

Tagung

Simulation in der Fahrzeugdynamik

11.-12. November 2003

Haus der Technik e.V., Essen

Simulationsumgebung zur Untersuchung aktiver Wankstabilisierung in Verbindung mit einer Fahrdynamikregelung

Andreas Gärtner, Martin Saeger

Institut für Kraftfahrwesen (ika) der RWTH Aachen

Der Vortrag zeigt den Einsatz unterschiedlicher Simulationswerkzeuge zur Entwicklung aktiver Fahrwerksfunktionen am Institut für Kraftfahrwesen in Aachen. Die kombinierte Betrachtung von Wankstabilisierung und Fahrdynamikregelung zur Untersuchung einer optimalen Abstimmung aktiver Fahrwerksysteme aufeinander wird vorgestellt. Bereits in frühen Entwicklungsstadien können hiermit Aussagen über den Einfluss auf die Gesamtfahrzeug-Dynamik getroffen und Reglerspezifikationen definiert werden.

Vortragender

Dipl.-Ing. Martin Saeger

Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika)

Geschäftsbereich Fahrwerk

Steinbachstraße 7, 52074 Aachen

Telefon 02 41 / 80-29 382

Telefax 02 41 / 80-22 147

e-mail: saeger@ika.rwth-aachen.de

Internet www.ika.rwth-aachen.de

Inhalt

1	Abstract	2
2	Aktive Fahrwerksysteme und ihr Einfluss auf das Gierverhalten.....	3
2.1	Fahrdynamikregelung	3
2.2	Aktive Wankstabilisierung.....	4
3	Simulations- und Entwicklungsumgebung	5
3.1	Vollfahrzeug-Simulationsplattform	5
3.2	dSPACE AutoBox: Reglerentwicklung und Fahrversuch.....	7
3.3	Schnittstellen zur Co-Simulation	8
4	Kombinierter Eingriff aktiver Fahrwerksregelsysteme	9
4.1	Eingriff der Radlastverstellung	10
4.2	Eingriff der Fahrdynamikregelung.....	11
4.3	Kombinierter Eingriff von Radlastverstellung und Fahrdynamikregelung	12
5	Zusammenfassung.....	14
6	Literatur	15

1 Abstract

Bei der Entwicklung komplexer Fahrwerksregelsysteme ist es notwendig, die gegenseitige Beeinflussung verschiedener aktiver Systeme sowie deren gemeinsame Auswirkung auf das Verhalten des Gesamtfahrzeugs zu untersuchen. Um die Möglichkeiten solcher Systeme hinsichtlich Sicherheit und Komfort optimal auszuschöpfen, müssen gegenseitige Beeinträchtigungen verhindert und Synergien genutzt werden. Hierbei stellt die Gesamtfahrzeugsimulation ein geeignetes Mittel dar, um bereits in frühen Entwicklungsstadien Aussagen über die Fahrzeugdynamik zu treffen sowie Strategien und Spezifikationen für spätere Regler festzulegen.

Dieser Beitrag zeigt den Einsatz verschiedener Simulationswerkzeuge im Entwicklungsprozess aktiver Fahrwerksfunktionen am Institut für Kraftfahrwesen (ika) der RWTH Aachen. Anhand eines am Institut fortlaufend weiterentwickelten Vollfahrzeugmodells in MATLAB/Simulink werden die Einflüsse unterschiedlicher Fahrwerkssysteme auf die Fahrzeugdynamik untersucht. Die Möglichkeit der Co-Simulation besteht durch Schnittstellen zu Mehrkörper- oder Fluidtechnik-Simulationen; zur Reglerentwicklung wird Rapid Control Prototyping (RCP) in Verbindung mit echtzeitfähiger Hardware eingesetzt.

In diesem Beitrag wird eine aktive Wankstabilisierung in Verbindung mit einer Fahrdynamikregelung (ESP) untersucht, um Koordination und Abstimmung dieser Systeme zu optimieren. Beide Systeme sind geeignet, das dynamische Fahrzeugverhalten, insbesondere den Gierfreiheitsgrad, zu beeinflussen und zu regeln. Während ESP speziell im fahrdynamischen Grenzbereich ein großes Potential aufweist, kann mit der dynamischen Wankmomentenverteilung einer aktiven Wankstabilisierung das Eigenlenkverhalten des Fahrzeugs abhängig vom Fahrzustand kontinuierlich eingestellt werden. Darüber hinaus können mit der aktiven Wankabstützung die Radlasten so verteilt werden, dass die Wirkung der Fahrdynamikregelung optimal unterstützt wird.

Am ika werden diese Funktionszusammenhänge qualitativ und quantitativ untersucht, wobei unterschiedliche Simulationswerkzeuge begleitet von Prüfstands- und Fahrversuch zum Einsatz kommen. Der Einsatz dieser Simulationsumgebung wird in diesem Beitrag beleuchtet.

2 Aktive Fahrwerkssysteme und ihr Einfluss auf das Gierverhalten

Aktive Systeme, welche in der Lage sind das Gierverhalten eines Fahrzeugs zu beeinflussen, sind heute in vielen Fahrzeugen vorhanden. Während Fahrdynamikregelsysteme wie das Elektronische Stabilitätsprogramm ESP mittlerweile bei den meisten Fahrzeugen zur Serienausstattung gehören, sind neuere aktive Systeme wie die Überlagerungslenkung, die aktive Wankstabilisierung (ARS) und aktive Federungen (ABC) erst seit relativ kurzer Zeit und nur in wenigen Modellen am Markt verfügbar.

Aufgrund der unterschiedlichen Natur dieser Systeme sind sowohl der Grad der möglichen Beeinflussung des Fahrverhaltens als auch der Fahrsituationen, in welchen diese Beeinflussung vorgenommen werden kann, unterschiedlich. Dennoch wird mithilfe dieser verschiedenen Systeme eine gemeinsame Größe - die Gierrate - geregelt. Um negative Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Systemen zu verhindern und das Potential der gegenseitigen Unterstützung auszuschöpfen, ist die gemeinsame Betrachtung solcher Systeme in unterschiedlichen Fahrsituationen nötig. In diesem Beitrag soll auf die Kombination von Fahrdynamikregelung und aktiver Wankabstützung eingegangen werden; hierzu wird einleitend kurz die Funktion beider Systeme und deren Einfluss auf das Gierverhalten erläutert.

2.1 Fahrdynamikregelung

Bei modernen Fahrzeugen sind neben Antiblockier- (ABS) und Antriebsschlupfregel-systemen (ASR) auch Fahrdynamikregler (ESP) mittlerweile weit verbreitet. Diese Systeme überwachen den Fahrzustand und unterstützen den Fahrer bei der Beherrschung des Fahrzeugs in Grenzsituationen durch gezielte Bremsenriffe und/oder eine Verringerung des Motormomentes, Abb. 2-1.

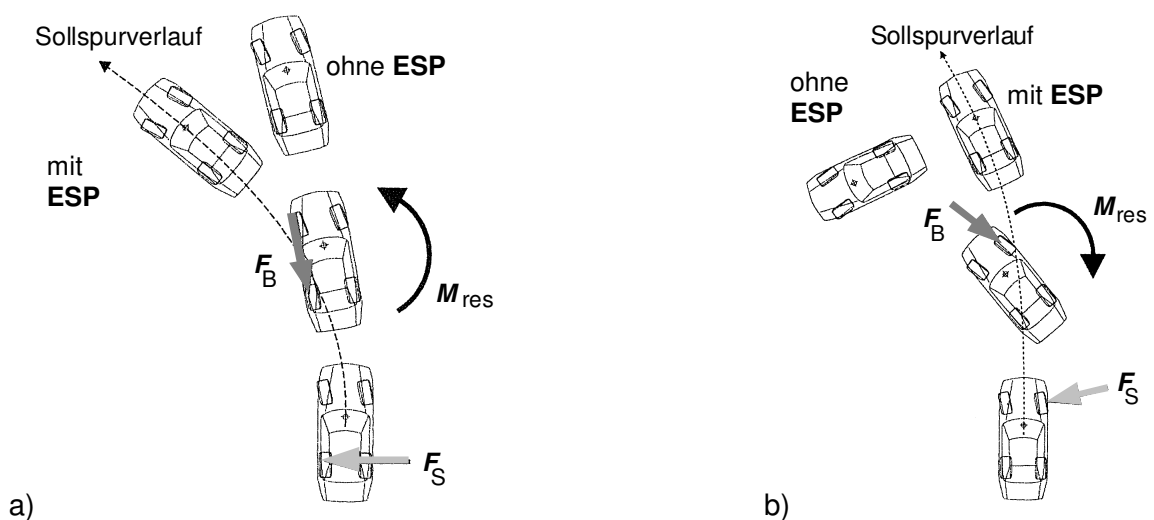


Abb. 2-1: Bremsenriff des Fahrdynamikregelsystems
 a) bei untersteuerndem Fahrzeug b) bei übersteuerndem Fahrzeug

Wird vom Regler ein Unter- oder Übersteuern des Fahrzeugs erkannt, also eine Abweichung zu dem vom Fahrer vorgegebenen Sollkurs, werden einzelne Räder gezielt abgebremst. Dadurch werden Giermomente aufgebaut, welche das Fahrzeug stabilisieren und auf dem vom Fahrer über den Lenkwinkel vorgegebenen Sollkurs halten.

Durch die radselektiven Bremseingriffe werden am gebremsten Rad einerseits Längskräfte aufgebaut, die ein Giermoment am Fahrzeug ergeben, andererseits wird durch den während der Bremsung erhöhten Radschlupf die Seitenführungskraft des Reifens verringert. Der Verlust an Seitenkraft resultiert ebenfalls in einem Moment um die Fahrzeug-Hochachse. Neben dem Aufbau stabilisierender Giermomente stellt die vom Bremseingriff verursachte Längsverzögerung einen wesentlichen Aspekt des Gewinns an Fahrsicherheit dar.

2.2 Aktive Wankstabilisierung

Das Hauptziel von Systemen zur aktiven Wankstabilisierung ist generell, den Aufbau während der Kurvenfahrt aktiv abzustützen und ein Wanken des Fahrzeugs unter Querbeschleunigung weitgehend zu unterbinden. Aktive Wankstabilisierungssysteme können den Zielkonflikt zwischen geringem Wankwinkel bei Kurvenfahrt und hohem Fahrkomfort aufheben, indem abhängig von der Fahrsituation aktiv ein aufrichtendes Wankmoment gestellt wird. Diese Funktion kann in unterschiedlichen Fahrwerksystemen umgesetzt werden: entweder als aktiver Stabilisator in einem System, welches den Wankfreiheitsgrad beeinflusst (z.B. Dynamic Drive von BMW), oder als virtueller Stabilisator in einem aktiven Fahrwerk, welches Hub, Nicken und Wanken beeinflussen kann (z.B. ABC - Active Body Control von DaimlerChrysler).

Neben den primär komfortsteigernden Eigenschaften eines solchen Systems ergibt sich mindestens ein weiterer Freiheitsgrad in der Fahrwerksauslegung beim Einsatz einer aktiven Wankstabilisierung. Bedingt durch die Reifencharakteristik - degressive Zunahme der übertragbaren Seitenkraft über der Radlast – bewirken steigende Radlastunterschiede einen Verlust von Seitenkraftpotential an der betreffenden Achse. Daraus folgt, dass eine Abstützung des Wankmoments an der Vorderachse das Eigenlenkverhalten des Fahrzeugs in Richtung Untersteuern verändert, an der Hinterachse entsprechend in Richtung neutral bzw. Übersteuern. Während ein deutlich untersteuerndes Eigenlenkverhalten in kritischen Situationen größere Sicherheitsreserven besitzt, ist ein neutrales Fahrverhalten für Agilität und Fahrvergnügen wünschenswert. Die Differenz der Radlasten zwischen rechter und linker Fahrzeugseite, und damit das Gesamt-Wankmoment, ist direkt von der wirkenden Querbeschleunigung abhängig. Beim Einsatz eines aktiven Systems zur Wankstabilisierung ergibt sich also die Möglichkeit, abhängig von der Fahrsituation das Wankmoment dynamisch auf Vorder- und Hinterachse zu verteilen und so fahrsituationsabhängig das Eigenlenkverhalten zu beeinflussen.

In sicherheitskritischen Situationen oder übersteuernden Fahrzuständen kann so durch eine große Radlastdifferenz an der Vorderachse ein ausdrehendes Giermoment erzeugt werden, welches zu einer besseren Beherrschbarkeit und Stabilisierung des Fahrzeugs beiträgt. Wird

Untersteuern erkannt, oder wird das Fahrzeug in unkritischen Fahrzuständen bewegt, kann hingegen eine vergleichsweise größere Radlastdifferenz an der Hinterachse realisiert und der Untersteuertendenz entgegengewirkt werden, bzw. ein neutraleres, agileres Eigenlenkverhalten eingestellt werden.

Im Gegensatz zur ESP-Regelung, welche erst beim Überschreiten gewisser Schwellen durch einen vom Fahrer hör- und spürbaren Bremsenriff das Fahrzeug stabilisiert, kann mit einer dynamischen Wankmomentenverteilung kontinuierlich und ohne Komforteinbußen das Fahrverhalten an die Fahrsituation angepasst werden. Das maximal zu stellende Giermoment ist andererseits deutlich geringer als bei einem ESP-Eingriff, und zudem stark von der anliegenden Querschleunigung und der maximalen Aktuatorleistung abhängig.

Als weitere Möglichkeit zur Beeinflussung des Gierfreiheitsgrades kann eine Kooperation zwischen ESP und Wankmomentenverteilung eingesetzt werden. So ist beispielsweise denkbar, durch einen Eingriff der aktiven Stabilisatoren wankwinkelneutral die Radlast an zwei diagonal gegenüberliegenden Rädern zu erhöhen und an den beiden anderen Rädern zu verringern. Diese Verspannung des Fahrwerks kann genutzt werden, um die Radlast an Rädern zu erhöhen, die gleichzeitig einen Bremsenriff des ESP-Systems erfahren. Dadurch kann die Effektivität der ESP-Eingriffe erhöht werden und die Eingriffszeiten sowie der notwendige Radschlupf abgesenkt werden.

3 Simulations- und Entwicklungsumgebung

Am Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika) werden verschiedene Problemstellungen an teilweise sehr unterschiedlichen Fahrzeugtypen bearbeitet. Zu diesem Zweck wurde eine Simulations- und Entwicklungsumgebung aufgebaut, die für ein weites Spektrum an Aufgaben im Bereich Fahrwerk, Fahrdynamik und Reglerentwicklung flexibel einsetzbar ist.

3.1 Vollfahrzeug-Simulationsplattform

Die Basis dieser Simulations- und Entwicklungsumgebung bildet ein Vollfahrzeugmodell in MATLAB/Simulink. Dieses besteht im Kern aus den linearen Bewegungsdifferentialgleichungen eines Mehrmassenschwingers mit 5 Einzelmassen und 10 Freiheitsgraden: Translation des Fahrzeugaufbaus bzw. des Gesamtfahrzeugs entlang der drei Raumrichtungen, Rotation des Fahrzeugaufbaus bzw. des Gesamtfahrzeugs um alle drei Raumachsen sowie die Vertikalbewegungen von 4 Rädern, Abb. 3-1.

Das Vollfahrzeugmodell ist in eine Modellumgebung eingebunden, welche die Vorgabe von Fahrmanövern und einen einfachen Fahrerregler einschließt und die Visualisierung von Ergebnissen sowie die Integration von Reglern ermöglicht. Eine Übersicht über die Modellstruktur gibt Abb. 3-2.

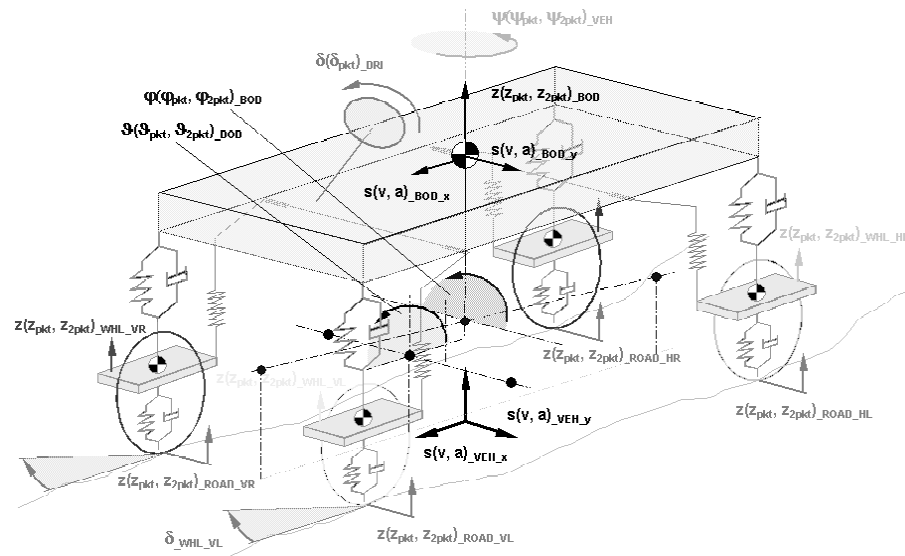


Abb. 3-1: Vollfahrzeug-Ersatzmodell

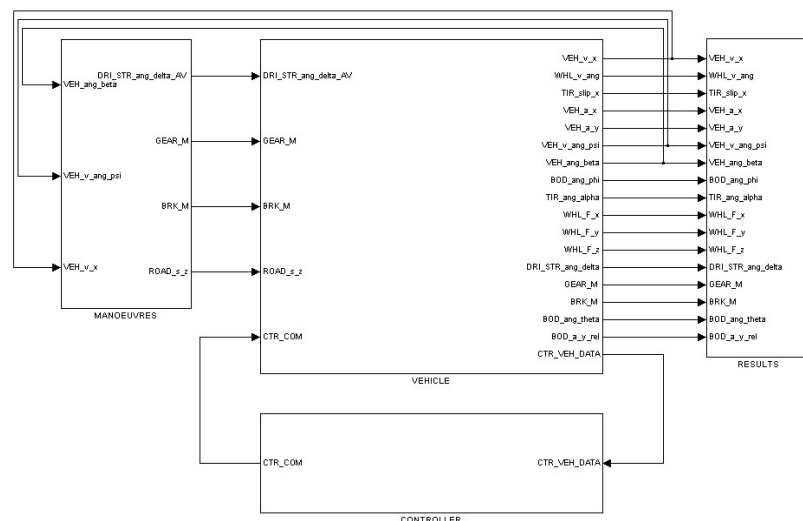


Abb. 3-2: Vollfahrzeug-Simulationsmodell in MATLAB/Simulink

Das MATLAB/Simulink Gesamtfahrzeugmodell ist modular aufgebaut, so dass es eine flexible und erweiterbare Simulationsplattform insbesondere zur Funktionsentwicklung aktiver Fahrwerksysteme mit folgenden grundsätzlichen Möglichkeiten darstellt:

- Einfach umzusetzende Parametervariation durch globale Parametrierung über externen Parametersatz in der *MATLAB* Modellumgebung
- Individuelle Validierung einzelner Funktionsblöcke; spätere Zusammenführung zum System

- Einfache experimentelle Integration von im Fahrversuch gemessenen Größen (z. B. Straßensignal oder Lenkwinkelverlauf) in die Simulation mit Hilfe einer Bedienoberfläche
- Berücksichtigung der Dynamik bzw. Nichtlinearität von Teilsystemen durch entsprechende Modellbildung (Reifenmodell, Kennfelder) als Erweiterung zum linear aufgebauten Schwingungs-Ersatzsystem des Fahrzeugs

Für die übersichtliche Voreinstellung der durchzuführenden Simulationsrechnung existiert ein Benutzermenü, über das zum einen bestehende, messtechnisch ermittelte Signalverläufe als Eingangsgröße eingelesen, zum anderen aber auch vorprogrammierte Open-Loop und Closed-Loop Manöver ausgewählt und parametrisiert werden können. Typische Systemeingangsgrößen für die Simulation sind:

- Lenkwinkelverlauf (geregelt oder vorgegebener Verlauf)
- Radindividuelle Straßenanregung
- Fahrgeschwindigkeit (geregelt oder Vorgabe Antriebs-/Bremsmomentenverlauf)
- Bremsdruckverlauf (radselektiv)

Die Eingabemaske für die Simulationseinstellung ist in Abb. 3-3 dargestellt. Der sogenannte Fahrmanövergenerator lädt in Abhängigkeit von den Einstellungen an der Benutzeroberfläche alle für die Simulation nötigen Daten in den MATLAB-Workspace. Weiterhin kann durch den Entwickler eine Voreinstellung der benötigten Simulationsparameter wie Schrittweite und Simulationsdauer vorgenommen werden.

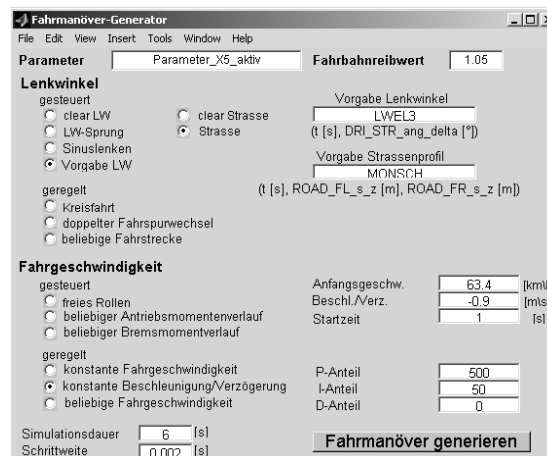


Abb. 3-3: Bedienoberfläche des Fahrmanövergenerators

3.2 dSPACE AutoBox: Reglerentwicklung und Fahrversuch

Für die Reglerentwicklung wird die Simulationsplattform in Verbindung mit Werkzeugen für das Rapid Control Prototyping (RCP) eingesetzt. Aufbau und grundlegender Entwurf von Reglern können in Zusammenhang mit dem MATLAB/Simulink Vollfahrzeugmodell erfolgen.

Hier besteht bereits in sehr frühen Entwicklungsstadien die Möglichkeit, Regelansätze zu erproben und Aussagen über die fahrdynamischen Auswirkungen von Regelungen zu treffen. Für den fahrzeugnahen Reglerentwurf und Reglerentwürfe in Zusammenhang mit physikalisch bestehenden Regelstrecken kommt eine RCP-Entwicklungsumgebung zum Einsatz. Als Real-Time Plattform wird die dSPACE AutoBox verwendet, über den Real-Time Workshop von MATLAB und die dSPACE Software werden die entwickelten Simulink-Modelle in die Echtzeitumgebung portiert. Die Verwendung der am Institut entwickelten Signalkonditionierungseinheit i-Box erlaubt die Pegelanpassung und Filterung elektrischer Eingangssignale sowie die Ausgabe digitaler und pulsweitenmodulierter Signale zur Ansteuerung einer Aktuatorik. Es können seriennahe Sensoren und Signale aus dem Fahrzeug-CAN verwendet werden, um den Regler von Anfang an auf den Einsatz mit der im Fahrzeug verfügbaren Datenbasis auszulegen. Die Aufgabe der Datenerfassung und -speicherung im Versuchsfahrzeug kann ebenfalls von dem dSPACE System übernommen werden.

3.3 Schnittstellen zur Co-Simulation

Für einen detaillierten Einblick in die Funktionalität von einzelnen Fahrwerkssystemen oder -Komponenten ist in vielen Fällen die Modellbildung in Simulink zu aufwendig. Zur Untersuchung entsprechend komplexer physikalischer Zusammenhänge wird daher in einem ersten Schritt ein spezialisiertes Simulationswerkzeug herangezogen. Für die Analyse und Auslegung fluidtechnischer Subsysteme, im Bereich des Fahrwerks beispielsweise aktive Stellzylinder mit entsprechender Ventiltechnik, hydraulische Dämpfer, Luftfedersysteme oder Brems- und Lenkhydraulik, werden in der Konsequenz spezialisierte Simulationswerkzeuge wie DSHplus eingesetzt, im Fall elektromechanischer Komponenten auch das Tool SABER.

Für die Simulation der resultierenden Gesamtfahrzeugdynamik in Zusammenhang mit den detailliert abgebildeten Systemkomponenten kann die Möglichkeit der Co-Simulation über bereits geschaffene Modellschnittstellen genutzt werden, um später bei ausreichendem Systemverständnis und Validierung des Modellverhaltens eine Modellvereinfachung vorzunehmen. Auf dieser Grundlage wird das dynamische System anschließend in die bestehende Modellumgebung integriert, die alle notwendigen Schnittstellen zur RCP Reglerentwicklung aufweist. Gegenüber der analytischen Modellierung des hydraulischen Systems in MATLAB/Simulink kann durch diesen Ansatz ein deutlicher Vorteil in Hinblick auf die Berechnungszeiten dargestellt werden.

Ein weiterer Entwicklungsansatz am ika wird durch die Co-Simulation von fluidtechnischen Systemen in DSHplus zusammen mit einem Mehrkörpersystem der Achse oder des Gesamtfahrzeugs realisiert. Entsprechende Interfaces bestehen für die Programmpakete ADAMS und SIMPACK. Somit kann die Funktionalität eines komplexen Subsystems bis hin zu physikalischen Zwischengrößen an einer Komponente in einer realistischen fahrzeugähnlichen Simulationsumgebung untersucht werden.

4 Kombiniertes Eingriff aktiver Fahrwerksregelsysteme

Die beschriebene Simulations- und Entwicklungsumgebung wird herangezogen, um in einem Anwendungsbeispiel eine Strategie zum optimierten kombinierten Einsatz von Fahrdynamikregelung und dynamischer Wankmomentenverteilung aufzuzeigen. Hierzu wird zunächst anhand der Simulation das Potential beider Systeme zum Aufbau von Giermomenten quantifiziert.

Ein Eingriff von Radlastverstellung oder Fahrdynamikregelung beeinflusst die horizontal wirksamen Reifenkräfte und veranlasst eine Änderung des Fahrzustandes. Bei einem Eingriff der Radlastverstellung stellen sich aufgrund der veränderten Radlastdifferenzen bei konstanter Querschleunigung andere Schräglaufwinkel ein, Abb. 4-1. Nach der Anpassung der Schräglaufwinkel an die veränderten Radlasten stellt sich ein neues Momentengleichgewicht um die Hochachse ein. Ein radindividueller Bremseneingriff erzeugt kurzzeitig ein Giermoment durch den Aufbau von Längs- und den Abbau von Seitenkräften. Nach Ende des Eingriffs stellt sich ein neuer Fahrzustand ein. In beiden Fällen kann das durch den Regeleingriff aufgebrauchte Giermoment nicht direkt gemessen werden.

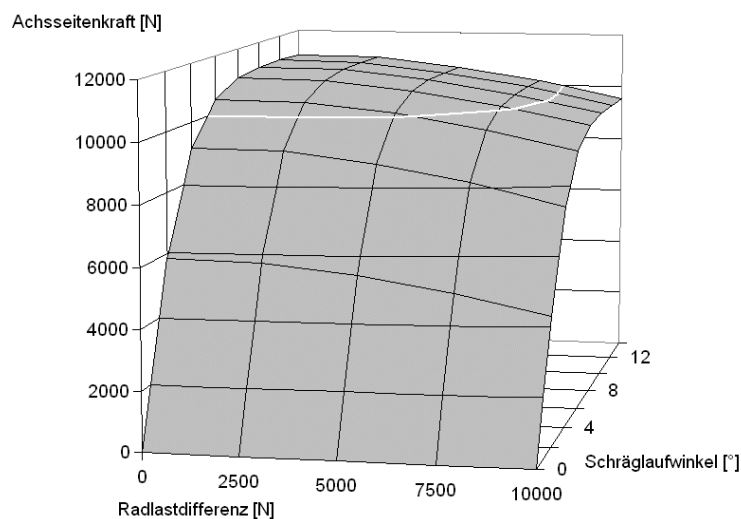


Abb. 4-1: Änderung des Schräglaufwinkels in Abhängigkeit der Radlastdifferenz

Zur Bestimmung dieses Moments werden in der Vollfahrzeugsimulation stationäre Kreisfahrten mit Radlastverstellung und mit Bremseneingriffen durchgeführt, während das Fahrzeug rollt. Während des jeweiligen Stellvorgangs werden dem Modell externe Kräfte und Momente aufgeprägt, die das Fahrzeug in eben der Bahnkurve halten, die vor dem Regeleingriff befahren wurde. Es werden Schwimmwinkel, Gierrate, Fahrgeschwindigkeit und Querschleunigung von außen auf konstanten Werten gehalten, um nicht durch zusätzlichen Antriebsschlupf oder Schräglaufwinkel das Messergebnis zu beeinträchtigen. Das für diese Stabilisierung notwendige Moment um die Fahrzeug-Hochachse entspricht also genau dem Potential an Giermoment, welches durch den simulierten Regeleingriff in der jeweiligen Situation aufgebracht werden kann.

4.1 Eingriff der Radlastverstellung

Um tragfähige Aussagen zu erhalten, wird die Wankmomentenverteilung im Modell anhand von realen Fahrversuchen mit einem passiven Referenzfahrzeug validiert. Durch die Variation der Stabilisatorconfiguration – Serienconfiguration, nur vorderer Stabilisator, nur hinterer Stabilisator – wird der Einfluss der Wankmomentenverteilung auf das Eigenlenkverhalten gemessen; damit lässt sich die korrekte Wiedergabe der zu untersuchenden Effekte durch das Simulationsmodell sicherstellen.

Bei dem untersuchten aktiven Fahrwerk handelt es sich um ein radindividuell arbeitendes System. Die aktive Federung realisiert zusätzliche radbezogene Stützlasten bis zu einer Höhe von ± 4500 N an der Vorderachse und ± 3200 N an der Hinterachse. Als Grundeinstellung wird eine Wankmomentenverteilung vorn/hinten von 50/50 gewählt, fahrsituationsabhängig kann in einem Bereich von 100/0 bis 30/70 dynamisch das Wankmoment verteilt werden.

Diese Configuration wird mit dem oben beschriebenen Simulationsverfahren untersucht. In Abb. 4-2 ist dargestellt, welche ein- bzw. ausdrehenden Giermomente durch die Wankmomentenverteilung 100/0 bzw. 30/70 gegenüber der Grundeinstellung realisiert werden können. Gestrichelt dargestellt ist das theoretisch maximal zu erzielende Giermoment, das durch gegensinnig aufgebraachte Wankmomente an Vorder- und Hinterachse (Verspannung) erreicht werden kann, falls auf eine Wankhorizontierung verzichtet würde.

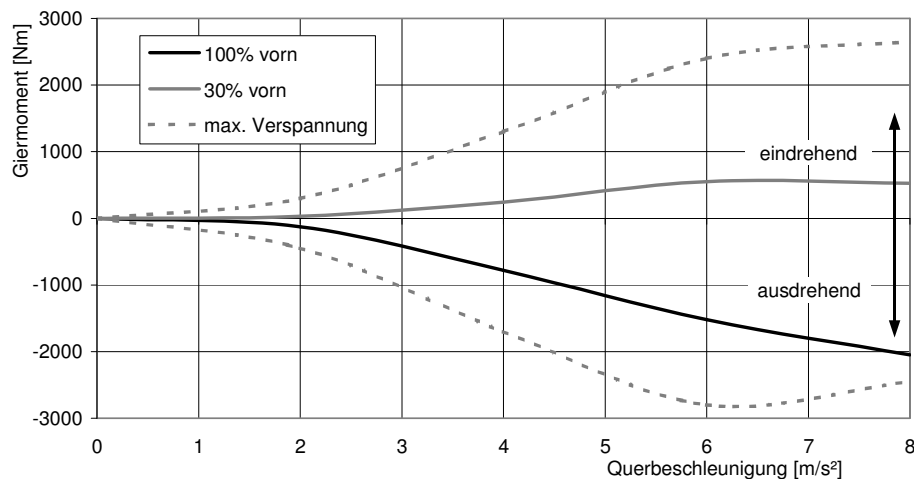


Abb. 4-2: Aus der Wankmomentenverteilung erzielbare Giermomente

Es zeigt sich, dass der mögliche Eingriff in das Gierverhalten signifikant von der Querbeschleunigung abhängig ist. Mit der gewählten Configuration lässt sich zur Stabilisierung eines übersteuernden Fahrzeugs ein eindrehendes Giermoment von bis zu 2050 Nm einsteuern.

4.2 Eingriff der Fahrdynamikregelung

Die aus einem radindividuellen Bremseneingriff der Fahrdynamikregelung resultierenden Giermomente entstehen einerseits durch die bei der Bremsung erzeugte Längskraft, andererseits durch den Abbau an Seitenkraft am betreffenden Rad, der sich aus dem erhöhten Längsschlupf ergibt. In Abb. 4-3 ist dargestellt, wie durch radselektive Bremseneingriffe ein- bzw. ausdrehende Giermomente erzeugt werden können.

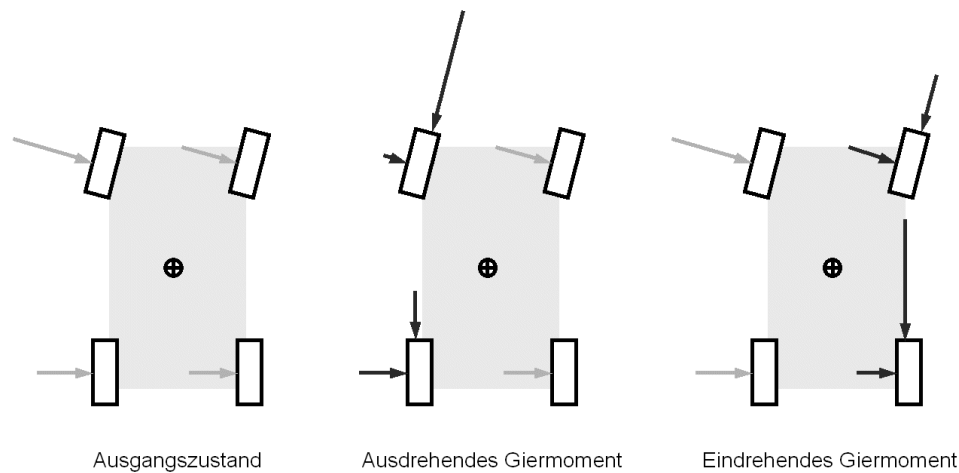


Abb. 4-3: Erzeugung von Giermomenten durch radselektiven Bremseneingriff

Den größten Einfluss zur Erzeugung eines ausdrehenden Giermoments hat ein Bremseneingriff am kurvenäußeren Vorderrad, zusätzlich kann eine Bremsung hinten außen durch die entstehende Längskraft ein ausdrehendes Moment erzeugen. Die Effektivität der Bremsung hinten außen wird aber durch den schlupfbedingten Verlust an Seitenkraft verringert. Das größte Potential zur Erzeugung eines eindrehenden Giermoments besteht bei einem Eingriff hinten innen. Hier kann ebenfalls durch eine Bremsung vorn innen ein zusätzliches Moment generiert werden, dem aber wiederum der Verlust an Seitenkraft entgegenwirkt.

Zur Abbildung der Bremseneingriffe in der Simulation und Untersuchung der erzeugten Giermomente werden im Fahrversuch Manöver mit ESP-Eingriff durchgeführt und die realen Bremsdruckverläufe gemessen. Anhand von Prüfstandsversuchen wird das Übertragungsverhalten von Bremsdruck zu Bremsmoment am Rad ermittelt. Die gemessenen Bremsdrücke aus dem Fahrversuch können in der Simulation der entsprechenden Manöver eingesteuert werden. Unter Berücksichtigung des Übertragungsverhaltens werden vom Reifenmodell die daraus resultierenden Kräfte im Reifenlatsch berechnet.

Um den direkten Vergleich zur Bestimmung der Giermomente aus der Radlastverstellung zu ermöglichen, wird das Fahrzeugmodell wiederum durch externe Kräfte und Momente in der ursprünglichen Bahn gehalten, während der Bremseneingriff vorgenommen wird. Zur Erzeugung eines ausdrehenden Moments wird das äußere Vorderrad soweit abgebremst, dass

sich ein Schlupf von 40% einstellt. Um eindrehende Giermomente zu bewirken, wird das kurveninnere Hinterrad auf diesen Schlupfwert eingebremst.

Die von der Fahrdynamikregelung so aufgebauten Giermomente sind generell deutlich höher als bei der Radlastverstellung. Da bei Kurvenfahrt die Radlast an den äußeren Rädern deutlich höher ist, sind Bremsengriffe hier effektiver; es können wesentlich höhere ausdrehende als eindrehende Giermomente erzeugt werden. Das Potential an eindrehenden Giermomenten zeigt sich relativ unabhängig von der Querschleunigung, es werden Maximalwerte um 6000 Nm im Bereich von 2 bis 6 m/s^2 erreicht. Die maximalen ausdrehenden Giermomente hingegen sind nahezu linear von der Querschleunigung abhängig; ermittelt wurden Werte bis zu 17000 Nm, Abb. 4-4.

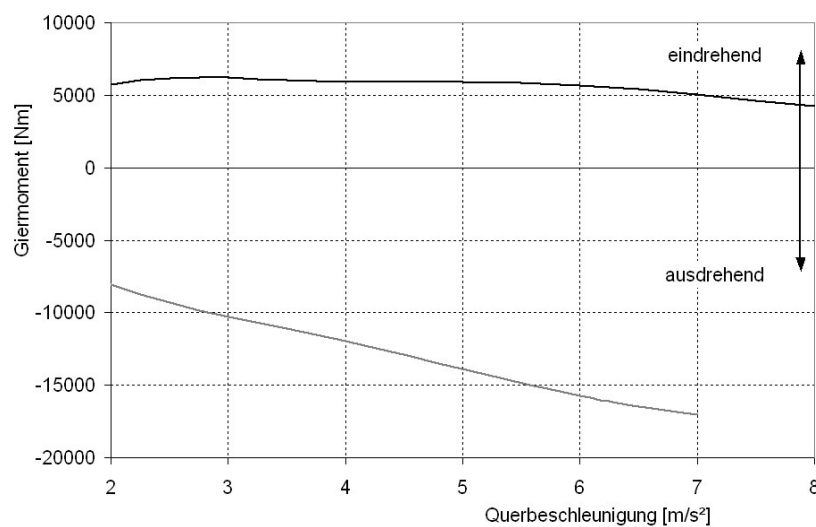


Abb. 4-4: Giermomente aus radindividuellen ESP-Bremsengriffen

4.3 Kombierter Eingriff von Radlastverstellung und Fahrdynamikregelung

Ein kombinierter Eingriff von Radlastverstellung und Fahrdynamikregelung muss gegenseitige negative Beeinflussungen beider Systeme vermeiden und möglichst effizient die Regelaufgabe unter Nutzung beider Aktuatorik-Systeme erfüllen. Die oben beschriebenen Eigenschaften beider Systeme legen den Schluß nahe, in unkritischen Fahrsituationen die Fahrdynamik durch den kontinuierlichen Eingriff der Radlastverstellung zu optimieren, im Grenzbereich aber hauptsächlich das deutlich höhere Giermomentpotential der Fahrdynamikregelung auszuschöpfen.

Die Erzeugung von ausdrehenden Giermomenten über die Wankmomentenverteilung erfordert die Erhöhung der Radlast kurvenäußeren Vorderrad und entsprechend die Senkung der Radlast vorn kurveninnen. Damit wird bei einem zusätzlichen Bremsengriff am kurvenäußeren Vorderrad einerseits eine deutlich höhere Längskraft erzeugt, andererseits - da ein größerer Anteil der Seitenkräfte über dieses Rad abgestützt wird - kann durch den

Bremsschlupf auch ein größerer Betrag an Seitenkraft abgebaut werden. Die gleichzeitige Verringerung des Radlastunterschieds an der Hinterachse erhöht die Seitenführungskraft hinten zusätzlich. Bremsenriff und dynamische Wankmomentenverteilung arbeiten also ohne negative Wechselwirkung.

Zur Erzeugung von ausdrehenden Momenten wird durch die Wankmomentenverteilung die Radlast hinten außen erhöht und hinten innen verringert. Damit wird die Wirksamkeit eines Bremsenriffs am kurveninneren Hinterrad deutlich herabgesetzt. Um in untersteuernden Situationen die wesentlich wirksamere Funktion der ESP-Regelung zu erhalten, muss also während des Bremsenriffs eine Wankmomentenverteilung ähnlich der des passiven Fahrzeugs eingestellt werden. Hier ist ein Datenaustausch zwischen Fahrdynamikregler und Wankkompensation erforderlich, bei einem Bremsenriff muss die Regelstrategie der Radlastverstellung auf die Unterstützung der Fahrdynamikregelung umgeschaltet werden.

Im fahrdynamisch deutlich kritischeren Fall des Übersteuerns behindern sich beide Funktionen nicht. Dennoch ist auch hier die Möglichkeit gegeben, durch optimierten Einsatz der Radlastverstellung die Funktion der wirksameren Fahrdynamikregelung zu unterstützen. Eine solche Unterstützung kann erreicht werden, indem das kurvenäußere Vorderrad über die Wankmomentenverteilung hinaus während des Bremsenriffs eine weitere Radlasterhöhung erfährt, Abb. 4-5. Bei dem untersuchten Fahrwerk wird dies durch eine zusätzliche Aktuatorkraft am gebremsten Vorderrad erreicht, prinzipiell ist ein ähnliches Vorgehen auch mit einem aktiven Stabilisatorsystem möglich, indem eine zusätzliche Radlastdifferenz an der Vorderachse gestellt wird.

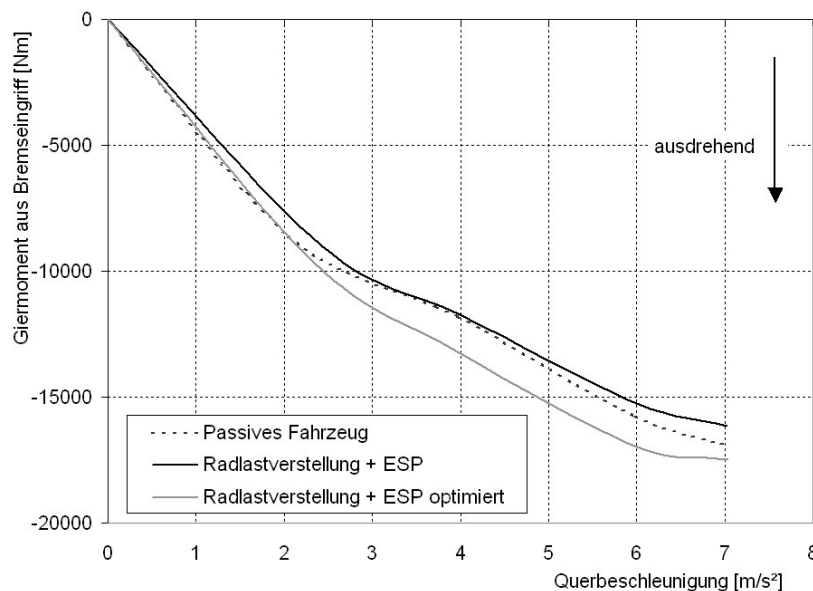


Abb. 4-5: Erzeugbare ESP-Giermomente im Vergleich von aktivem zu passivem Fahrzeug

Wenn beide Eingriffe parallel erfolgen, ist das erreichbare Giermoment nahezu vergleichbar zu dem im passiven Referenzfahrzeug bei reinem ESP-Eingriff. Grund für die geringeren

Giermomente der aktiven Version ist die geänderte, neutralere Fahrwerksabstimmung des aktiv gefederten Fahrzeugs. Im Fall des optimierten Betriebs beider Eingriffe ist allerdings sichtbar, dass das einsteuerbare Giermoment im Vergleich zur Referenz mindestens erreicht, bei höheren Querbeschleunigungen auch deutlich gesteigert wird.

5 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Simulation ein geeignetes Hilfsmittel bei Entwicklung aktiver Fahrwerksfunktionen darstellt; auf dem Weg der Simulation können Größen bestimmt werden, die im Fahrversuch nicht direkt messbar sind. Darüber hinaus erlaubt die Simulation die detaillierte Untersuchung und Optimierung von aktiven Systemen und deren Einfluss auf die Fahrdynamik, noch bevor ein aktiver Versuchsträger einsatzbereit ist.

Die beschriebene Simulations- und Entwicklungsplattform ermöglicht die Anpassung eines komplexen Simulationsmodells an unterschiedlichste Aufgaben; auch die Integration von Fahrversuch und Prüfstandsuntersuchungen in die Simulation ist abgedeckt. Die offene Simulationsplattform ermöglicht die Integration projektspezifischer Module, z.B. Aufbringen eines externen Giermoments oder die Aufschaltung gemessener ESP-Drücke.

Das Ergebnis der kombinierten Betrachtung von Wankwinkelkompensation und Fahrdynamikregelung zeigt die Wichtigkeit der simulationsgestützten Untersuchung aktiver Fahrwerksysteme. Bestehende negative Wechselwirkungen konnten ebenso aufgezeigt werden, wie Lösungen um diese Beeinträchtigung zu vermeiden. Darüber hinaus werden wesentliche Verbesserungen des Gesamtsystems erreicht, wenn die Regelstrategien beider Systeme aufeinander abgestimmt und optimiert werden.

6 Literatur

- [BAC03] Backes, L.
Untersuchung des Einflusses einer Radlastverstellung auf den Eingriff einer querdynamischen Stabilitätsregelung
Diplomarbeit
Institut für Kraftfahrwesen, RWTH Aachen, 2003
- [GÄR03] Gärtner, A.; Wolf, F.; Kallenberger, A.
Luftfederung und Wankdämpfung – Einfluss auf die Fahrdynamik des Smart
ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 105. Jahrgang, Heft 02/2003
Vieweg Verlag, Wiesbaden 2003
- [KON00] Konik, D.; Bartz, R.; Bärnthol, F.; Bruns, H.; Wimmer, M.
Dynamic Drive - das neue aktive Wankstabilisierungssystem der BMW Group
9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik
Aachen, Oktober 2000
- [SMA00] Smakman, H.
Functional Integration of Slip Control with Active Suspension for Improved Lateral Vehicle Dynamics
Herbert Utz Verlag, München, 2000
- [ZAN96] van Zanten, A. T.; Erhardt, R.; Pfaff, G.; Kost, F.; Hartmann, U.; Ehret, T.
Control Aspects of the Bosch VDC
AVEC'96, International Symposium on Advanced Vehicle Control
Aachen, 1996