

# **Ein gesamtheitlicher Ansatz zur frontloadingunterstützten Funktionsentwicklung von Traktions- und Fahrodynamikregelsystemen**

Dr. Christian Pretenthaler / Funktionsdefinition - Magna Powertrain

Dr. Mario Vockenhuber / Funktionsverifikation - Magna Powertrain

## 1 Einleitung

Klassische Allradssysteme, die primär als Anfahrhilfe bei schlechten Fahrbahnverhältnissen gesehen werden, verbindet man mit folgenden Vorteilen

- bessere Traktion
- höhere Fahrstabilität und -sicherheit

und Nachteilen

- größerer Kraftstoffverbrauch und erhöhte Schadstoffemission
- höherer Preis

Moderne, bedarfsgerecht geregelte Allradssysteme hingegen, können über Einsatz intelligenter Regelstrategien nicht nur ihre “klassischen“ Vorteile bestätigen, sondern auch das Fahrverhalten hinsichtlich Fahrspaß und Fahrdynamik aktiv beeinflussen und den Nachteil des Kraftstoffmehrverbrauchs deutlich verringern. Möglich wird dies unter anderem durch den Fahrzeugregler - ein Regelungsalgorithmus, der die Verteilung des Antriebsmoments auf die Achsen gemäß Fahrerwunsch und Fahrzustand koordiniert und über bedarfsgerechte Deaktivierung des Allradantriebs auch zu weniger CO<sub>2</sub>-Ausstoß beitragen kann. Zusätzlich ist der Fahrzeugregler in steten Datenaustausch mit den übrigen Fahrzeugsteuergeräten (ECU, ABS, ESP, ...) um den Fahrzustand hinsichtlich Fahrerwunsch, sowie Sicherheits- und Umweltaforderungen zu koordinieren. Dieser Beitrag präsentiert Ansätze von Magna Powertrain (MPT), wie Entwicklung und Applikation neuer Funktionen und Module des Fahrzeugreglers durch Nutzung von Simulation und expertenwissensbasierter Analyse und Synthese optimiert werden kann.

### 1.1 Funktionsentwicklungsprozess

Der Funktionsentwicklungsprozess von Verteilergetrieben beginnt, dargestellt in Abbildung 1, mit der Übernahme des Kundenlastenheftes und endet mit der Systemabnahme im Fahrzeug durch den Kunden. Dazwischen, sowohl am linken als auch am rechten Ast des V-Diagramms, sind Entwicklung und Applikation neuer Funktionen und Module des Fahrzeugreglers angesiedelt. Dies stellt einen mehrstufigen Prozess dar, der mit der Funktionsdefinition beginnt und sich von Softwaretests (SIL) über Integrationstests (HIL) bis zur Applikation im Fahrzeug erstreckt. Bis zur Serienfreigabe wird der Gesamtprozess mehrfach durchlaufen, um die Erkenntnisse aus mehreren Sommer- und Wintererprobungen als auch von Belastungsuntersuchungen am Prüfstand einfließen zu lassen. Am Ende steht die Erfüllung des Lastenhefts und die Validierung durch den Kunden.

# Ein gesamtheitlicher Ansatz zur frontloadingunterstützten Funktionsentwicklung von Traktions- und Fahrdynamikregelsystemen

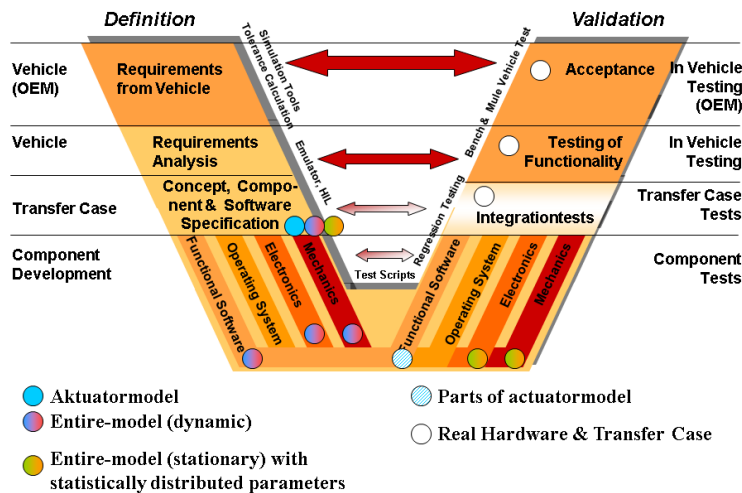


Abbildung 1:  
V-Diagramm Funktionsentwicklungsprozess Verteilergetriebe  
(Quelle: Magna Powertrain)

## 1.1.1 Front Loading

Um der wettbewerbsbedingten Forderung nach einer Effizienzsteigerung dieses Prozesses entsprechen zu können, wurden Untersuchungen angestellt, inwieweit sich dies durch den Einsatz von Front Loading Methoden verwirklichen lässt. Unter Front Loading versteht man u.a. das Ziel, das Verhalten, die Eigenschaften eines Produkts möglichst früh im Entwicklungsprozess durch den Einsatz von Simulationen vorhersagen zu können, ohne auf die ersten realen Prototypen warten zu müssen ("virtuelle erste Generation"). Die dabei verwendeten Simulationsmodelle werden kontinuierlich weiterentwickelt, wodurch bestehendes Wissen zu einem frühen Erkenntnisgewinn beitragen soll.

## 1.1.2 Versuch versus Simulation

Die Beschäftigung mit derartigen Themen führt in vielen Unternehmen quasi zwangsläufig zum Konflikt "teurer" Versuch vs. "auf den ersten Blick billige" Simulation - "der Computer, der uns noch alle ersetzen wird". Dabei leben beide Methoden und die Abteilungen, in denen sie angesiedelt sind von deren Synergie und die Anwendungsgebiete sind recht eindeutig abgesteckt. Simulationsmodelle lassen sich ohne Messdaten nicht erstellen und validieren; Versuche hingegen können mit größerem Reifegrad starten, falls man unzureichende Varianten simulatorisch frühzeitig ausschließen kann. Simulation kann je nach Qualität der Modellierung die Fragen beantworten, die man ihr stellt. Versuche hingegen liefern auch Antworten auf Fragen, die vordergründig nicht gestellt wurden, z.B. unvorhergesehene Störeinflüsse.

Die Sichtweise bei Magna Powertrain (MPT) ist daher auf "(Fahr-)Versuch & Simulation", anstelle "(Fahr-)Versuch versus Simulation" ausgelegt – man bedient sich der Sy-

## Ein gesamtheitlicher Ansatz zur frontloadingunterstützten Funktionsentwicklung von Traktions- und Fahrdynamikregelsystemen

nergien beider Disziplinen, um zu einer gesamtheitlichen Qualitätssteigerung zu kommen. In den folgenden Kapiteln werden die Werkzeuge vorgestellt, die dazu beitragen sollen.

## 2 Gesamtfahrzeugsimulation bei Magna Powertrain

Bei der Simulationemethode, die in diesem Artikel betrachtet werden soll, handelt es sich um die sog. Gesamtfahrzeugsimulation. Dabei wird sowohl das betrachtete Fahrzeug inkl. Subsysteme (Motor, Triebstrang, Reifen, ...), als auch die Umgebung (Fahrbahn, Umwelteinflüsse, ...) modelliert und berücksichtigt. Zunächst soll das verwendete Simulationssystem kurz vorgestellt werden, im Anschluss einige Beispiele, die die möglichen Synergien zwischen “(Fahr-)Versuch & Simulation“ zeigen, präsentiert werden.

### 2.1 Simulationssystem

Als virtuelle Test- und Entwicklungsumgebung kommt bei Magna Powertrain u.a. das Fahrdynamiksimulationssystem veDYNA der Firma TESIS DYNAware [1] zum Einsatz. Dessen offene, modulare Modellarchitektur in Matlab/Simulink gestattet es, beliebige Teile des Fahrzeugmodells auszutauschen, bzw. Aktuator- und Reglermodelle hinzuzufügen. veDYNA beinhaltet ein Mehrkörpersystem (MKS) für Fahrzeugaufbau und Radaufhängungen in unterschiedlichen Modellierungstiefen mit bis zu 60 Freiheitsgraden. Hinzu kommen verschiedene Handling Reifenmodelle (u.a. TMeasy [2], Pacejka [3]). veDYNA bietet ein eindimensionales Triebstrang-Modell mit massebehafteten, flexiblen Antriebswellen, Kupplungsmodellen für Schaltgetriebe, Allradkupplungen oder Differentialsperren sowie Automatikgetriebe mit Drehmomentwandler. Damit ist es möglich alle aktuellen Allrad-Topologien zu modellieren.

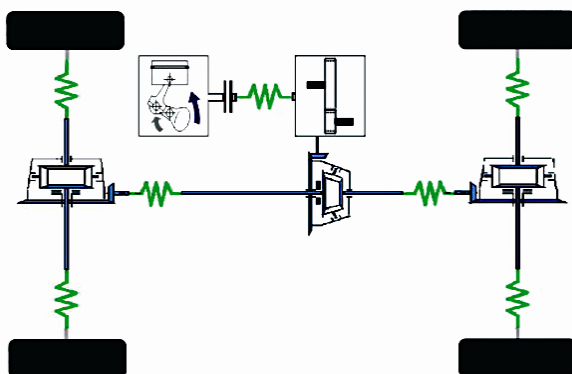


Abbildung 2: veDYNA Standardantriebsstrangmodell mit Schnittstellen (grün) für Kraftelemente (Quelle: TESIS DYNAware)

Über ein flexibles Straßenmodell [4], können sowohl reale Teststrecken, wie Stifser Joch, Sella Ronda oder die Nürburgring Nordschleife, als auch generische Szenarien be-

## **Ein gesamtheitlicher Ansatz zur frontloadingunterstützten Funktionsentwicklung von Traktions- und Fahrdynamikregelsystemen**

liebiger Ausgestaltung (Steigungshügel,  $\mu$ -Split,  $\mu$ -Sprung, ...) modelliert werden. Zur Regelung des Simulationsfahrzeugs kann man aus mehreren veDYNA-internen und -externen (MPT-Eigenentwicklung) Fahrermodellen wählen. Simulationsszenarien können damit sowohl Open-Loop als auch Closed-Loop definiert werden. Über die Verwendung eines Human Machine Interface (HMI – Lenkrad und Pedale) lässt sich veDYNA auch als Fahr Simulator betreiben. Über die offene, modulare Modellarchitektur in Matlab/Simulink können von aktiven Allradsystemen Funktionssoftware (Fahrzeugregler, ...), Streckenmodelle (Kupplung, Aktuatorikkette, ...) und Schutzmodelle (Systembelastung, Temperatur, ...) eingebunden werden. Wenn das Simulationssystem mit realitätsnahen Fahrzeugdaten vom Kunden und dem aktuellsten Stand von Funktionssoftware und Schutzmodellparametern bedatet wurde, kann zwischen Fahrversuch und Simulation ein sehr gutes Matching generiert werden. Unschärfen beim Fahrzeugmodell (Daten nicht verfügbar oder sensibel, ...) führen hingegen zu schwer kalkulierbaren Unschärfen beim Simulationsergebnis.

## **2.2 Ausgewählte Einsatzgebiete der Simulation**

In diesem Artikel sollen beispielhaft fünf Anwendungsfälle der Gesamtfahrzeugsimulation im Zusammenhang mit Entwicklung und Applikation neuer Funktionen und Module des Fahrzeugreglers vorgestellt werden.

- Allgemeine Funktionsüberprüfung
- Standardmanöver
- Lastkollektivstrecken
- Niedrigreibwert, Handlingkurse und Rennstrecken
- Unterstützung Erprobung

### **2.2.1 Allgemeine Funktionsüberprüfung**

Bei der allgemeinen Funktionsüberprüfung kommt die Gesamtfahrzeugsimulation in der Anwendung als Fahr Simulator zum Einsatz. Dabei geht es vordergründig darum, anhand von einfachen mit dem HMI rasch ausführbaren Fahrmanövern zu überprüfen, ob die grundlegenden Funktionen des Fahrzeugregler verfügbar sind. Analog zum ersten Fahrversuch mit einer neuen Steuergerätsoftware wird dabei überprüft, ob die aus der Emulation des Fahrzeug-Bus (die Simulation liefert die gleichen Signale, die auch am Fahrzeug-Bus verfügbar sind) gebildeten internen Fahrzeugreglersignale vorzeichenrichtig sind, ob sie eine plausible Größenordnung haben und ob sich bezogen auf das gefahrene Manöver, die qualitativ "richtigen" Momentenanforderungen einstellen. Dies stellt sicher, dass man sich beim ersten Fahrversuch tatsächlich mit Fahren und Applikation be-

## **Ein gesamtheitlicher Ansatz** zur frontloadingunterstützten Funktionsentwicklung von Traktions- und Fahrdynamikregelsystemen

---

schäftigen kann und nicht wertvolle Zeit mit der Fehlersuche (Debugging) verschwenden muss.

### **2.2.2 Standardmanöver**

Unter Standardmanövern versteht man dem tatsächlichen Manöverkatalog der Fahrzeugprüfung nachempfundene, „gescriptete“ Simulationsabläufe (Eingaben in das Simulationssystem sind Schritt für Schritt exakt vordefiniert – Open Loop), z.B. Anfahrt an einem Steigungshügel. Diese sind im Gegensatz zur allgemeinen Funktionsüberprüfung wiederholgenau ausführbar und erlauben somit einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen, bzw. geänderten Reglerparametersätzen. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist etwa die Abschätzung in der sehr frühen Konzeptphase, ob das vorgesehene Zielfahrzeug mit dem projektierten Allrad-Kupplungssystem definierte Missbrauchsmanöver ohne Abschaltung des Allradsystems infolge Überhitzung ausführen kann. Gelingt dieser Nachweis nicht, können frühzeitig Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

### **2.2.3 Lastkollektivstrecken**

Unter Aufnahme von Lastkollektiven im Allgemeinen versteht man die Fahrzeugmessung von ausgewählten Stadt-, Überland-, Autobahn- und Bergstraßenanteilen, die mit bestimmter Gewichtung in einem gerafften, also besonders belastenden Fahrbetrieb zusammengemischt werden. Dabei entspricht ein Kilometer geraffter Betrieb mehreren Kilometern „normalem“ Endkundenbetrieb. Diese Messungen werden ausgewertet und auf ein „Fahrzeugleben“ (z.B. 200 000 km) extrapoliert, wodurch man die Belastungen erhält, auf die das Verteilergetriebe oder jegliche andere Komponente zunächst ausgelegt und später am Prüfstand abgesichert werden muss. Derartiges Datenmaterial steht in frühen Projektphasen noch nicht zur Verfügung; daher muss man sich mit verfügbaren Messungen, bzw. eigenen Erfahrungswerten aus vorangegangenen, vergleichbaren Entwicklungen behelfen. Ein anderer Ansatz ist die Herangehensweise über Gesamtfahrzeugsimulation - dazu benötigt man von verfügbaren, bereits gemessenen Lastkollektivaufnahmen

- x-, y-, z-Koordinaten der gemessenen Teilstücke (GPS-Traces), und
- die dabei gefahrene Geschwindigkeit und das Fahrpedal

Diese Angaben sind i.a. für alle Fahrzeugkategorien anwendbar; lediglich bei Beschleunigungsvorgängen mit hoher Last muss das Geschwindigkeitssignal für Fahrzeuge mit deutlich mehr Leistung als das Fahrzeug mit welchem die Traces aufgenommen wurden, adaptiert werden. Somit können für verschiedenste Fahrzeugsetups (z.B. geänderte Achsübersetzungen) oder unterschiedliche Varianten der Reglerparametrierung nahezu beliebig viele Simulationen der Lastkollektivstrecken ausgeführt werden. Diese werden

## **Ein gesamtheitlicher Ansatz zur frontloadingunterstützten Funktionsentwicklung von Traktions- und Fahrdynamikregelsystemen**

---

analog den “echten“ Fahrzeugmessungen ausgewertet und liefern denselben wertvollen Input für die Entwicklung. Das “letzte Wort“ in der Absicherung der Entwicklung hat aber natürlich weiterhin die Fahrerprobung – damit werden auch die Simulationsergebnisse regelmäßig validiert. Jedoch kann aus der Simulation die Entscheidung für den Belastungs-WorstCase fallen - jene schlimmste Konfiguration anhand der im Anschluss das Versuchsfahrzeug aufgebaut wird.

### **2.2.4 Niedrigreibwert, Handlingkurse und Rennstrecken**

Auf den ersten Blick erscheint es fraglich, warum die Schlagworte der Überschrift dieses Kapitels in einem Atemzug genannt werden. Bei näherer Beschäftigung mit dem Thema erkennt man den gemeinsamen Nenner der drei Begriffe: Stabilitätsgrenze oder physikalischer Grenzbereich. Die Wintererprobungen zielen darauf ab, das Verhalten des Allradsystems hinsichtlich Traktion, Fahrstabilität und in den letzten Jahren vermehrt hinsichtlich Fahrdynamik und Fahrspaß, zu optimieren. Die Sommererprobung eines High-Performance-Fahrzeuges, welches auf der Rennstrecke Vorteile im Vergleich zu den heckgetriebenen Varianten zeigen soll, zusätzlich aber möglichst den gleichen Fahrspaß liefert, schlägt in die gleiche Kerbe – das Manövrieren am Maximum der Kraft-Schlupf-Kurve der Reifen und darüber hinaus. Bei Magna Powertrain hat die simulatorische Beschäftigung mit diesen Themen neben der Applikation von Querdynameingriffen hauptsächlich die frühzeitige Abschätzung der Belastung des Allradsystems als Motivation. Die Entscheidung etwa, ob das Allradsystem eines High-Performance-Fahrzeugs einen Ölkühler benötigt, um die vom Kunden geforderte Rundenanzahl auf einer Rennstrecke oder einem Handlingkurs ohne Abschaltung des Allrads wegen Übertemperatur des Kupplungssystem zu überstehen, muss frühzeitig fallen – noch bevor man den ersten Prototypen auf die Reise schicken kann. Selbiges gilt natürlich auch für den Eiskreis, bzw. Handling-Kurse auf Niedrigreibwert. Um jedoch aussagekräftige Ergebnisse generieren zu können, benötigt man zur Simulation von Handlingkursen und Rennstrecken, Spur- und Geschwindigkeitsvorgaben, die das simulierte Fahrzeug tatsächlich an den physikalischen Grenzbereich bringen. Diese bekommt man entweder aus Messungen – GPS-Traces, die jedoch nur für dasselbe Fahrzeug gelten, ohne Wissen, wie “scharf“ die betreffende Runde tatsächlich gemessen wurde, oder man ermittelt sie mathematisch. Bei Magna Powertrain beschreitet man hauptsächlich den zweiten Weg und bedient sich eines Softwarewerkzeugs, welches sich aus der Dissertation von Dr. Pretenthaler [5] heraus entwickelt hat – des Vehicle Dynamics Optimizer.

## **Ein gesamtheitlicher Ansatz** zur frontloadingunterstützten Funktionsentwicklung von Traktions- und Fahrdynamikregelsystemen

---

### *2.2.4.1 Vehicle Dynamics Optimizer*

Der Vehicle Dynamics Optimizer ist eine in Matlab/Simulink programmierte Anwendung der regelungstechnischen Theorie Optimaler Steuerungen. Dessen Aufgabe ist die Bestimmung von Spur-Trajektorie, zugehöriger Fahrgeschwindigkeit und Drehmomentenverteilung vorn / hinten (falls als aktiver Allrad appliziert), mit denen ein vorgegebenes Fahrzeug mit spezifischen Eigenschaften auf einer dreidimensionalen Fahrbahn das Optimierungskriterium Zeitoptimalität erfüllt. Dieses wurde folgendermaßen definiert:

- Die in vorgegebener, fixer Zeit zurückgelegte Distanz soll maximiert werden.

Außerdem müssen als Nebenbedingungen gelten:

- Die vorgegebene Fahrbahn darf nicht verlassen werden.
- Die physikalischen Grenzen des zu führenden Fahrzeuges (Reifen, Motor, u.a.m.) dürfen nicht überschritten werden. Die geplanten Kursverläufe müssen also verwirklichtbar sein und dürfen nicht zu instabilen Fahrzuständen führen.

Dazu benötigt der Vehicle Dynamics Optimizer eine “interne“, vereinfachte Modellierung des im Simulationssystem veDYNA abgebildeten Fahrzeuges und der Fahrbahn. Dieses “interne“ Modell wird automatisiert aus dem aktuellen Fahrzeug- und Strecken-setup in veDYNA bedatet und hat die folgenden Spezifikationen:

- Fahrzeugaufbau mit 6 Freiheitsgraden
- Reifenmodell TMsimple [6]
- Einfache Radaufhängungsmodellierung mit Feder, Dämpfer und Stabilisator

Die Bedatung erfolgt im Zuge einer Optimierung der Fahrzeugparameter des “internen“ Modells, wobei darauf geachtet wird, dass dessen Gesamtverhalten dem des komplexen Modells in veDYNA bestmöglich gleicht. Die Optimierung im Vehicle Dynamics Optimizer selbst ist ein automatisch ablaufender Prozess, der am Ende für die Anwendung in veDYNA die Spur- und Geschwindigkeitsvorgaben und die optimale über dem Streckenverlauf variable Momentenverteilung vorne / hinten liefert. Letztere wird jedoch gewöhnlich nur zur Kontrolle der während der Simulation vom Fahrzeugregler angeforderten Kupplungsmomente verwendet. Im Entwicklungsprojekt für das Verteilergetriebe eines High-Performance-Fahrzeuges konnte mit den Werkzeugen veDYNA und Vehicle Dynamics Optimizer die vom Kunden vorgegebene Zielzeit des Fahrzeugs am Nürburgring auf eine Sekunde genau erreicht werden. Damit kann beispielsweise sichergestellt werden, dass die simulatorisch abgeschätzten Belastungen des Kupplungssystems in einer plausiblen Größenordnung sind und für Systementscheidungen herangezogen werden könnten.



### **2.2.5 Unterstützung Erprobung**

Gesamtfahrzeugsimulation bietet zahlreiche Möglichkeiten den Fahrversuch bzw. die Applikation von neuen Funktionen und Regelstrategien - sozusagen vor Ort - also direkt während einer Erprobung (z.B. Wintererprobung in Schweden) zu unterstützen. So können beispielsweise im Fahrversuch entdeckte, nicht offensichtliche Fehler in Funktionen oder Parametrierungen in der Simulation wesentlich effektiver verfolgt und behoben werden. Die korrigierte, ggf. neu bedatete Version der Funktionssoftware wird anschließend im Fahrzeug validiert. Der gesamtheitliche Einfluss neu ermittelter Parametrierungen kann ebenfalls zeitnah bewertet werden. Sommer- oder Wintererprobung ist nur ein Parameter - die in Schweden "real" ermittelten Parameter können rasch auf deren Auswirkung auf Hochreibwert in Idiada oder am Nürburgring "virtuell" bewertet werden. Die Entwicklung und Bedatung gänzlich neuer Funktionen und Regelstrategien kann ebenso am Schreibtisch erfolgen; im Fahrzeug verbleibt somit mehr Zeit für die wesentliche Applikationsarbeit. Zukünftig sollen außerdem Parameter und Kennfelder des Fahrzeugreglers über automatische Parameterkalibrierung ermittelt werden. Dabei soll eine Optimieroutine die betreffenden Werte variieren, mit veDYNA die zugehörigen Simulation durchführen, welche dann mit dem selbstentwickelten Softwaretool TRonDA (nächstes Kapitel) bewertet werden. Auf Basis dieser Bewertungen soll sich dann die Optimieroutine zum Optimum der gewählten Zielfunktion iterieren. Auf diese Weise könnten auch komplexe Fahrdynamikfunktionen, deren Parameter und Kennfelder im Fahrzeug nur mit großem Aufwand "erfahrbar" und applizierbar sind, ganzheitlich optimiert und abgestimmt werden.

## **3 Analyse und Synthese von Fahrzeugabstimmungen**

Im Folgenden wird beschrieben, wie bei Magna Powertrain die Applikation von Traktions- und Fahrdynamikregelsystemen unter Einbeziehung, der in diesem Beitrag bisher beschriebenen Simulationswerkzeuge, zukünftig vonstattengehen soll. Kanalisierung und strukturierte Auswertung von Messdaten aus Simulation und Fahrversuch in einem Softwarewerkzeug, welches zur Zeit peu à peu in die Entwicklungsprozesse ausgerollt wird, soll zu einer deutlichen Effizienzsteigerung im Fahrzeugabstimmungsprozess beitragen.

### **3.1 Allgemeines**

Das Ziel besteht darin, die Qualität einer Abstimmung bzw. eines Systemverhaltens unter Annahme eines gut abgestimmten Fahrzeugmodells mit hinreichendem Vertrauensgrad virtuell bewerten zu können. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit fahrzeugnahes Know How der Allradsystemapplikation und Verifikation in Form von praxisrelevanten

## **Ein gesamtheitlicher Ansatz zur frontloadingunterstützten Funktionsentwicklung von Traktions- und Fahrdynamikregelsystemen**

---

Kriterien aus Signalen zu extrahieren und diese dem Bereich der Simulation zur Verfügung zu stellen. Dadurch wird auch die Basis geschaffen später eine automatische Kalibration von Reglerparametern durchführen zu können. Durch Umsetzung der Hauptaufgabe, das in den Bewertungskriterien enthaltene Expertenwissen in eine anwendbare Form zu bringen [7], soll der Entwicklungsingenieur schnell einen Überblick über das komplexe Systemverhalten im Fahrer-Fahrzeug Regelkreis erhalten, sowie neue Erkenntnisse gewinnen und diese als neue Referenz für zukünftige Projekte wieder in das Softwaretool integrieren können. Im Speziellen wurde versucht den Punkten

- Unkomplizierte Anwendbarkeit und Flexibilität im Entwicklungsalltag
- Traktionssystemübergreifende Kriterien
- Bereichsübergreifend (Fahrdynamik, Traktion, Belastung, ...)
- Lerneffekt für junge Mitarbeiter mit noch geringer Erfahrung
- Eignung für Simulation und Fahrversuch gleichermaßen

Rechnung zu tragen. Als Plattform für dieses Vorhaben wurde Matlab® gewählt, dem daraus entstandenen Softwarewerkzeug wurde der interne Name TRonDA (Traction on Demand Application) gegeben.

### **3.2 Strukturierung und Extraktion von Bewertungskriterien**

Zunächst wurde Expertenwissen aus Gesprächen mit erfahrenen Systemapplikateuren, aus dem Studium von Berichten sowie Veröffentlichungen und schließlich den eigenen Erfahrungen im Zuge von Systemapplikationen gesammelt und strukturiert. Da die Systemabstimmung im Zuge der Fahrerprobung üblicherweise auch manöver- bzw. betriebszustandsbezogen erfolgt (Design Verification Plan DVP) wurde bei den definierten, objektiven Bewertungskriterien zunächst eine Zuordnung zu Betriebszuständen und Allradsystemtyp (aktiv, semiaktiv, passiv) gewählt (siehe Abb. 3 ). Zudem wurde bei den Kriterien eine Unterscheidung gemäß Zugehörigkeit bzw. Bewertung von Fahrer-, Fahrzeug und Allradsystemverhalten getroffen. Für eine möglichst durchdringende Analyse wurden Einzelkriterien für alle interessierenden Teile des Allradsystems vom berechneten Sollmoment über die Leistungselektronik, Aktorik, Kupplung bis hin zum Achsgetriebe definiert und extrahiert. Auf makroskopischer Ebene wurde zudem noch eine Bewertung der übergeordneten Kategorien Fahrdynamik, Traktion, Effizienz, Belastung und Komfort gewählt. Dafür werden ausgewählte objektive Einzelkriterien innerhalb einer Kategorie in einen Erfüllungsgrad des jeweiligen Optimums umgerechnet und mit der zugehörigen Gewichtung ein repräsentativer Index (0...100%) erstellt.

Die Extraktion der Kriterien erfolgt aus einem erweiterbaren Standardsatz von individuell aufbereiteten Meßsignalen (Filterung etc.). Durch entsprechende Triggerbedingungen werden zunächst die definierten Betriebszustände (Anfahren, Schalten, Bremsen, ...) nach ihrem zeitlichen Auftreten detektiert. In den detektierten Zeitbereichen

## Ein gesamtheitlicher Ansatz zur frontloadingunterstützten Funktionsentwicklung von Traktions- und Fahrdynamikregelsystemen

erfolgt dann durch Signalanalyse die Extraktion von objektiven Einzelkriterien (z.B. Radverdrehung vor Schlupfregelungsbeginn, Gradient Momentenabbau bei Lastwechsel etc.). Die Werte werden für jeden Betriebszustand in einer Struktur abgelegt. Wie bereits erwähnt wurde dabei auf eine möglichst gesamtheitliche Erfassung des Systemverhaltens an sich bzw. der Reaktion im Fahrer – Fahrzeug Regelkreis gelegt.

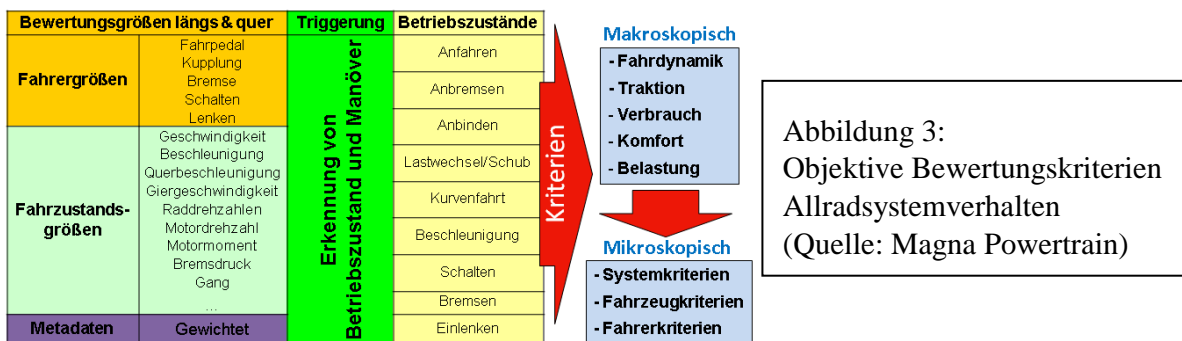


Abbildung 3:  
Objektive Bewertungskriterien  
Allradsystemverhalten  
(Quelle: Magna Powertrain)

Neben einer Auswertung der richtigen (relevanten) Kriterien ist die Wahl einer geeigneten Darstellung der vielfältigen Informationen als Grundlage für die gezielte Bewertung des Systemverhaltens unerlässlich.

Beispiele für aussagekräftige Darstellungen neben der zeitlichen Zuordnung in der Messung sind:

- Lokales Auftreten eines Betriebszustandes (Rundkurs) samt wichtiger Informationen (Fahrpedal, Allradmoment, Querbeschleunigung,...)
- Statistische Auswertung von Einzelkriterien über mehrfach erkannte Betriebszustände mittels Boxplot (Min, Max, 25/50/75% Quantile)
- Allradsystemverhalten über Längs- und Querdynamik (siehe Abb. 4)
- Klassierungen der Aktivierung von Softwaremodulen nach Betriebszuständen (Schlupfreglereingriffe prozentuell während Anfahren, Kurvenfahrt, ...)

Zu den möglichst effektiven Darstellungen als Basis für Eigeninterpretationen werden noch an Bedingungen gekoppelte Bemerkungen ausgewertet (z.B.: zu lange Haltephase vom Allradmoment bei Lastwechsel in engen Kurven => "Vorsicht Verspanngefahr"). Diese erfahrungsbasierte, erweiterbare Zuordnung von Verknüpfungen objektiver Kriterien (bezogen auf Signale und Betriebszustände) zu Aussagen, kann speziell im Bereich der Simulation helfen, wo die subjektive Bewertung des Fahrers fehlt. Eine Erkennung von Bereichen mit Potential zur Verbesserung des Systemverhaltens kann somit schnell

## Ein gesamtheitlicher Ansatz zur frontloadingunterstützten Funktionsentwicklung von Traktions- und Fahrdynamikregelsystemen

durchgeführt werden. Diese Analysefunktion kann generell oder betriebszustandspezifisch auf Mess- oder Simulationsergebnisse angewendet werden.

Für einen projektspezifischen Auszug interessierender Kriterien wurde die Möglichkeit eines individuellen Analysesetups geschaffen, welches generell bzw. zu jedem Standardmanöver eine Zuordnung beliebiger Kriterien erlaubt. Eine Analyse von Softwareständen nach immer gleichen Kriterien dient einer objektiven Dokumentation des Standes einer Abstimmung und hilft als "Fingerabdruck" beim Softwarereleasevergleich.

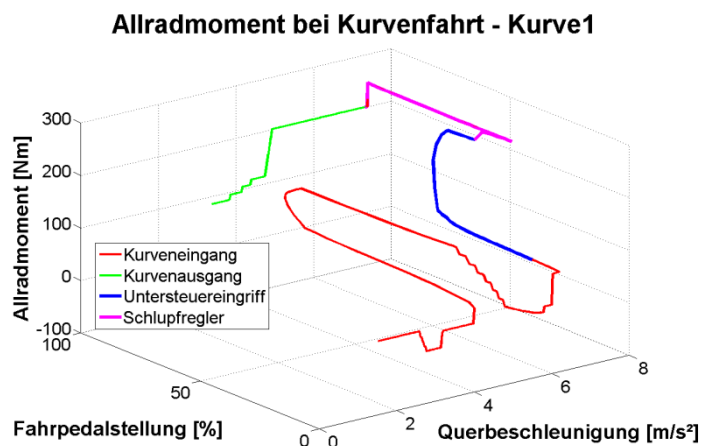


Abbildung 4:  
Kombinierte Darstellung von  
Fahrer, Fahrzeug und System-  
verhalten  
(Quelle: Magna Powertrain)

Um Verkettungen von Fahrer, Fahrzeug und Allradsystemaktionen bzw. Reaktionen zu finden wurden bekannte Wirkungsketten in einer Baumstruktur abgelegt (z.B. Lastwechsel-Übersteuern-Anhebung Allradmoment). Nach diesen Ketten mit vorgegebener Reihenfolge des Auftretens kann im Zuge einer "Ursachenanalyse" gesucht werden und hilft bei der Erkennung von nicht offensichtlichen Vorgängen bzw. bei der Vermeidung von Fehlinterpretationen speziell bei der Analyse von Simulationsergebnissen.

## 4 Systematischer Abstimmungsprozess

### 4.1 Allgemeines

Mit der Vielzahl von zustandsbezogenen, aus Signalen extrahierten Kriterien ist die Basis für ein möglichst klares Bild des Status Quo bzw. die Vorbereitung des nächsten Setupschrittes angelehnt an das Vorgehen erfahrener Applikationsingenieure vorhanden. Die Herausforderung besteht hier in der Verknüpfung von Informationen aus der Signalanalyse und Integration in eine systematische Vorgehensweise mit dem Ziel eines entsprechenden Erkenntnisgewinnes. Bei der Entwicklung dieser Vorgehensweise wurde versucht eine entsprechende Flexibilität zu gewährleisten. D.h. die einzelnen Elemente des nachfolgend vorgestellten Vorgehensweise (Einflußanalyse, Ursachenanalyse, ...) sind auch separat anwendbar, siehe Abbildung 5. Dadurch soll einerseits dem

## Ein gesamtheitlicher Ansatz zur frontloadingunterstützten Funktionsentwicklung von Traktions- und Fahrdynamikregelsystemen

noch weniger erfahrenen Entwicklungsingenieur eine Richtlinie zur Bewertung praxisrelevanter Kriterien in erfahrungsgemäß günstiger Reihenfolge gegeben werden; aber andererseits auch der erfahrenen Anwender möglichst wenig in der Einbringung seiner eigenen Kenntnisse bzw. in seiner Kreativität eingeschränkt werden.

### 4.2 Iterativer Feinabstimmungsprozess

Auf Basis der Auswertungen des letzten Setupschrittes wird zunächst im Zuge einer *Einflussanalyse* die Auswirkung von Parameteränderungen auf die Bewertungskriterien des Analysesetups eruiert. In der nachfolgenden *Abweichungsanalyse* werden die Kriterien hinsichtlich Abweichung zu Referenzbereichen (Zielbereiche) bewertet und deren Streuung (Boxplot) analysiert. Die *Iterationsanalyse* vergleicht mehrere Setupschritte hinsichtlich der Veränderung von Kriterienwerten und Lage zu Referenzbereichen und dient damit dem Überblick und der Beurteilung von Trends. Die bereits erwähnte *Ursachenanalyse* sucht nach vordefinierten Wirkungsketten mit Inhalten aus Fahrzeug- und Systemverhalten, womit komplexere Sachverhalte schneller erfasst werden können. Um zu erkennen, welchen Einfluss Parameteränderungen auf die übergeordneten Bewertungskategorien (Fahrdynamik, Traktion, ...) haben, wurde durch paarweisen Vergleich der Bewertungsindizes (0...100%) genannter Kategorien (siehe oben) die Möglichkeit geschaffen, neben positiven und negativen Einflüssen auch *Zielkonflikte* zu erkennen. Schließlich kann, wenn ein Setup hinsichtlich Fahrbarkeit für gut befunden worden ist, mittels einer *Potentialanalyse* gezielt nach Stellen in Messungen gesucht werden, wo Potential für eine Senkung der Systembelastung bzw. eine Effizienzsteigerung im Antriebsstrang durch eine Modifikation der Momentenverteilung besteht.

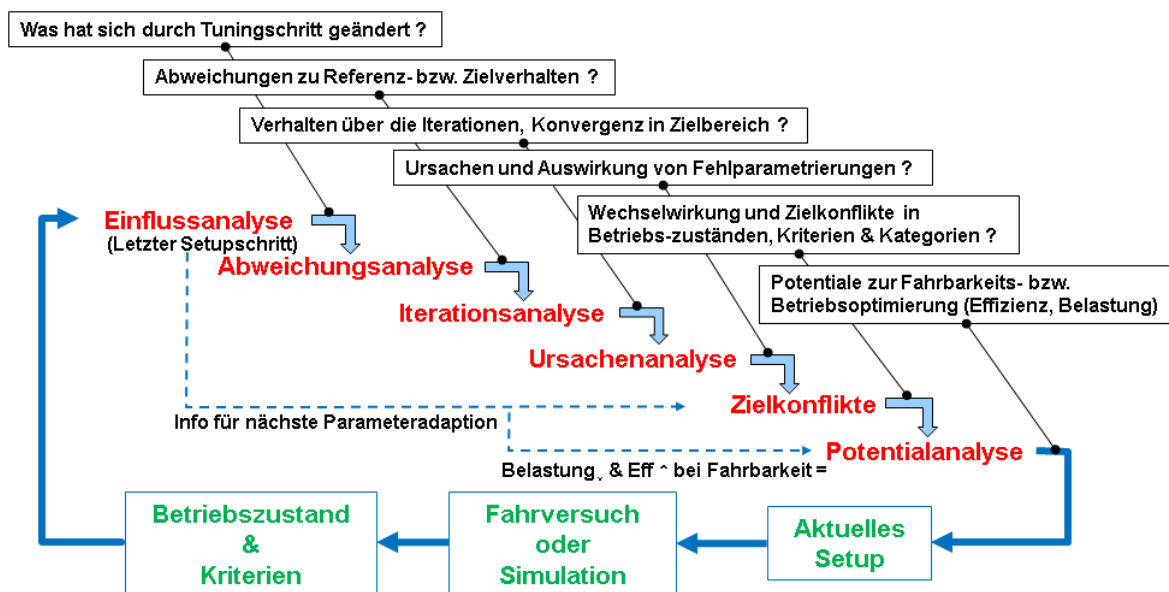


Abbildung 5:  
Iterative Feinabstimmung  
(Quelle: Magna Powertrain)

## 5 Ausblick

Nachdem in den bisherigen Kapiteln dieses Beitrages die bereits im Einsatz stehenden, bzw. sich in der Einführung befindlichen Werkzeuge vorgestellt wurden, soll im Ausblick abschließend ein Blick auf die mittelfristige, zukünftige Entwicklung geworfen werden.

### 5.1 Automatische Parameterkalibration

Betrachtet man die vorhergehend beschriebenen Inhalte so ist eine Zusammenführung der Wiederholgenauigkeit virtueller Systemerprobung und der automatischen Auswertung praxisrelevanter Kriterien eine logische Konsequenz.

Für ausgewählte Standardmanöver gemäß DVP und wichtige Bewertungskriterien (Gütekriterien) werden für zugeordnete Parameter des Allradregelalgorithmus nach und nach separate Optimierungsschleifen durchgeführt. Um diese Optimierungsaufgabe mit entsprechender Qualität durchführen zu können, sind Manöver und Bewertungskriterien bzw. die Zielbereiche der einzelnen Kriterien gemäß Erfahrung aus der Fahrzeugverifikation und Kundenanforderungen mit Sorgfalt zu wählen. Ebenso ist der erlaubte Bereich für Parameteränderungen (Parameterraum) im Zuge der automatischen Kalibrierung gemäß Erfahrung aus realisierten ähnlichen Applikationsprojekten in Absprache mit der Abteilung für die Funktionsdefinition entsprechend zu wählen. Zur Abstimmung des Allradreglers für freies Fahren (Handlingkurs) ist gemäß einer von der Antriebsstrangarchitektur und den Anforderungen abhängigen Abstimmungsstrategie vorzugehen, in der Parameter, Reihenfolge ihrer Abstimmung und zu beobachtende Kriterien definiert sind. Die Durchführung der automatischen Optimierung zielt dabei primär auf eine kundengerechtere Erstparametrierung des Allradregelalgorithmus und damit einer besseren Ausgangssituation für die Fahrerproben ab.

## 6 Literatur

- [1] TESIS DYNAware: veDYNA 3.10 User Manual. München (2014)
- [2] Hirschberg, W.; Rill, G.; Weinfurter, H.: User-Appropriate Tyre-Modelling for Vehicle Dynamics in Standard and Limit Situations, *Vehicle System Dynamics* 38 (2002), Nr. 2, S. 103-125
- [3] Pacejka, H. B.: *Tyre and Vehicle Dynamics*. Butterworth-Heinemann (2002)
- [4] Butz, T.; Ehmann, M.; von Stryk, O.; Wolter, T.-M.: Realistische Straßenmodellierung für die Fahrdynamiksimulation in Echtzeit. In: *ATZ* 106 (2004), Nr. 2, S. 118-125
- [5] Pretenthaler, C.: *Optimale Kursplanung für Rennsportsimulationen*, Dissertation, TU-Graz (2008)

**Ein gesamtheitlicher Ansatz** zur frontloadingunterstützten Funktionsentwicklung von  
Traktions- und Fahrdynamikregelsystemen

---

- [6] Hirschberg, W.: TMsimple: A simple to Use Tyre Model, User Manual (2009)
- [7] Vockenhuber, M.: Mechatronisches Expertentool zur virtuellen und praktischen Funktionsentwicklung geregelter Traktionssysteme, Dissertation, TU-Graz (2013)