



AUTOREN



DR.-ING. HENNING HOLZMANN
ist Direktor des Bereichs Fahrzeug-CAE bei der Adam Opel AG in Rüsselsheim.



DIPL.-ING. (FH) KARL MICHAEL HAHN
ist Leiter der Gruppe Fahrwerkregelung im Bereich Driving Performance CAE bei der Adam Opel AG in Rüsselsheim.



JONATHAN WEBB MEng.
ist Produktmanager Fahrwerkentwicklung bei Applus Idiada in Santa Oliva (Spanien).



DIPL.-ING. (FH) OLIVER MIES
ist Applikationsingenieur bei IPG Automotive in Karlsruhe.

VARIANTENVIELFALT NIMMT ZU

Fahrdynamikregelungen (ESP) leisten einen wertvollen Beitrag zur aktiven Fahrsicherheit [1, 2]. Daher sind sie in vielen Märkten der Welt mittlerweile als Erstausrüstung neuer Fahrzeuge vorgeschrieben. Für die Typzulassung eines neuen Modells muss folglich der Nachweis eines wirksamen ESP-Systems geführt werden. Bisher geschieht dies im Rahmen von physischen ESP-Homologationstests. Dazu wird das Fahrzeug mit einem Lenkroboter ausgerüstet und absolviert das sogenannte Sine-with-Dwell-Fahrmanöver (Sinusfunktion mit Haltezeit). Der Zeitaufwand dafür ist erheblich, denn der Test erfordert pro Variante mindestens einen Tag für die Fahrzeugvorbereitung und Durchführung. Zudem sind die Testfahrten wetterabhängig.

Gleichzeitig hat die Variantenvielfalt vor allem in globalen Fahrzeugprojekten massiv zugenommen. Ein Beispiel aus dem Hause Opel illustriert das eindringlich: Während es beim Opel Corsa (Modelljahr 2005) rund 70 Varianten gab, beläuft sich diese Zahl beim Insignia (Modelljahr 2008) bereits auf etwa 150 Varianten, während im Astra/Zafira (Modelljahr 2009) bereits ungefähr 400 Varianten verfügbar sind. Ohne leistungsfähige Simulationslösung würde sich hier eine Schere zwischen der Variantenvielfalt und wirtschaftlichen Grenzen auftun.

In der Richtlinie ECE-R 13H ist eine solche Lösung explizit für Bremssysteme vorgesehen: Die Richtlinie erlaubt eine

Kombination von physischem Test mit Methoden der Simulation. Opel hat diesen Weg beschritten und damit erstmals demonstriert, dass die simulationsbasierte ESP-Homologation mit CarMaker/HiL von IPG Automotive für einen Pkw einsatzbereit ist [3]. Bei schweren Nutzfahrzeugen war dieser Nachweis bereits einem Bremssystemhersteller gelungen [4]. Mit dieser Strategie möchte Opel die Markteinführung von neuen Fahrzeugen beschleunigen sowie Entwicklungskosten durch reduzierten Einsatz von Hardware und Prototypen einsparen.

SIMULATIONSBASIERTE ESP-HOMOLOGATION

In der europäischen Richtlinie ECE-R 13H ist definiert, dass die ESP-Homologation von Fahrzeugvarianten unter Zuhilfenahme simulationsbasierter Methoden erfolgen kann. Voraussetzung ist auch weiterhin ein physischer Versuch an einem realen Neufahrzeug im Fahrversuch. Auf Basis der im realen Fahrzeug erzielten Ergebnisse wurde eine Fahrzeugsimulationsumgebung CarMaker von IPG Automotive parametrisiert und im virtuellen Fahrversuch ausführlich validiert. Die Korrelation der Simulationsergebnisse mit den Messwerten eines Referenzfahrzeugs erreichte schnell die vom technischen Dienst und der Zulassungsbehörde geforderte Genauigkeit.

Im hier beschriebenen Piloteinsatz beim Opel Meriva wurde damit die Grundlage geschaffen, um die Simulationsergebnisse bei der zulassenden Behörde vorlegen zu

SIMULATIONSBASIERTE ESP-HOMOLOGATION FÜR PKW

Ab 2012 muss für die Typzulassung eines neuen Pkws in der EU ein wirksames ESP nachgewiesen werden. Im Interesse größerer Effizienz bei der ESP-Homologation von Fahrzeugvarianten hat die Adam Opel AG dafür ihre Fahrdynamik-Simulationsumgebung, deren zentraler Bestandteil CarMaker/HiL von IPG ist, mit Erfolg am Minivan Meriva eingesetzt. Die Ergebnisse der Simulation und der Fahrversuche auf der Teststrecke von Idiada liegen so dicht beieinander, dass eine simulationsbasierte ESP-Homologation gemäß ECE-R 13H zuverlässig möglich ist.

können und so die Homologation aller Fahrzeugkonfigurationen auf der Basis eines einzigen physisch getesteten Fahrzeugs zu erlangen. Die Vorgehensweise gliedert sich nahtlos in die existierende „Road to Lab to Math“-Strategie (RLM) von Opel ein [5]. Diese verfolgt eine Unterstützung des physischen Versuchs auf der Teststrecke durch die Kombination von Simulation und Hardware-in-the-Loop(HiL)-Test bis hin zur rein rechnerischen Simulation (Software-in-the-Loop, SiL).

SINE-WITH-DWELL-FAHRMANÖVER

Beim Sine-with-Dwell-Versuch für die ECE-R 13H handelt es sich um ein dynamisches Fahrmanöver, das ein abruptes Ausweichen vor einem Hindernis standardisiert. Der Versuch bildet inhaltlich weitgehend den NHTSA Federal Motor

Vehicle Safety Standard, FMVSS No. 126, ab [6]. Der Sine-with-Dwell-Versuch besteht aus einem Vortest und dem eigentlichen Fahrmanöver. Im Rahmen des Vortests wird die Amplitude A des Lenkeinschlags ermittelt, die bei einer Konstantfahrt (80 km/h) benötigt wird, um bei einer Lenkgeschwindigkeit von $13,5 \text{ }^\circ/\text{s}$ eine Querbeschleunigung von $0,3 \text{ g}$ zu erreichen (Lenkwinkelbedarf).

Zu Beginn des eigentlichen Manövers rollt das Fahrzeug ohne Lenkbewegung und Bremseneingriff im höchsten Gang bei $80 \text{ km/h} \pm 2 \text{ km/h}$. Der Test beginnt mit einem Lenkradeinschlag von $1,5 \times A$. Bei jedem Testdurchlauf wird der Lenkwinkel um $+0,5 \times A$ erhöht – bis zu einem maximalen Lenkradeinschlag von 270° . Die Versuche zu den einzelnen Lenkradwinkelstufen werden jeweils rechts/links und links/rechts gefahren. Das Sinuslenken mit $0,7 \text{ Hz}$ führt dabei

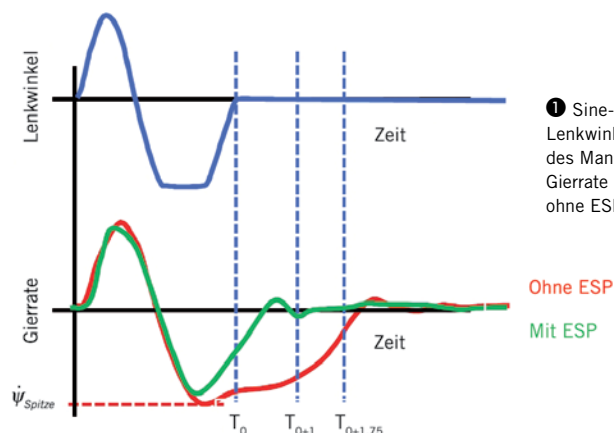
zu einer heftigen Gierreaktion, die Haltezeit von 500 ms repräsentiert die Reaktionszeit eines typischen Fahrers. Somit stellt das Manöver eine kritische Spurwechselsituation reproduzierbar dar. ❶ zeigt den Lenkwinkelverlauf während des Manövers sowie exemplarisch die Fahrzeugreaktion mit und ohne ESP-Eingriff.

Der Sine-with-Dwell-Versuch wird anhand von drei Stabilitätskriterien beurteilt. Dort ist ausschlaggebend, wie schnell das ESP anspricht und wie schnell sich das Fahrzeug mittels Reduzierung der Gierrate stabilisiert. Dazu werden die Gierrate und Fahrzeugpositionen zu drei Zeitpunkten erfasst. Um die Homologation zu erhalten, muss die Gierrate 1 s nach Ende der Lenkbewegung ($T_0 + 1 \text{ s}$) bei $\leq 35 \%$ der maximalen Gierrate liegen. Bei $T_0 + 1,75 \text{ s}$ darf sie nur noch bei $\leq 20 \%$ der maximalen Gierrate liegen.

Zusätzlich gibt es ein Fahrzeugansprechkriterium, das die Fähigkeit des Fahrzeugs zum dynamischen Spurwechselfersatz beziehungsweise Ausweichen bewertet (mindestens $1,83 \text{ m}$ für Fahrzeuge $< 3,5 \text{ t}$ Gesamtgewicht). Auch unter Einhaltung der beschriebenen drei Stabilitätskriterien ist es dem Fahrzeughersteller möglich, je nach Philosophie eine eher konservative oder eher sportliche Abstimmung des ESPs zu wählen.

DATENGEWINNUNG MIT DEM REFERENZFAHRZEUG

Bei diesem Pilotprojekt wurde der eigentlich zur Homologation benötigte



Validierungsumfang gezielt weit über das geforderte Maß hinaus ausgedehnt, um für die Zukunft zum einen fundierte Erkenntnisse zur Validierungsgüte von Teilsystemen zu erhalten und zum anderen die Zusammenhänge der Wirkungskette vollständig zu erfassen. Für die Messung des objektiven Fahrzeugverhaltens arbeitete die Adam Opel AG mit Idiada zusammen. Dort wurde ein Opel Meriva mit einer sehr umfangreichen Sensorik ausgestattet. Auf einem Achskinematikprüfstand (K&C Rig) erfolgte die statische Messung wesentlicher Parameter der Radaufhängung und Federung im

Referenzfahrzeug jeweils an Vorder- und Hinterachse.

Die umfangreichen Untersuchungen lieferten detaillierte Daten über die räumliche Lage einzelner Verbindungselemente der Radaufhängung sowie die kontrollierte Bewegung des Rads innerhalb der Aufhängung unter Lasteinfluss von der Straße. Anschließende dynamische Messungen ohne und mit Lenkroboter lieferten Daten über das reale Fahrzeugverhalten auf der Teststrecke.

② zeigt das von Idiada instrumentierte Referenzfahrzeug, mit dem dynamische Details wie die einwirkenden Kräfte, die

Positionen der Radmittelpunkte, Schräglaufwinkel, Spur und Sturz, ein beginnendes Durchdrehen der Räder sowie die Fahrzeugreaktion (Schwerpunktbeschleunigungen, Geschwindigkeit, Neigung etc.) erfasst wurden.

SIMULATIONSMODELL DES FAHRZEUGS UND VIRTUELLER FAHRVERSUCH

Die Adam Opel AG nutzt eine durchgehende Kette von Softwarewerkzeugen für eine möglichst präzise Simulation der Fahrdynamik [7]. Den Ausgangspunkt bildet eine Mehrkörpersimulation (MKS), in der das grundlegende Fahrzeugmodell erzeugt und parametrisiert wird. Da dieses MKS-Modell jedoch nicht echtzeitfähig ist, wird es anschließend in die Entwicklungs- und Testumgebung CarMaker/HiL überführt. Als HiL-Hardware kommt eine dSpace-Hardware-Plattform zum Einsatz. Diese wird von der CarMaker-Simulationsumgebung gesteuert und interagiert mit dem CarMaker-Fahrzeugmodell ③. Die bei Opel genutzte HiL-Simulationsumgebung, wie sie auch beim Opel Meriva für die simulationsbasierte Pilotanwendung zur ESP-Homologation verwendet wurde, wird in ④ gezeigt.

Eine Opel-eigene Automation der Fahrmanöverkataloge sorgt dafür, dass der HiL-Prüfstand rund um die Uhr genutzt werden kann. Dazu dienen neben einem Fernzugriff auf die Variation der CarMaker-Modellparameter (etwa Fahrzeug, Fahrer und Streckenmerkmale) auch eine automatisierte Durchführung und Auswertung einer Vielzahl von Fahrmanövern. Zusätzlich erzeugt die Testautomation einen automatischen Prüfbericht.

VALIDIERUNG DER SIMULATION

Vor dem simulierten ESP-Homologationstest wurde die komplette Simulationsumgebung intensiv validiert. Ausgehend von zunächst einfachen Fahrmanövern wurde das Modell in zunehmend komplexen Manövern erprobt. Den Abschluss bildete der Sine-with-Dwell-Versuch gemäß ECE-R 13H. Bei der Validierung des Fahrzeugmodells stand vor allem das Modell der Bremshydraulik im Vordergrund. Als Eingangsgrößen dienen der Bremspedaldruck, die Ventilbetätigung und die Pumpenaktivität. Der Radbremsdruck und das Radbremsmoment stellen die Ausgangsgrößen dar. Die Komplexi-



② Referenzfahrzeug Opel Meriva mit Idiada-Instrumentierung für Fahrdynamikversuche



③ Visualisierung des CarMaker-Fahrzeugmodells zur ESP-Homologation

tät der simulierten Manöver wurde von einer einfachen Bremsung bei Geradeausfahrt über einen ABS-Eingriff bis zur hochdynamischen, radindividuellen Bremsdruckmodulation während des ESP-Eingriffs gesteigert.

5 zeigt die letztlich erreichte sehr gute Übereinstimmung der Simulation am HiL-Simulator mit den realen Messwerten vom instrumentierten Referenzfahrzeug. Die gezeigten Ergebnisse stammen von einem Manöver mit etwa 100° Lenkwinkel und einem Rechts-Links-Einschlag. Sowohl die Steigungen als auch die Extremwerte von Gierrate und Querschleunigung zeigen hohe Übereinstimmung. Daraus lässt sich ablesen, dass die verwendete Simulationsumgebung die relevanten Dynamikwerte mit der in der Richtlinie ECE-R 13H geforderten Genauigkeit nachbildet.

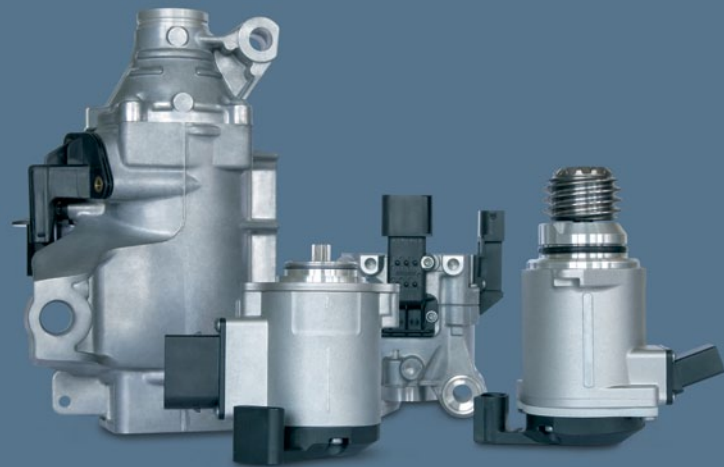
ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In einem Pilotprojekt hat Opel in Zusammenarbeit mit Idiada und IPG Automotive untersucht, ob und wie eine simulationsbasierte ESP-Homologation gemäß ECE-R 13H möglich ist. Der Einsatz einer durchgehenden Werkzeugkette einschließlich der Fahrdynamik-Entwicklungs- und Testumgebung CarMaker hat gezeigt, dass ein solcher valider Homologationstest in einer HiL-Umgebung möglich ist. Voraussetzung dafür sind neben einem stabilen Prozess ein genaues Fahrdynamikmodell und eine leistungsfähige Integrationslösung, um Modellerweiterungen und Hardware-Ankopplungen zu ermöglichen.

Die Validierung der Simulationsumgebung anhand statischer und dynamischer Messdaten bestätigt eine sehr gute Korrelation. Das zeigt sich auch im simulationsbasierten Sine-with-Dwell-Versuch, dessen Ergebnisse sehr dicht an den realen Messwerten des Manövers liegen. Damit hat die verwendete Simulationslösung die geforderte Genauigkeit zur ESP-Homologation erreicht.

Zudem ist der Entwicklungs- und Optimierungsprozess von den physischen Messwerten über die Simulation bis zur Homologation klar nachvollziehbar und dokumentiert. Als Fazit lässt sich festhalten, dass die Zahl der physischen Fahrzeugtests während einer ESP-Homologation mit der Methode der Simulation tatsächlich deutlich verringert werden kann.

Treiben Innovationen voran.

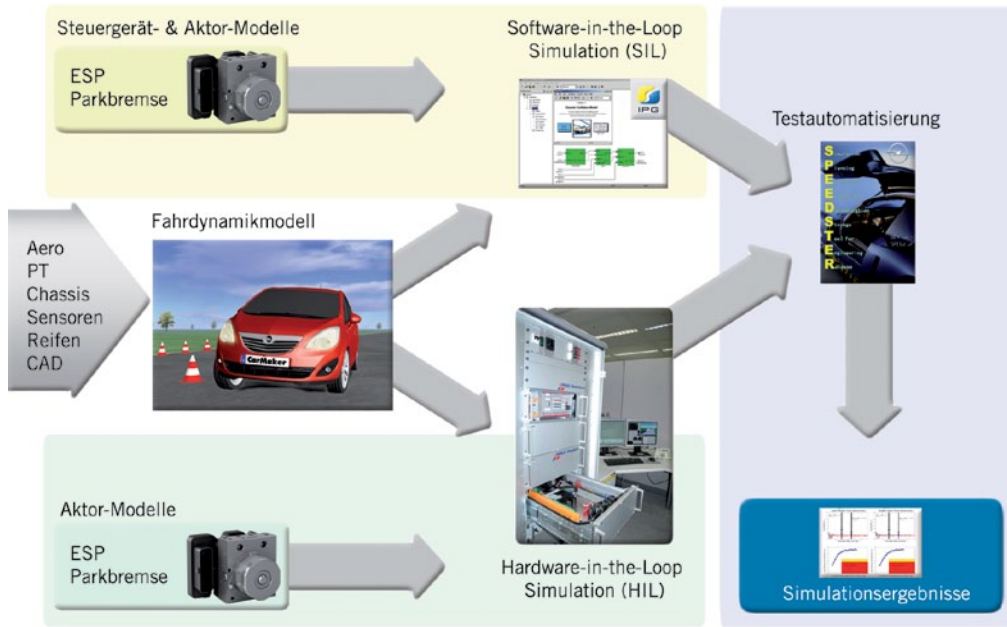


Maßgeschneiderte Lösungen für neue Ansprüche im Automobilbau kommen von ebmpapst – ob für die Verbesserung von Fahrdynamik und Lenkkomfort oder für innovative Pumpenantriebe zur regelbaren Förderung von Öl und Wasser. Mit der Elektrifizierung von Nebenaggregaten und Power-on-Demand-Konzepten können zudem die CO₂-Emissionen reduziert werden. Egal, was Ihre Anforderungen sind: Die bürstenlose DC-Motortechnologie bietet maximale Zuverlässigkeit, hervorragende Dynamik und höchste Effizienz. Mehr unter: www.ebmpapst.com



Die Wahl der Ingenieure

ebmpapst



LITERATURHINWEISE

[1] Langwieder, K.; Gwehenberger, J.; Hummel, T.; Bende, J.: Benefit Potential of ESP in Real Accident Situations Involving Cars and Trucks. ESV paper No.150, 18th ESV Conference, Nagoya, Japan, 2003
 [2] Hummel, T.; Kühn, M.: An Investigation into the Availability of ESP in Cars in 2009. http://www.udv.de/uploads/tx_udvpublications/Web_komp__E_Nr.16_UDV_Kompakt_ESP2009_01.pdf
 [3] Holzmann, H.; Hahn, K. M.; Weyer, F.; Römer, M.; Webb, J.; Boltshauser, S.; Tosolin, G.; Bu, Q.: Simulation-based Homologation of ESC Systems According to ECE-R 13-H. Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik. 13 – 14 March 2012

[4] Wurster, U.; Ortchner, M.; Schick, B.; Drenth, E.; Crawley, J.: First ECE 13/11 Homologation of Electronic Stability Control (ESC) by Vehicle Dynamics Simulation – Challenges, Innovations and Benefits. Proceedings, chassis.techplus 2010, Munich, 7 – 8 June 2010
 [5] Kochem, M.; Holzmann, H.: Einsatz der Road-Lab-Math Strategie bei der simulationsbasierten Entwicklung von Fahrwerkregelsystemen. Vortrag, VDI-Tagung Autoreg, Wiesloch, 7. und 8. März 2006
 [6] NHTSA National Highway Traffic Safety Administration: Final Regulatory Impact Analysis http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/Rulemaking/Rules/Associated%20Files/ESC_FRIA_%2003_2007.pdf

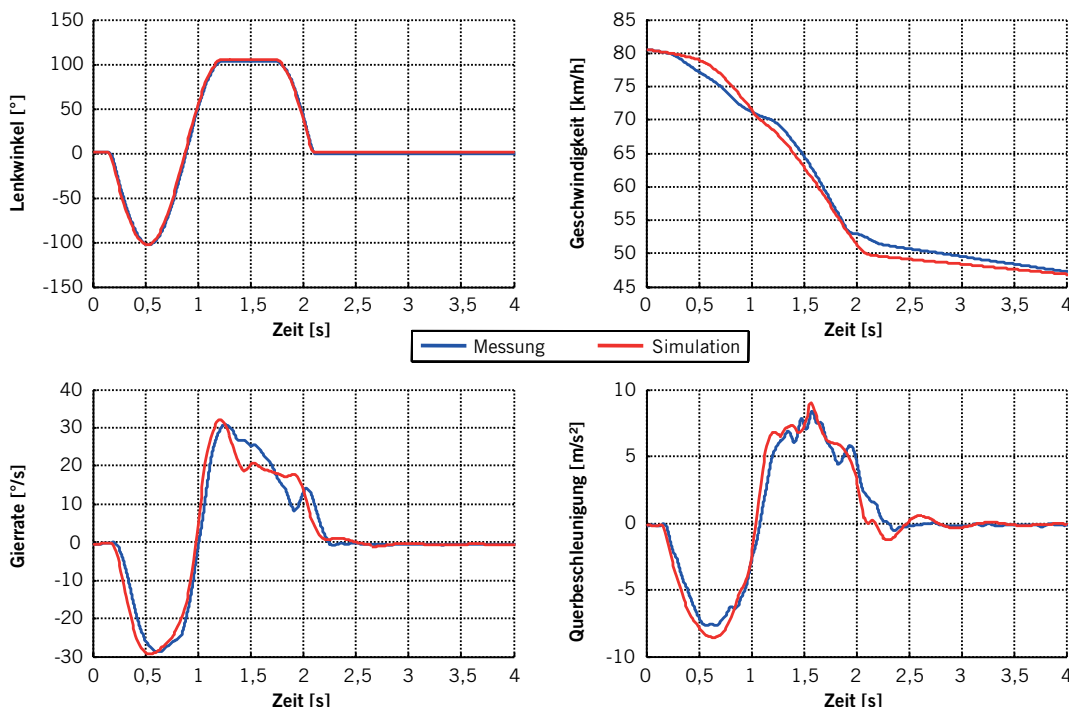
[7] Holzmann, H.; Halfmann, C.; Hahn, K. M.; Kochem, M.: Virtual Development and Application of Chassis Components and Chassis Controls at GM Europe. SAE Paper 2007-01-0813, 2007



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.ATZonline.de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 order your test issue now:
springervieweg-service@springer.com



5 Gute Korrelation von Messwerten, die am Referenzfahrzeug ermittelt wurden (blaue Kurven) mit den Ergebnissen des simulierten Sine-with-Dwell-Versuchs (rote Kurven)