

Absicherung und Freigabe der ESC-Gespannstabilisierung für den Weltmarkt: Teamarbeit aus Fahrversuch und HiL-Simulation

Vortrag, SIMVEC - Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung
19. November 2014, Baden-Baden

Autoren: M.Sc. P. Simon, Dipl.-Ing. S. Bewersdorff, Dipl.-Ing. T. Lehmpfuhl, TESIS DYNAware GmbH

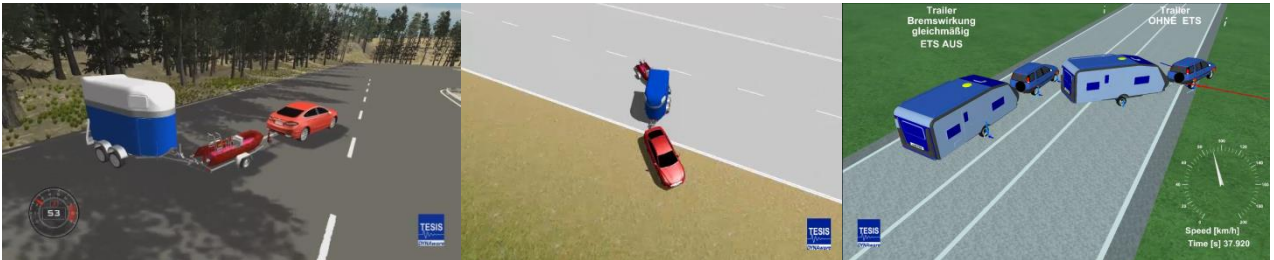


Bild 1: Verschiedene Simulationszenarien

Kurzfassung

Elektronische Stabilitätsregelsysteme (ESC-Systeme) gehören in aktuellen Kraftfahrzeugen zum Standard. Ihre Aufgabe ist es, in fahrdynamisch kritischen Situationen das Fahrzeug in einem für den Fahrer beherrschbaren Zustand zu halten. Moderne ESC-Systeme sind durch Zusatzfunktionen in der Lage mit Hilfe von Regelingriffen am Zugfahrzeug auch den Betrieb mit Anhängern zu stabilisieren. Fahrzeuggespanne haben im Allgemeinen eine kritische Fahrgeschwindigkeit, oberhalb derer eine durch Umgebungsbedingungen oder den Fahrer angeregte Gierschwingung nicht mehr von alleine abklingt. Wird das Gespann nicht rechtzeitig aktiv durch ESC-Regeleingriffe stabilisiert, kann es in der Folge zum Unfall kommen.

Der europäische Markt unterliegt strengen gesetzlichen Bestimmungen, welche die Vielfalt zugelassener Zugfahrzeug-Anhänger-Konfigurationen in einem überschaubaren Rahmen hält. Für diese typischen Gespannkonfigurationen existieren bei den Fahrzeugherstellern etablierte Prozesse und Methoden zur Freigabe und Absicherung der Gespannstabilisierungsfunktion im ESC mittels Fahrversuch. Weltweit gesehen sind die Beschränkungen nicht so eng. Im internationalen Markt sind auch PKW- Gespanne mit zwei Anhängern oder mit - für europäische Verhältnisse - unkonventionellen Kupplungssystemen erlaubt.

Die Vielfalt der denkbaren Kombinationen ausschließlich mit Fahrversuch abzutesten wäre sehr aufwändig, wenn nicht unmöglich. Dazu kommt, dass die Manöver sehr riskant sind, da sie im fahrdynamischen Grenzbereich stattfinden müssen. Deshalb haben sich einige Fahrzeughersteller entschieden, die Hardware-in-the-Loop

(HiL) Simulation in die Absicherung miteinzubeziehen. Vorgestellt wird eine simulationsbasierte Absicherungslösung mittels virtueller Gespanne, wie sie bei einem großen OEM im Einsatz ist. Ausgehend von realen Anhängern mit unterschiedlichen Konstruktionen und physikalischen Eigenschaften werden passende Simulationsmodelle erstellt und parametrisiert. Bewährte Verfahren zur Komponentvalidierung und die Gesamtvalidierung von mehreren Einfachgespannen sichern die Gültigkeit der Modelle ab. Bei den verwendeten Zugfahrzeugen handelt es sich um separat validierte Fahrzeugmodelle.

In der Simulation ist eine nahezu beliebige Kombination von Zugfahrzeug mit einem oder mehreren Anhängern unterschiedlicher Bauart und Beladung möglich, auch solche, die in der Realität nur selten zu finden sind. Mit einem Fahrermodell und dem simulierten Gespann in der Schleife wird das reale Steuergerät auf einem HiL-System betrieben und die Funktion zur Gespannstabilisierung anhand eines umfangreichen und mit dem Fahrversuch abgestimmten Testkatalog geprüft. Dieser umfasst systematische Variationen der Test-Parameter und Extremmanöver. Das zugehörige kennwertbasierte Auswertungsverfahren stellt die Fahreigenschaften objektiv dar, klassifiziert die Ergebnisse und markiert, wenn die Stabilisierung in einer Konfiguration nicht befriedigend ist. Die automatisierte Toolkette auf Basis des Simulationsframeworks DYNA4 ermöglicht eine hohe Testabdeckung der verschiedenen Gespanne und ergänzt somit den freigabeverantwortlichen Fahrversuch, der sich auf wenige reale Prototypen beschränken kann.

Stand der Technik

Elektronische Stabilitätsregelsysteme (ESC) gehören zur Standardausstattung moderner Kraftfahrzeuge. Aufgabe des ESC-Systems ist es, in fahrdynamisch kritischen Situationen das Fahrzeug in einem für den Fahrer beherrschbaren Zustand zu halten. Die Sicherheitsrelevanz des ESC-Systems wird dadurch unterstrichen, dass ab November 2014 in Europa neue Fahrzeuge der Klassen M1 und N1 (Pkw und leichte Nutzfahrzeuge) ohne ein solches System nicht mehr zugelassen werden dürfen. Moderne ESC-Systeme sind mittlerweile so leistungsfähig, dass sie in der Lage sind, weitere Stabilisierungs- und Koordinationsaufgaben zu übernehmen. So ist es durch Zusatzfunktionen möglich, mit Hilfe von Regeleingriffen am Zugfahrzeug auch den Betrieb mit Anhängern zu stabilisieren. Jede Gespannkombination aus Zugfahrzeug und Anhänger hat im Allgemeinen eine kritische Geschwindigkeit, ab der Störungen einen instabilen Fahrzustand herbeiführen können. Der Wert der kritischen Geschwindigkeit hängt maßgeblich von Konstruktionsgrößen des Anhängers (z.B. Deichsellänge, Achstyp und Achsanzahl) sowie veränderlichen Parametern des Gesamtgespanns (z.B. Gewichte, Trägheiten und Beladung) ab. Störungen können z.B. Seitenwindböen beim Überholen, unbewusste Anregungen vom Fahrer oder auch Fahrbahnanregungen sein. Bei niedriger Geschwindigkeit im sogenannten unterkritischen Bereich reagiert ein Gespann auf einen moderaten Lenkimpuls mit einer gedämpften Schwingung um die Hochachse. Ohne weitere Eingriffe klingt die oszillierende Gierbewegung von Zugfahrzeug und Anhänger mit der Zeit ab und das Gespann stabilisiert sich von alleine. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit nimmt die Dämpfung immer weiter ab, so dass bei Überschreiten der kritischen Geschwindigkeit die Schwingung nicht mehr von alleine abklingt. Das Gespann wird instabil. Ohne richtigen Eingriff kann jede Störung zu einem Unfall führen. Aufgabe der Gespannstabilisierungsfunktion des ESC-Systems ist es, das Schwingungsverhalten des Gespanns laufend zu analysieren und das Aufschwingen des Gespanns zu erkennen. Durch gezielte Brems- eingriffe an den Rädern des Zugfahrzeugs wird die Geschwindigkeit verringert und den Pendelbewegungen des Gespanns entgegengewirkt.

Herausforderung Freigabe für den Weltmarkt

Der europäische Markt unterliegt strengen gesetzlichen Bestimmungen, welche die Vielfalt zugelassener Zugfahrzeug-Anhänger-Konfigurationen in einem überschaubaren Rahmen hält. Für die im Rahmen dieser Bestimmungen möglichen Gespannkonfigurationen existieren bei den Fahrzeugherstellern etablierte

Prozesse und Methoden zur Freigabe und Absicherung der Gespannstabilisierungsfunktion im ESC mittels Fahrversuch. Diese sind nicht einfach auf andere Märkte übertragbar, da gerade im nordamerikanischen Raum eine Vielfalt sehr unterschiedlicher Anhängertypen und Kupplungssysteme zur Verfügung steht, die hierzulande nicht erlaubt sind. Darüber hinaus lassen es die gesetzlichen Bestimmungen einiger Länder zu, mehrere Anhänger hintereinander an ein Fahrzeug zu koppeln. Die Anhänger können dabei sehr unterschiedlich beladen sein. Die Vielfalt der zulässigen Kombinationen ausschließlich mit Fahrversuchen abzusichern wäre sehr aufwändig, wenn nicht unmöglich. Dazu kommt, dass die Testmanöver sehr riskant sind, da sie im fahrdynamischen Grenzbereich stattfinden müssen. Um die Gespannstabilisierungsfunktion dennoch für den Weltmarkt freigeben zu können, haben sich einige Fahrzeughersteller entschieden, die Absicherung durch den Einsatz von Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulation zu unterstützen. Die TESIS DYNAware hat dafür passende Modelle und Methoden entwickelt und zu einer durchgängigen und automatisierten Lösung kombiniert.

Valide Fahrdynamiksimulation

Eine valide Fahrdynamiksimulation setzt auf den Grundpfeilern Modellierung, Parametrierung und Validierung in einer verlässlichen Software- und Hardwareumgebung auf [1].

Modellierung

Als Rechenmodelle kommen die in der Simulationsumgebung DYNA4 verfügbaren Fahrdynamikmodelle zum Einsatz. Neben dem Zugfahrzeug werden damit Anhänger mit unterschiedlichen Konstruktionen und physikalischen Eigenschaften echtzeitfähig abgebildet.

Für den Absicherungsprozess der Gespannstabilisierung wurden 3 repräsentative Anhänger ausgewählt. Dazu zählt ein Wohnwagenanhänger mit nur einer Achse, niedrigem Schwerpunkt und hohem Gierträgheitsmoment. Je nach Beladung ist das Stabilitätsverhalten bei diesem Anhängertyp besonders kritisch. Ein weiterer typischer Vertreter ist der schwere Doppelachs-Lastenanhänger bis zu 3,5t. Mit Doppelachse verbessert sich das Stabilitätsverhalten zwar grundsätzlich, da die beiden ungelenkten Achsen über die Reifen einen Kurvenwiderstand aufbauen, was der Gierschwingung entgegenwirkt. In der Praxis werden die Anhänger aber auch schwerer beladen, was bei ungünstigem Gewichtsverhältnis von Zugfahrzeug zu Anhänger früher zu kritischen Situationen führen kann. Der dritte Anhängertyp ist ebenfalls mehrachsrig, verfügt aber

zusätzlich über eine Drehschemellenkung. Diese Bauart ist in Deutschland relativ selten und im Pkw Zugbetrieb unüblich, im internationalen Markt jedoch häufiger anzutreffen.

Parametrierung

Neben der mathematisch korrekten Modellierung auf Basis der DYNA4 Fahrdynamikmodelle hat die richtige Parametrierung der Modelle einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisgüte. Das Verfahren zur Bestimmung des Parametersatzes für einen Anhänger unterscheidet sich im Grunde genommen nicht von dem, wie es für ein Fahrzeugmodell angewendet wird. Im Allgemeinen erfolgt die Parametrierung durch geeignete Pre-processing-Schritte für Einzelkomponenten, aus denen sich das Gesamtsystem zusammensetzt. Beispielsweise liegen der Achsparametrierung KnC-Prüfstandsversuche zugrunde. Reifen werden auf einem Rollen- oder Flat-Track-Prüfstand vermessen und die Messdaten zu TMeasy-Modellparametern verarbeitet. Aufbaueigenschaften werden unter anderem in Pendelversuchen ermittelt. Die Komponentenmodelle werden jeweils mit geeigneten Messdaten von Komponentenprüfständen validiert, so dass ein Gesamtfahrzeugmodell bzw. ein Anhängermodell aus einer Kombination von vielen validierten Einzelkomponenten zusammengesetzt werden kann [2].

Validierung

Die Validierung erfolgt am Gesamtsystem. Ausgangspunkt für die Validierung eines Gespannmodells stellt die Validierung des Zugfahrzeugmodells dar, das wiederum aus validierten Einzelkomponenten besteht. Die Fahrdynamiksimulation des Zugfahrzeugs wird hinsichtlich des unregelmäßigen Grundfahrverhaltens gegenüber Fahrversuchsmessungen auf Basis eines umfangreichen Fahrmanöverkatalogs validiert. Beim Vergleich zwischen Fahrversuch und Simulation wird für diesen Anwendungsfall besonderes Augenmerk auf die Übereinstimmung der Querdynamik und der Reaktion auf Bremsenriffe gelegt.

Im nächsten Schritt wird das validierte Zugfahrzeug in Kombination mit den jeweiligen Anhängertypen in einem erneuten Fahrversuch hinsichtlich Grundfahrverhalten und Schwingungsverhalten in der Nähe der kritischen Geschwindigkeit untersucht. Ausgehend von diesen Messdaten werden die Gespannmodelle als Einfachgespanne (d.h. Zugfahrzeug und ein Anhänger) validiert.

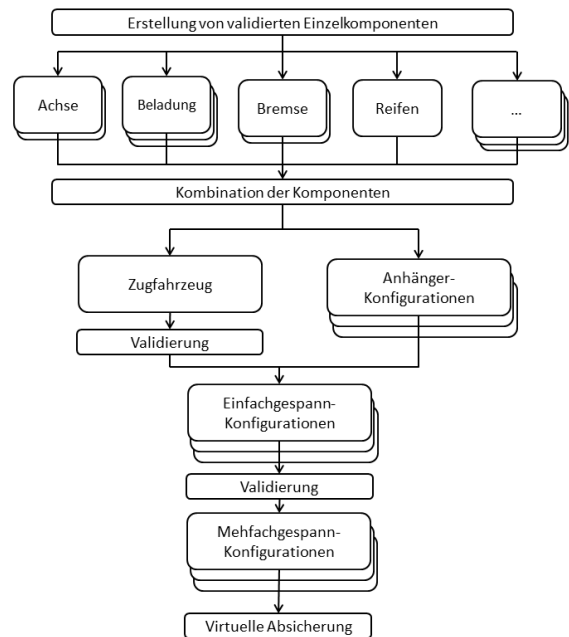


Bild 2: Validierungsprozess von Gespannen zur virtuellen Absicherung

Die Validität des Gespannmodells in Kombination mit der Validität des Zugfahrzeugmodells lässt die Annahme zu, dass auch die Modelle der Einzelhänger die Testszenarien realitätsgetreu abbilden und im Folgenden zu Mehrfachgespannen kombinierbar sind. Ausgehend von dieser Annahme lassen sich in der Simulation nahezu beliebige Kombinationen von Zugfahrzeugen mit einem oder mehreren Anhängern unterschiedlicher Bauart und Beladung zusammensetzen (siehe Bild 2), auch solche, die in der Realität nur selten zu finden sind.

Virtuelle Absicherung

Die Funktion zur Gespannstabilisierung wird anhand eines umfangreichen und mit dem Fahrversuch abgestimmten Testkatalogs geprüft. Der Katalog enthält Manöver wie z.B. Straßen-, Lenkwinkel-, Seitenwindanregung oder den Übergang von der Ebene ins Gefälle.

In erster Linie wird im virtuellen Freigabeprozess nur untersucht, ob ein Gespann mit aktivierter Gespannstabilisierungsfunktion ein besseres oder gleich gutes Fahrverhalten aufweist als ein Fahrzeug ohne diese Funktion. Die Gespannstabilisierungsfunktion darf bei keiner Zugfahrzeug-Anhängerkonfiguration zu einer Verschlechterung oder gar ungewollten Anregung des Systems führen. Alle Tests werden am HiL mit und ohne aktivierte Stabilisierungsfunktion durchgeführt.

Auf Basis des in [3] dargestellten kennwertbasierten Auswertungsverfahrens lassen sich die Fahreigenschaften objektiv darstellen, klassifizieren sowie die Ergebnisse markieren, bei denen die Stabilisierung in einer Konfiguration nicht befriedigend ist. Dadurch werden die Ergebnisse großer Testumfänge überschaubar. Kritische Szenarien sind somit leichter zu identifizieren.

Grundsätzlich sind für jeden Test zwei Ergebnisse möglich (siehe auch Bild 3):

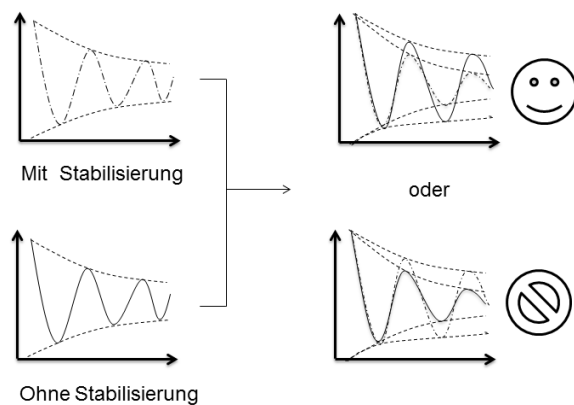


Bild 3: Bewertungsschema der Stabilisierungsfunktion

1. Die Reaktion mit Gespannstabilisierungsfunktion ist schlechter als ohne aktivierte Gespannstabilisierung. Dieser Fall würde bedeuten, dass die Gespannstabilisierungsfunktion mit dem getesteten Softwarestand nicht für den Weltmarkt freizugeben ist bzw. Nachbesserungen notwendig sind.

2. Die Reaktion mit Gespannstabilisierungsfunktion ist gleich oder besser als ohne. Daraus folgt, dass die Funktion auf Grundlage der HiL-Ergebnisse freigegeben werden kann. Dies gilt beispielsweise auch für Tests, bei denen die Gespannstabilisierungsfunktion nicht zum Eingriff kommt, da hierbei keine Verschlechterung gegenüber der deaktivierten Funktion auftritt.

Ausblick

Zielsetzung ist es, mit der automatisierten Toolkette auf Basis des Simulationsframeworks DYNA4 in Zukunft im virtuellen Fahrversuch nicht nur die qualitativ richtige Funktion der Gespannstabilisierung abzusichern, sondern auch eine quantitative Eigenschaftsbewertung im Rahmen der Manöver und Umweltbedingungen abzugeben, die in Realität nicht gefahrlos durchgeführt werden können (z.B. Nässe, Eis, Schnee, Reifenversagen). Dadurch kann nicht nur die Sicherheit des Gesamtsystems geprüft sondern auch die Performance hinsichtlich der Stabilisierung verbessert werden.

Die hohe Testabdeckung für die verschiedenen Gespanne unter verschiedensten Bedingungen ergänzt somit optimal den freigabeverantwortlichen Fahrversuch, der sich auf wenige reale Prototypen beschränken kann.

- [1] Chucholowski, C. : Herausforderung Fahr-dynamiksimulation - eine kritische Betrachtung. ATZ extra, 5, 2014, 70-75
- [2] Bewersdorff, S. : Beherrschung der Variantenvielfalt durch prozesssichere Simulation. ATZ, 10, 2011, 774-779
- [3] Bewersdorff, S. : Simulation und Bewertung von Fahr-dynamikeigenschaften im Grenzbereich. Automotive Engineering Partners, 6, 2007, 56-59

Kontakt und weitere Informationen

Telefon: +49 89 74 73 777 444

Email: tesis.dynaware@tesis.de

Web: www.tesis-dynaware.com/trailer