner Kompetenz, neben Hardware nun auch Simulationsmodelle zu liefern, seine Wettbewerbsposition. Dabei bleibt aber sein Know-how geschützt. Darüber hinaus kann er nun sein Teilmodell bereits in der Simulation im Gesamtfahrzeug testen und auf die Kundenwünsche hin abstimmen.

Die Softwarehersteller entwickeln ihre Produkte weiter und passen sie so den Kundenanforderungen an. Dadurch können sie die geforderten Schnittstellen früher als ihre Marktbegleiter bereitstellen. Sie haben außerdem die Möglichkeit, die Schnittstelle mitzugestalten.

5 Aktueller Stand

Im Projekt wurde zunächst mit Hilfe der bisher zur Verfügung stehenden Möglichkeiten durch den Lehrstuhl ein Simulationsmodell der Traktorvorderachsfederung unter MATLAB/Simulink aufgebaut. **Abbildung 6** zeigt dieses Gesamtsimulationsmodell.

Die vier großen Funktionsblöcke in **Abbildung 6** entsprechen dem mechanischen (1) und hydraulischen (2) Teil der Federung, der hydraulischen Versorgung (3) sowie dem Regler für die Niveauregelung (4). Das Gesamtmodell wurde durch Verknüpfung der Teilmodelle erstellt. Zusätzlich sind noch Visualisierungselemente, Umrechnungsglieder und Schalter für die Benutzerinteraktion zu sehen.

Die Ergebnisse der ersten Simulationsläufe waren plausibel. Die bei der Erstellung des Modells gewonnenen Erkenntnisse werden für die Programmierung der Plattform genutzt, an der parallel zu den Simulationsarbeiten gearbeitet wird. So zeigte sich beispielsweise, dass ein einheitliches Layout der Funktionsblöcke mit einer Visualisierung der Ein- und

Ausgabegrößen wichtig für die Bedienfreundlichkeit ist. Auch eine Beschreibung des Modells, welches dem Funktionsblock hinterlegt ist, trägt hierzu bei.

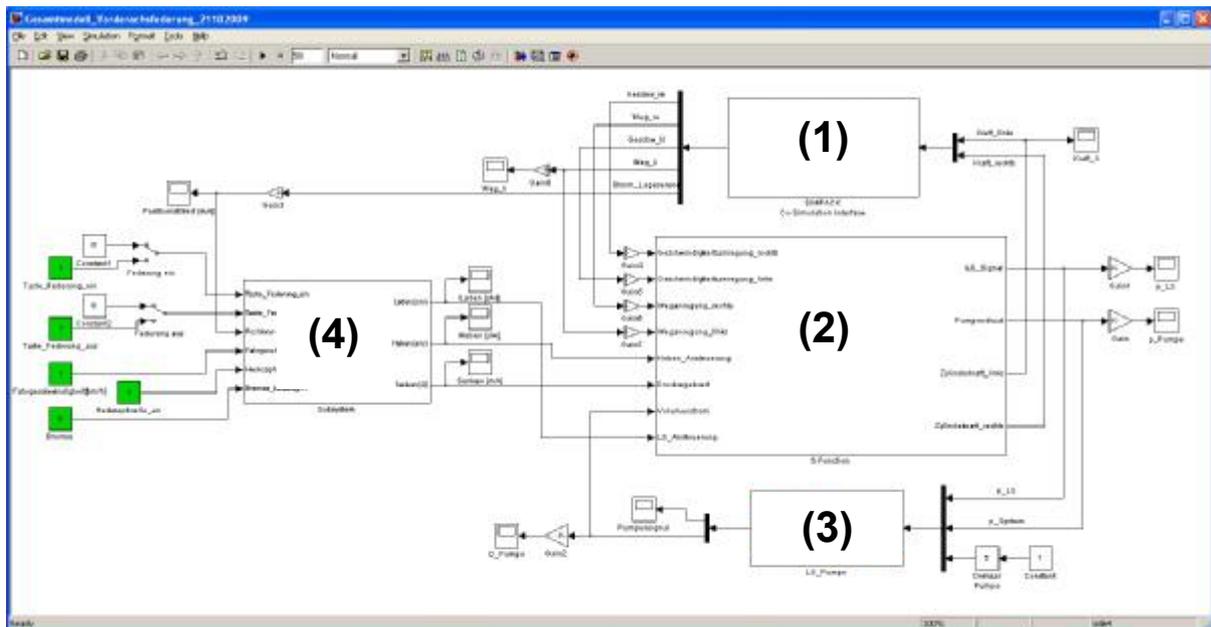


Abbildung 6: Gesamtsimulationsmodell der Traktorvorderachsfederung

6 Zusammenfassung und nächste Schritte

Im bisherigen Projektverlauf wurde ein Konzept für eine standardisierte gekoppelte Simulation anhand einer Plattform erarbeitet. Der Aufbau der einzelnen Teilmodelle ist abgeschlossen, ebenso die Verknüpfung der Teilmodelle miteinander und die Co-Simulation des Gesamtsimulationsmodells. Als nächste Schritte ist ein Abgleich mit Messergebnissen geplant. Die beteiligten Softwarefirmen überarbeiten ihre Schnittstellen, um diese an den neuen Standard anzupassen. Zusätzlich wird weiter an den grafischen Benutzeroberflächen programmiert, die den Pre-Process ermöglichen sollen. Auch die Datenspeicherung im Post-Process bedarf einer Untersuchung und eines Konzepts, was zukünftig noch erarbeitet werden muss. Die Arbeiten werden durch Untersuchungen des Kommunikationsintervalls und daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen vervollständigt.

Literatur:

- [1] Heisler, R.; Heinle, H.; Brenninger, M.; Kraus, S. Hofmann, R.: Der Fendt 936 Vario. ATZoffhighway 08/2009, S. 38-49
- [2] Böhler, H.: Traktormodell zur Simulation der dynamischen Belastungen bei Transportfahrten. Dissertation TU München 2001, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 14, Nr. 104, Düsseldorf: VDI-Verlag 2001
- [3] Völker, L.; Han, S.; Geimer, M: Standardisation of the co-simulation of mobile machines with participation of of different business partners. Vortrag: Tagung Landtechnik 2009, Hannover, 6.-7.11.2009, Tagungsband (VDI-Berichte Nr. 2060), S. 469-474; Düsseldorf: VDI Verlag 2009.
- [4] Leutner, S.; Heinle, H.: System einer hydropneumatischen Vorderachsfederung für Standard- und Systemschlepper. Vortrag: 53. Internationale Tagung Landtechnik, Braunschweig, 12./13.10.1995, Tagungsband (VDI-Berichte 1211), S. 23-25; Düsseldorf: VDI Verlag 1995.