

## **Simulationsmethoden zur Evaluierung und Verifizierung von Funktion, Güte und Sicherheit von Fahrerassistenzsystemen im durchgängigen MIL-, SIL- und HIL-Prozess**

### **SIMULATION METHODS TO EVALUATE AND VERIFY FUNCTIONS, QUALITY AND SAFETY OF DRIVER ASSISTANCE SYSTEMS IN THE CONTINUOUS MIL, SIL, AND HIL PROCESS**

Bernhard Schick, Josef Henning, Uwe Wurster, Birgit Klein-Ridder

IPG Automotive GmbH  
Bannwaldallee 60  
76185 D-Karlsruhe

#### **Keywords**

Active Safety, Driver Assistance Systems, MIL, SIL, HIL Simulation, Vehicle Dynamics Simulation

#### **Einleitung**

Fahrerassistenzsysteme bieten ein enormes Potenzial zur Verbesserung des Fahrkomforts und der Fahrsicherheit. Allerdings sind die Anforderungen an die Systementwicklung im Spannungsfeld zwischen Nutzen und Risiken gleichermaßen hoch. Große Herausforderungen stellen zum einen das Sicherheitskonzept und zum anderen die Zuverlässigkeit der Funktionen bei der Vielfalt von real möglichen Szenarien, die sich aus der Wechselwirkung zwischen Fahrer, Fahrzeug, Verkehrssituation und Straßenzustand ergeben [1]. Erschwerend kommt hinzu, dass Fahrerassistenzsysteme zunehmend mit aktiven und passiven Sicherheitssystemen vernetzt werden. Dies birgt auf der einen Seite große Chancen, um die Sicherheit im Fahrzeug zu erhöhen, steigert jedoch gleichzeitig die Komplexität im Entwicklungsprozess. Insbesondere für den Fahrzeughersteller, der die Verantwortung für das Fahrzeug als Gesamtsystem trägt, bedeutet die zunehmende Vernetzung einen hohen Integrationsaufwand. Er muss sicherstellen, dass die Systeme, die zumeist von verschiedenen Zulieferern stammen, in jeder Fahrsituation perfekt miteinander interagieren.

Für die funktionale Entwicklung und Absicherung insbesondere sicherheitsrelevanter Funktionen ist daher eine in Versuch und Simulation durchgängige Methoden- und Toolkette nötig. Die Funktionen der Systeme müssen damit in allen Phasen des V-Entwicklungsprozesses in möglichst realistischen Testszenarien bewertet, optimiert und abgesichert werden. Da sich die enorme Anzahl der Testfälle und die komplexen Abhängigkeiten im Fahrzeugverbund nur mit virtuellen Methoden ausreichend untersuchen und testen lassen, sollten große Teile der Entwicklungsarbeit in die Simulation vorverlegt werden. So kann bereits frühzeitig, noch vor der Fertigung der ersten Fahrzeugprototypen, ein hoher Reifegrad der Systemfunktionalität erreicht werden.

Für den Fahrversuch bedeutet dieses Frontloading-Prinzip die Möglichkeit, tiefer in die subjektive Bewertung des Systems eingehen zu können. Denn nicht nur die perfekte Integration des Systems und eine hohe Funktionalität entscheiden über den Erfolg aktueller und zukünftiger Entwicklungen. Ebenso wichtig für die Kundenakzeptanz ist die richtige Ausgestaltung der

Schnittstelle zwischen Mensch und Technik. Die Eingriffe des Assistenzsystems und dessen Bedienung dürfen den Fahrer bei seiner Fahraufgabe unter keinen Umständen stören oder gar zusätzlich belasten und ablenken. Daher ist die subjektive Bewertung des Systems ebenso bedeutend wie die objektive Absicherung der Funktionalität. Subjektive und objektive Bewertungsmethoden sollten daher beide in einem durchgängigen Entwicklungsprozess verankert sein.

## Motivation

Trotz starker Bestrebungen nach Prozessen für die Analyse und Bewertung von Fahrerassistenzsystemen beispielsweise hinsichtlich der Funktionalen Sicherheit [2] oder menschlicher Verhaltensweisen und Erwartungen [3] zeigen sich noch erhebliche Lücken im Entwicklungsprozess. Eine durchgängige Methoden- und Werkzeugkette muss sich bei diesem relativ jungen Gebiet erst noch etablieren und in Standards verfestigen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, auf den Erfahrungen im Bereich der Fahrdynamik aufzubauen und die Lücken im Verifizierungsprozess des V-Modells von Fahrerassistenzsystemen zu schließen. Es werden Methoden und Werkzeuge aufgezeigt, die es erlauben, realistische Szenarien für den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation abzubilden. Damit können die Funktionen, Fehlfunktionen, Failsafe-Verfahren, Sicherheitsfunktionen und die Regelgüte der Systeme umfassend analysiert und bewertet werden.

Die Grundlage für die Entwicklung dieser Methoden bot ein von TÜV SÜD Automotive aus dem realen Fahrversuch entwickelter Versuchs- und Bewertungskatalog (Abbildung 1). Dieser beinhaltet realistische Szenarien, die auf Basis von Erkenntnissen der Risikobetrachtung und der funktionalen Sicherheitsanalyse bestimmt wurden [1]. Der Katalog wurde erweitert, optimiert und in die Simulationsumgebung CarMaker von IPG Automotive integriert. Diese Fahrdynamiksoftware beinhaltet eine detailgetreue virtuelle Fahrzeugumgebung mit präzisen Modellen für Fahrzeug, Fahrer, Straße und Umgebungsbedingungen. Die Versuchsszenarien wurden mit Hilfe der Traffic-Funktionalität von CarMaker (IPGTraffic) abgebildet, welche es erlaubt, beliebig indizierbare stehende und bewegte Hindernisse zu simulieren und die gewünschte Verkehrssituation im zeit-, weg- oder ereignisgesteuerten Ablauf reproduzierbar zu regeln.

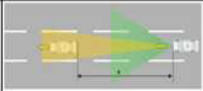
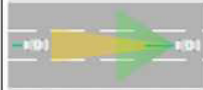
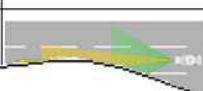
Manöver	Grafik	Beschreibung		Bewertung
		Leadfahrzeug	Testfahrzeug	
Abstand Stationär		Konstantfahrt: 50, 80, 100, 120, 130, 140, 160, 180 km/h		Abstände - Relativ zum gesetzlichen Sicherheitsabstand
Auffahren auf Kolonne		Konstantfahrt mit 100 km/h	Konstantfahrt: 120, 140, 160, 180 km/h auf	- Reaktionsab- stand, - minimaler Abstand - Verzögerung - Harmonie der - Bremsung - Rückmeldung Fahrer
Fahren in Kolonne		Beschleuni- gung von 80 – 100 km/h in 2 Beschleuni-	Konstantfahrt: Tempomat- einstellung 120 km/h	- Reaktionszeit, - maximaler Abstand, Beschleunigung

Abbildung 1: Versuchs- und Bewertungskatalog für Fahrerassistenzsysteme nach [1]

## Die Simulationsplattform CarMaker

Neben der präzisen Abbildung der Manöver in der Simulation sind vor allem die Durchgängigkeit entlang des V-Prozesses und die offene und flexible Architektur von CarMaker wichtige Merkmale, die den Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen unterstützen. Von Model-in-the-Loop (MIL) über Software-in-the-Loop (SIL) bis hin zu Hardware-in-the-Loop (HIL) kann der Testingenieur durchgängig mit den gleichen Modellen, der gleichen Datenbasis und den gleichen implementierten Testvektoren sowie Versuchskatalogen arbeiten. Je nach Entwicklungsstand können Regel- und Systemmodelle, der übersetzte Software-Code oder das Steuergerät sowie weitere Hardwarekomponenten in die Simulationsumgebung integriert und getestet werden. Die Durchlässigkeit vom HIL-Labor oder der Testanlage zurück zum Modell ist durch die durchgängige Modell- und Datenbasis ebenfalls sichergestellt (siehe Abbildung 2). Der hohe Vernetzungsgrad von Regelsystemen des Fahrwerks, Motors und Komforts, der bei Fahrerassistenzsystemen eine große Bedeutung hat, kann mit diesem Konzept stufenweise bewältigt werden. Die Simulationsumgebung ist so konzipiert, dass sich sukzessiv die verschiedenen Integrationsstufen des Netzwerks darstellen und testen lassen.

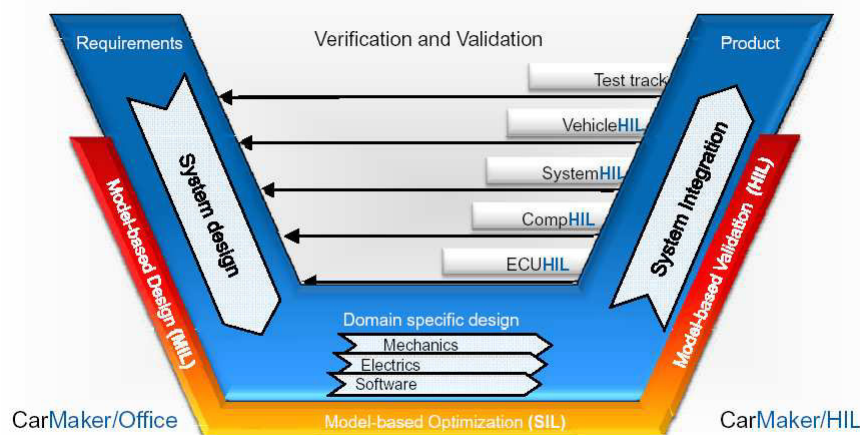


Abbildung 2: Durchgängiger Einsatz von CarMaker im V-Zyklus

### Modellbasis: Fahrer, Fahrzeug, Umwelt

Da der überwiegende Anteil der Fahrerassistenzsysteme direkt in die Längs-, Quer- und Vertikaldynamik des Fahrzeuges eingreift, einen hohen Vernetzungsgrad zu Fahrwerksregelsystemen aufweist oder Funktionen von Fahrwerksregelsysteme nutzt, bieten sich hochentwickelte Fahrdynamiksimulationslösungen als Basis für neue Methoden und Werkzeuge an. Zur Simulation der Fahrdynamik stellt das Simulationsprogramm CarMaker eine detailgetreue virtuelle Fahrzeugumgebung bereit, in deren Zentrum ein echtzeitfähiges und bis in den fahrdynamischen Grenzbereich hinein gültiges Fahrzeugmodell steht. Es handelt sich dabei um ein mit MESA VERDE automatisch generiertes Mehr-Körper-System (MKS), das vollständig nicht-linear und erweiterbar ist. Das MKS-Modell bildet das Kernmodell und die integrative Plattform für alle anderen Unterkomponenten des Fahrzeugs, wie Achsen, Federung, Lenksystem, Reifen, Bremsanlage, Antriebsstrang und Aerodynamik. Insgesamt hat die Modellumgebung des virtuellen Fahrzeugs eine einheitliche, modulare Struktur: Die Modelle der Fahrzeugumgebung sind übersichtlich nach den einzelnen Baugruppen angeordnet und können modifiziert oder durch eigene Modelle ausgetauscht werden. Auch die Parametrierung der

Fahrzeugmodelle orientiert sich an den einzelnen Bauteilgruppen und damit an den für Versuchsfahrer und Applikationsingenieure gewohnten Funktionseinheiten und Strukturen.

Für die Entwicklung von Assistenzsystemen wie z.B. des automatischen Abstandsregeltempomaten (ACC) ist das virtuelle Fahrzeug mit einem Sensormodul ausgestattet, welches es dem Anwender erlaubt, die Position der Sensoren am Fahrzeug, den Öffnungswinkel, die Reichweite sowie die Taktrate zu bestimmen. Die Integration des zu testenden Regelsystems, sei es als Modell oder reale Hardware, funktioniert dank klar definierter und offener Schnittstellen in Simulink oder wahlweise auf C-Code-Ebene einfach und schnell.

Das virtuelle Fahrzeug wird von einem vollparametrierten und lernfähigen Fahrermodell (IPGDriver) gesteuert, welches die Aktionen und Reaktionen eines realen Fahrers realitätsgetreu abbildet. Anders als einfache Längs- und Querregler kann der virtuelle Fahrer eigenständig den optimalen Kurs und die Fahrweise über virtuelle Strecken planen. Abhängig von definierten Fahrer- und Fahrzeugeigenschaften wählt der IPGDriver seine Geschwindigkeit zwischen der Streckenbegrenzung, falls gewünscht sogar indem er die Kurven schneidet. Dabei beachtet er nicht nur die Streckenführung in der Ebene, sondern auch die Höhenprofile dreidimensionaler Teststrecken. Das Fahrermodell beherrscht das Handling von Fahrzeugen mit aktiven Systemen, wie ABS, ESP, Aktivlenkung oder Active Body Control und ist mit einer künstlichen Intelligenz ausgestattet, die es dem virtuellen Fahrer erlaubt, sich an das Responseverhalten des Fahrzeugs, auch unter Berücksichtigung des Reglerverhaltens, anzupassen. Er lernt das Fahrverhalten des Fahrzeugs und kann es wie ein realer Testfahrer bis in den dynamischen Grenzbereich hinein kontrollieren.

Gerade bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ist die Bedeutung eines leistungsfähigen, intelligenten Fahrermodells nicht zu unterschätzen. Denn nur, wenn sich der virtuelle Fahrer nahezu wie ein realer Fahrer verhält, können die komplexen Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Assistenzsystem richtig erfasst und untersucht werden. Daher war die Weiterentwicklung des IPGDrivers ein wichtiger Schritt, um den simulationsgestützten Test der Fahrerassistenzsysteme weiter voranzutreiben. So beherrscht die neueste Generation des IPGDrivers z.B. Manöver wie das Fahren im Schrittempo, Stop&Go und das Rückwärtsfahren, um Systeme wie die Einparkhilfe zu testen. Ebenfalls kann ausgewählt werden, ob das Fahrermodell das Fahrzeug durch Vorgabe des Lenkwinkels oder des Lenkmoments steuern soll. Letzteres ist unter anderem für die Entwicklung von Spurhalteassistenten oder einer automatischen Lenkung für Ausweichmanöver von Bedeutung, bei denen das vom Fahrer vorgegebene Lenkmoment durch einen Lenkmomenteneingriff des Regelsystems überlagert wird.

Im aktuellen Entwicklungsschritt wird nicht nur die Lenkmomentvorgabe des Fahrers abgebildet, sondern ebenso die Reaktion des Fahrers auf den Lenkmomenteneingriff des Systems. Dazu wird im realen Fahrversuch das Verhalten menschlicher Fahrer gemessen und auf typische Verhaltensmuster analysiert. Mit Hilfe der daraus gewonnenen Erkenntnisse wird eine Regelstrategie entwickelt und im Fahrermodell implementiert. Darüber hinaus wird der Fahrer sich in Verkehrssituationen zurecht finden und eigenständig an fahrenden oder stehenden Hindernissen vorbeifahren bzw. überholen. Die jeweilige Aktions- und Kursplanung erfolgt unter Berücksichtigung des Gegenverkehrs und erlaubt es, beispielsweise Notbremsituationen oder Pre-Crash-Situationen bei stehendem Verkehr nach Spurwechsel darzustellen.

Neben virtuellem Fahrer und Fahrzeug komplettieren dreidimensionale Fahrbahnmodelle die virtuelle Fahrzeugumgebung. Die Fahrbahnmodelle können entweder aus Geraden, Kurvenstücken, Klothoidenabschnitten, Steigungen und Gefälle segmentweise aufgebaut werden, oder sie repräsentieren reale Teststrecken (z.B. Hockenheimring oder Nürburgring Nordschleife), die anhand von Messdaten definiert wurden. Einzelne Streckenabschnitte können mit Nässe, Glätte, verschiedenen Reibwerten, Seitenwind, Spurrillen, Bodenwellen oder auch Straßenschildern und Spurmarkierungen versehen werden. Außerdem ist es möglich, die hochaufgelösten digitalisierten Strecken von TÜV SÜD Automotive zu integrieren. Diese bieten eine höchst präzise Abbildung von Fahrbahn-Unebenheiten und erlauben es, die Einflüsse der Fahrbahnanregung im Simulationsablauf zu berücksichtigen und den Einfluss auf die Regelgüte z.B. von Spurhalteassistenten genauer zu untersuchen [4].

Um den Anforderungen frei definierbarer und reproduzierbarer Testabläufe gerecht zu werden, wurde das Modul IPGTraffic mit einem Traffic Scenario Manager erweitert. Damit können beliebige Verkehrssituationen mit stehenden Hindernissen sowie vorausfahrenden und entgegenkommenden Fahrzeugen auf den virtuellen Teststrecken in ihrem Ablauf präzise konfiguriert und simuliert werden. Typ, Dimensionen und die Anfangsbedingungen, Wege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Objekte in den verschiedenen Raumrichtungen können unabhängig oder abhängig zueinander frei spezifiziert werden. Der Ablaufsteuerung dienen sogenannte Mini-Manöver Commands, die zeit-, weg- oder ereignisgesteuert ablaufen und jedem Fahrzeug bzw. Objekt zugeordnet werden. Diese Mini-Manöver Commands können im Open Loop- oder Closed Loop-Modus in Längs- und Querdynamik frei kombiniert werden.

Die ereignisbasierte Steuerung erlaubt es, Manöver in Relation zum Verkehr beziehungsweise zum Verhalten einzelner Objekte zu definieren. Der direkte dynamische Variablenzugriff in die Modelle und deren Parameter kann damit abhängig von der Fahr- und Verkehrssituation vorgenommen werden. Dieses Konzept grenzt sich deutlich von den allgemein üblichen Konzepten ab, bei denen der Ablauf im Pre-Processing berechnet und anschließend abgefahren wird. Das würde bedeuten, dass ereignisabhängige Variablenzugriffe nur nach zahlreichen Vorsimulationen definiert werden könnten. Ein ereignisabhängiger Zugriff wäre in diesem Fall nur für eine bestimmte Modellparametrierung reproduzierbar darstellbar; bei veränderten Fahrzeugparametern, Geschwindigkeiten oder Streckenführungen müssten erneute Vorstudien durchgeführt werden. Die Ablaufsteuerung der vorgestellten Lösung setzt hingegen auf das bewährte Konzept der interaktiven Manöversteuerung von IPG auf. Alle Mini-Manöver Commands lassen sich so beliebig in der Manöversteuerung, im Traffic Scenario Manager oder in der Testautomatisierung aufbauen dynamisch ansprechen.

### **Flex4Net Systemumgebung**

Die beschriebene Modellumgebung steht im Kontext der modularen und leistungsstarken Flex4Net-Systemumgebung von CarMaker. Diese stellt eine offene Integrationsplattform dar, mit der sich schnell und flexibel beliebige Architekturen aus Modellumgebung, Frontend und Testeinheit aufbauen lassen – am Arbeitsplatzrechner, Echtzeitrechner oder verteilt im Rechnernetzwerk. Diese Flexibilität erlaubt es, dieselbe Test- und Entwicklungsumgebung durchgängig für MIL, SIL und HIL während des gesamten Entwicklungsprozesses zu nutzen.



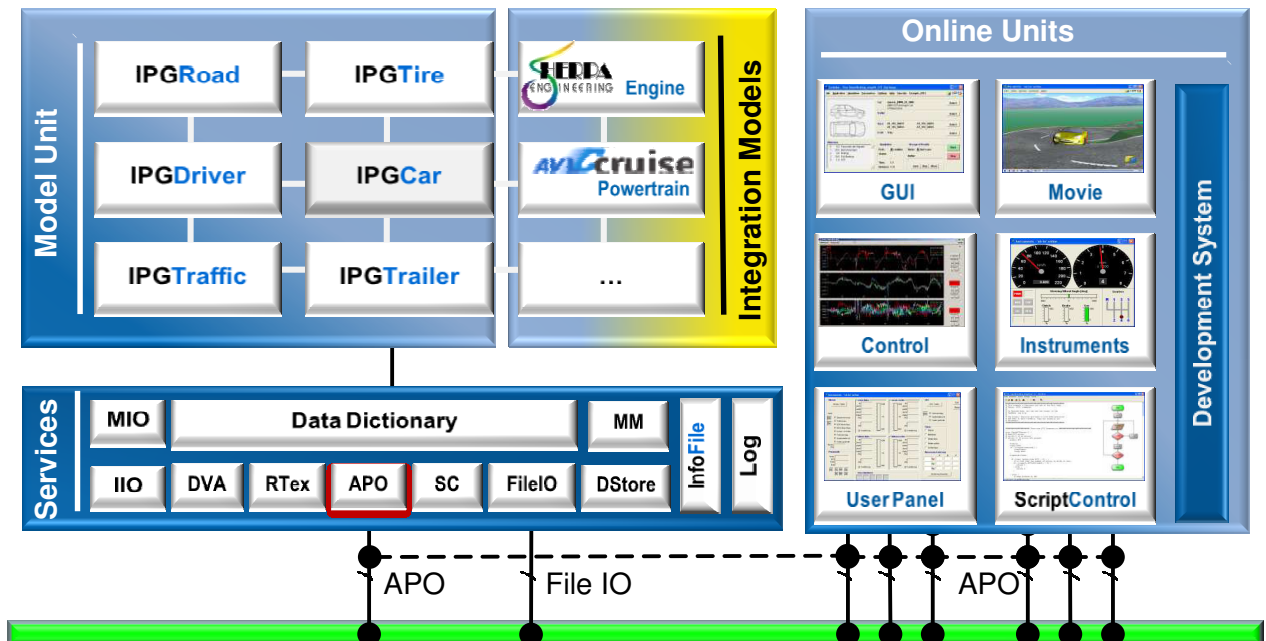


Abbildung 3: Flex4Net Systemumgebung

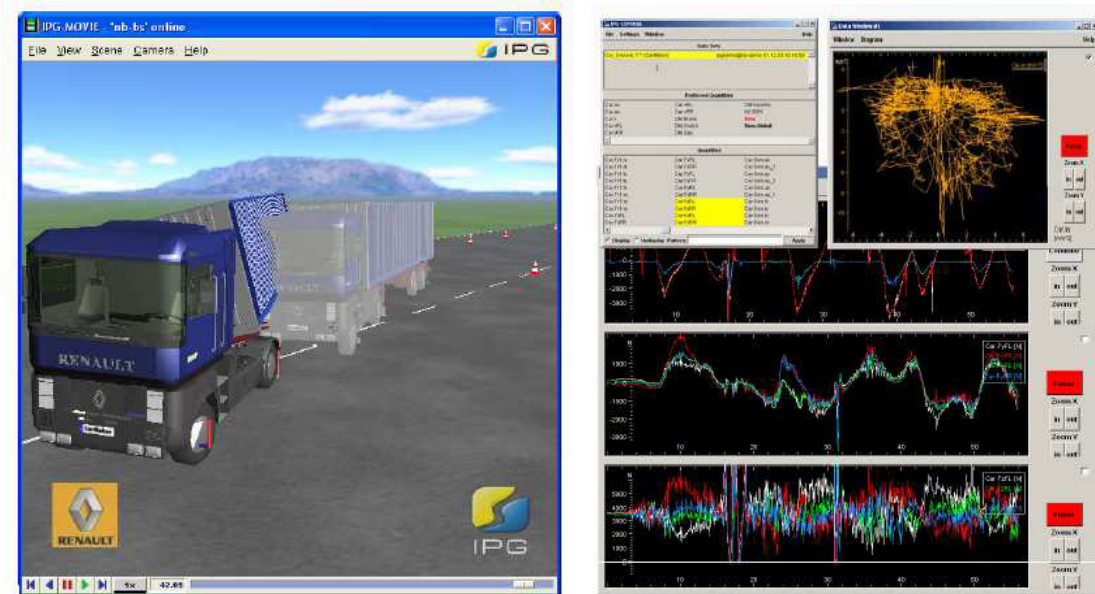
Weiterer Vorteil von Flex4Net ist die Bereitstellung einer „Online Data Exchange“-Struktur, die alle für die Simulation nötigen Prozesse parallel und permanent bereitstellt (Abbildung 3). Der Anwender hat die Möglichkeit, die Simulation direkt über Online-Dienste ohne langwierige Kompilierungs-Zwischenschritte zu steuern. Dazu wurde eine zentrale Diensteanheit entwickelt, welche die Zusammenarbeit der Online-Einheiten im Frontend mit der Modelleinheit im Backend bei kürzesten Zugriffszeiten realisiert. Während das „Data Dictionary“ den direkten Zugriff auf alle zeitlich veränderten Variablen im Modell organisiert, bildet der Online-Kommunikationsdienst „APO“ das Kernelement der Interprozesskommunikation. Daten können damit direkt über beliebige Ethernet-Netzwerke und TCP/IP-Protokolle bidirektional ausgetauscht werden.

Die Modelleinheit und die Online-Dienste wurden so konzipiert, dass sie vollständig eigenständig operieren und sich selbst mit Parametern versorgen. Damit können die Frontendeinheiten im Netz beliebig zu- und abgeschaltet werden. Der File I/O-Dienst ermöglicht der Modelleinheit jederzeit auf gespeicherte Files zuzugreifen, um beispielsweise große detaillierte 3D-Streckendatensätze zu laden. Ein integrierter Model Manager („MM“) ermöglicht den dynamischen Austausch von Modellen, um z.B. Achs-, Motor- oder Streckenvariationen während der Tests vorzunehmen oder Softwaremodelle mit Hardwarekomponenten auszutauschen. Bei Assistenzsystemen lassen sich damit verschiedene Sensormodelle oder Regelmodelle während der Simulation umschalten, um beispielsweise Varianten oder Variantenkombinationen schnell zu testen und zu vergleichen.

Damit hat der Anwender bereits während der laufenden Simulation die Möglichkeit, die simulierten Fahrmanöver zu beobachten und erste Anhaltspunkte für die Bewertung zu erhalten. Das Online-Animationsprogramm IPGMovie bietet einen ersten und äußerst intuitiven Einblick in die virtuellen Fahrmanöver. Es visualisiert die Fahrmanöver auf dreidimensionalen, unebenen Strecken mitsamt dem darauf fahrenden Verkehr sehr genau. Der Anwender kann verschiedene

Kameraperspektiven wählen, die Animation abspeichern und in unterschiedliche Video-Formate exportieren. Außerdem kann als Erweiterung zum hauseigenen IPGMovie eine Virtual Reality-Darstellungen über den APO-Kommunikationsdienst angekoppelt werden.

Als weiteres Analysetool steht die Online-Signal-Analyse IPGControl zur Verfügung. IPGControl eignet sich besonders für die Bearbeitung großer Datenmengen und stellt praktische Funktionen zum Vergleich der Simulationsergebnisse bereit.



**Abbildung 4: Online-Analyse-Tools IPGMovie und IPGControl**

Die Flex4Net-Systemumgebung macht außerdem den Online-Dienst „Direct Variable Access“ (DVA) möglich, mit dem der Anwender bereits während der laufenden Simulation direkten und dynamischen Zugriff auf alle Simulationsvariablen hat. Er kann damit die Variablen interaktiv über eine Benutzeroberfläche auslesen und modifizieren. Damit lässt sich der Simulationsablauf bzw. das Systemverhalten beliebig beeinflussen, um beispielsweise den Einfluss von Störgrößen durch überlagerte Fahrereingriffe, Systemfehler oder sonstige Ereignisse zu untersuchen.

Dieser Lese- und Schreibzugriff kann allerdings auch wie alle anderen Funktionen der CarMaker-Frontendtools automatisiert werden. Hierzu wurde die das Testautomatisierungstool ScriptControl realisiert. Die hohe Funktionalität dieses Moduls erlaubt es, alle Testsznarien mit den nötigen Parameterwechseln automatisiert durchführen zu können. Die Testautomatisierung mit ScriptControl ist vollständig programmierbar und erfordert anders als einfache Batchprogramme kein langwieriges Präparieren von Parameterdatensätzen. ScriptControl steuert alle Funktionen, Daten und Modelle des Simulationsprogrammes dynamisch an und verändert oder ersetzt sie "on the fly". Die hohe Anzahl der Testfälle, die für die funktionale Absicherung von Fahrerassistenzsystemen nötig ist, kann so effizient bewältigt werden.

Damit erfüllt die Simulationsumgebung alle Voraussetzung, um Reglermodelle, den übersetzten Software-Code sowie Steuergeräte umfassend und vollautomatisch zu testen.

## Anwendung der Methoden- und Toolkette am Beispiel ACC basierter Fahrerassistenzsysteme

Im Rahmen der methodischen Entwicklungsaktivitäten wurde ein ACC basiertes System beispielhaft in die Simulationsumgebung integriert und anhand des implementierten Manöverkatalogs untersucht.

### Struktur der Testumgebung

Abbildung 5 zeigt die Struktur der Testumgebung, mit der die ACC-Regelung im Verbund mit einem ESP-System und einer Motor-Steuerung getestet wurde. Diese Simulationsumgebung wurde durchgängig für MIL, SIL und HIL eingesetzt. Dabei wurden jeweils die grau dargestellten Komponenten durch Modelle, den übersetzten Softwarecode und die realen Steuergeräte ersetzt.

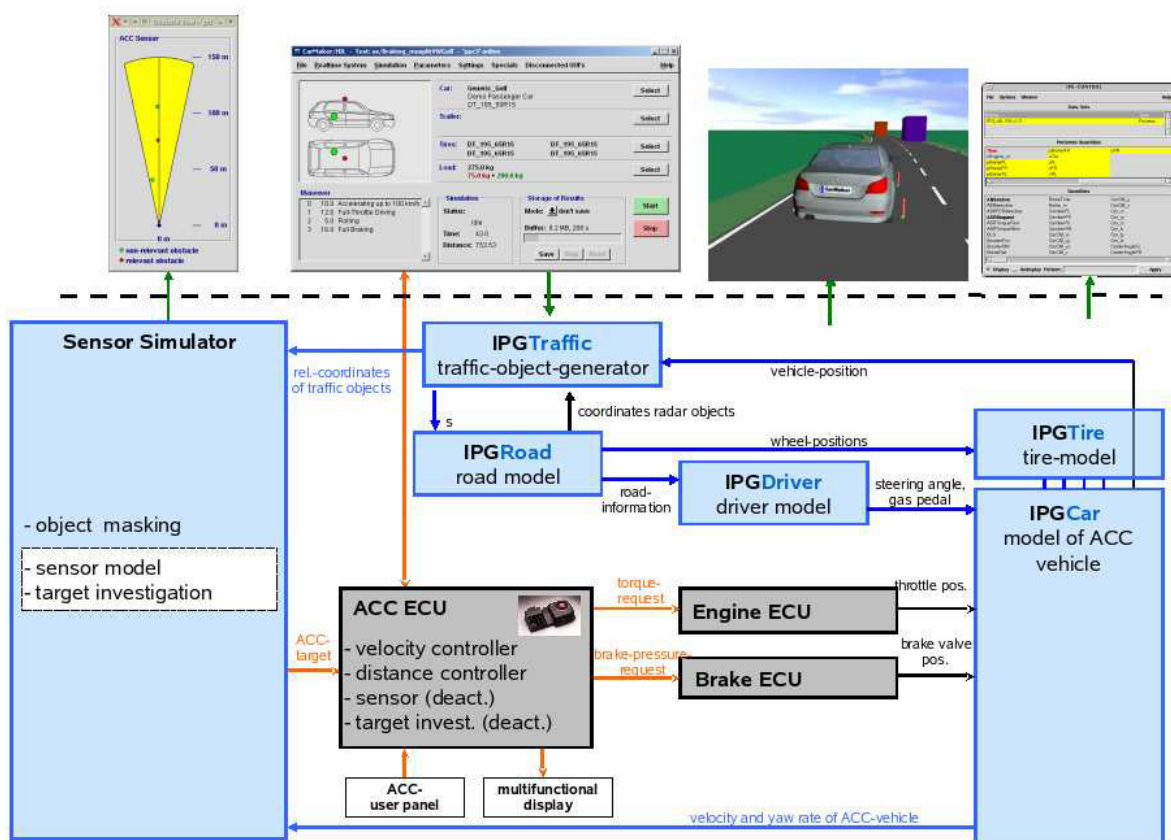


Abbildung 5: Simulationsumgebung für den Test von ACC im Verbund mit ESP und Motorsteuerung

Das Schema stellt in den blauen Kästen die CarMaker-Software und die Schnittstellen zur realen Hardware bzw. den Reglermodellen dar. Die ausgewählten graphischen Tools zeigen einige der verfügbaren Kontroll- und Visualisierungsmöglichkeiten. Sie beinhalten Animation,



Signalanalyse, Modifikation der Parameter, Manöverkonfiguration, CAN-Bus-Manipulation und ECU Diagnose.

In dieser Konfiguration generiert und verwaltet das Traffic-Modul IPGTraffic die statischen Hindernisse und die vorausfahrenden und entgegenkommenden Fahrzeuge in der virtuellen Fahrzeugumgebung von CarMaker. Hierzu werden zum einen Informationen über Position, Orientierung und Geschwindigkeit des virtuellen Testfahrzeugs IPGCar benötigt, zum anderen erhält das Traffic-Modul Informationen über das zu simulierende Verkehrsszenario aus der Ablaufsteuerung des Traffic Szenario Managers. Geschwindigkeit, Position und Dimension der generierten Objekte werden an das Sensormodell weitergereicht. Darüber hinaus stellt IPGTraffic Daten für die 3D-Animation mit IPGMovie zur Verfügung.

Das Sensormodell tastet ausgehend von einem Referenzpunkt am Fahrzeug den Bereich innerhalb eines bestimmten Öffnungswinkels und eines bestimmten Abstands strahlenorientiert nach Objekten ab. Befindet sich ein Objekt innerhalb des Sensorbereichs, wird es als relevant für die Abstandregelung des ACC-Modells betrachtet. In diesem Fall berechnet das Sensormodell den Abstand und die Geschwindigkeit des Objektes relativ zum Testfahrzeug und übergibt diese Werte dem ACC-Reglermodell. Durch Brems- und Gaseingriffe wird das Fahrzeug von der ACC-Regelung so gesteuert, dass es den vom Anwender definierten Abstand zum Objekt einhält. Ist kein relevantes Objekt im Erfassungsbereich des Sensors, so ist die Geschwindigkeitsregelung des ACC-Modells aktiv und das Fahrzeug wird der vorgegebenen Geschwindigkeit angepasst. Dabei werden die nötigen Bremsvorgänge durch die ABS/ESP-Regelung realisiert und die Beschleunigungsvorgänge von der Motorsteuerung kontrolliert. Die Erfassung der Objekte wird in einer Animation des Sensorbereichs aus der Vogelperspektive dargestellt.

### Testszenarien

Mit Hilfe des Traffic Szenario Managers wurden die einzelnen Testmanöver aus dem Versuchskatalog des TÜV SÜD Automotive [1] mit den verschiedensten Testkonfigurationen, wie Geschwindigkeiten, Längs- und Querschleunigungen, Abstandsstufen, Fahrzeugoffset etc., in der Simulation abgebildet. Der aus dem Fahrversuch generierte Manöverkatalog konnte dabei um einige sicherheitsrelevante und riskante Manöver erweitert werden. Tabelle 1 zeigt eine beispielhafte Auswahl der erstellten Versuchsszenarien.

Szenarien	Bemerkung
Abstand stationär	Messung des stationären Abstandes bei verschiedenen Abstandsstufeneinstellungen und Geschwindigkeiten.
Auffahren auf Kolonne	Auffahren des Testfahrzeuges auf eine Kolonne mit stationärer Geschwindigkeit bei verschiedenen Differenzgeschwindigkeiten.
Fahren in Kolonne	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Beschleunigung</li> </ul>	Beschleunigung in der Kolonne bei verschiedenen Beschleunigungsstufen.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Verzögerung</li> </ul>	Plötzliches Bremsen des Führungsfahrzeugs in der Kolonne bei verschiedenen Verzögerungsstufen und

	Differenzgeschwindigkeiten.
• Ausscheren	Spurwechsel des Führungsfahrzeugs aus der Fahrspur des Testfahrzeuges bei verschiedenen Querbeschleunigungen und Ausgangsgeschwindigkeiten.
• Ausscheren mit stehendem Verkehr	Spurwechsel des Führungsfahrzeugs aus der Fahrspur des Testfahrzeuges und plötzlich auftauchenden stehenden Verkehr bei verschiedenen Querbeschleunigungen und Ausgangsgeschwindigkeiten
• Einscheren	Spurwechsel des Führungsfahrzeugs in die Fahrspur (Abstandslücke) des Testfahrzeuges (Abb. 6).
• Aus-/Einscheren	Doppelter Spurwechsel des Führungsfahrzeugs bei verschiedenen Querbeschleunigungen und Ausgangsgeschwindigkeiten.
Überholvorgang	Überholvorgang nach Spurwechsel des Führungsfahrzeugs.
Spurwechsel	Spurwechsel des Testfahrzeuges aus der Fahrspur des Führungsfahrzeugs und plötzlich auftauchender stehender Verkehr bei verschiedenen Querbeschleunigungen und Ausgangsgeschwindigkeiten
Stop & Go	Verzögerung in den Stillstand und anschließende Beschleunigung bei verschiedenen Verzögerungen und Stillstandzeiten.
Kurvenfahrt	Stationäre Kurvenfahrt bei verschiedenen Kurvenradien und Geschwindigkeiten.

**Tabelle 1: Auszug aus der Liste implementierter Versuchsszenarien**

Die Variation der Modellparameter und Testvektoren wurde mit ScriptControl vollständig automatisiert. Im Vergleich zum realen Fahrversuch kann so eine sehr große Anzahl von Parametervariationen getestet werden. Dabei lassen sich die Konfigurationen und Parameter auch ergebnisabhängig gestalten.



**Abbildung 6: Reale und simulierte Versuchsszenarios: z.B. „Einscheren in Kolonne“**

### MIL, SIL und HIL

Dem Testingenieur steht damit bereits ein fertig implementiertes Manöverpaket für den MIL, SIL und HIL-Test der ACC basierten Funktionalitäten bereit. Ohne dass er sich um die

Programmierung von Testszenarien oder Modelldetails kümmern muss, können die Tests per Knopfdruck automatisch durchgeführt werden. Darüber hinaus kann er den implementierten Testumfang einfach und beliebig erweitern und an die eigenen Aufgabenstellungen anpassen. Regel- und Systemmodelle können so frühzeitig in die Simulationsumgebung integriert und durchgängig mit dem gleichen Versuchskatalog analysiert werden. In späteren Schritten kann dann der übersetzte Software-Code anhand der implementierten Testszenarien vollautomatisch verifiziert werden.

Der Wechsel zur HIL-Simulation vollzieht sich ebenfalls übergangslos. Anders als bei MIL und SIL werden hier die Simulationsmodelle nicht auf dem Arbeitsplatzrechner, sondern auf einer in Millisekunden oder schneller getakteten Echtzeitplattform berechnet. Für die vorliegende Arbeit wird auf die leistungsstarke Echtzeit-Plattform Xpack4 von IPG zurückgegriffen. Diese zeichnet sich durch robuste und hochleistungsfähige Industrietechnologien wie CompactPCI und leistungsstarke Multi-Core-Prozessoren aus. Auch für komplexe und detaillierte Modelle bietet diese Plattform enorme Rechenleistung, um harte Echtzeitbedingungen - egal bei welcher Anzahl von simulierten Umgebungsobjekten - zu garantieren.

Besonderes Merkmal dieser Echtzeit-Plattform ist, dass sie mit einem kompletten Betriebssystem ausgestattet ist. Dieses erlaubt es, dass die Flex4Net-Umgebung mitsamt der oben beschriebenen Online-Dienste und -Kommunikationsmechanismen in vollem Umfang auch für HIL-Tests zur Verfügung steht. Mit einem Betriebssystem können die Funktionalitäten, Mechanismen und vor allem Ressourcen der gesamten Simulationsumgebung hoch effizient genutzt werden. Verfahren wie Multi-Threading, Multi-Tasking und Multi-Core Handling erhöhen ebenso die Leistungsfähigkeit wie die Netzwerkfähigkeit mittels LAN/WAN-Anbindung auf Basis von TCP/IP und einem Memory Management. Besonders bei HIL macht sich der direkte File-Zugriff vom Echtzeitrechner auf den Host-PC bemerkbar, der langwierige Compile-Link-Load-Zyklen zwischen den Testläufen verhindert. Fahrzeug-Parameter und Modelle werden einfach über die Frontend-Tools von CarMaker bzw. durch ScriptControl verändert. Der Echtzeitrechner, auf dem die Modelle berechnet werden, greift über Ethernet direkt auf die veränderten Datensätze zu, so dass eine erneute Kompilierung des kompletten Simulationsprogramms nicht nötig ist.

Weiterer Vorteil von Flex4Net ist, wie erwähnt, die Möglichkeit, verschiedenste Testsystem-Konfigurationen aufbauen zu können. Gerade bei Systemen mit Detektion und Verarbeitung von Umgebungsobjekten, bei denen vielfältige Sensor- und Kameratechnologien eingesetzt werden, ist diese Flexibilität wichtig, da der passende Prüfstandsaufbau je nach Anwendungsfall individuell bestimmt werden muss. Es ist festzulegen, an welcher Stelle die Informationen über die aktuelle Verkehrssituation in das System eingespeist werden und welche Teile des ACC-Systems als Hardware oder als Modell integriert werden.

Die beschriebene Prüfstandskonfiguration in Abbildung 5 bildet die Struktur eines Standard-Testsystems für ACC von IPG ab. Hierbei werden das ACC- und das ESP-Steuergerät direkt per plug-and-play in die Schubladen (Plug-In TestBoxen) des Standard HIL-Simulators integriert (Abbildung 7). Die Erfassung der Objekte und die Auswertung nach Relevanz der Zielobjekte werden in einem Modell abgebildet. Das System wird von einem Host PC gesteuert und beinhaltet neben einem geregelten Netzteil, Xpack4-Echtzeitplattform, und I/O-System einen FailSafeTester, um vollautomatische Fehlertests durchführen zu können.

Denkbar wären aber auch Konfigurationen, bei denen die realen Sensoren bzw. Kamerasysteme ebenfalls als Hardware getestet werden sollen. Der Aufbau solcher HIL-Systeme erfordert ein hohes Applikations-Know-How und einen breiten Erfahrungsschatz an Elektronik, Mechatronik, Mess- und Regelungstechnik. IPG bietet hierfür individuelle Testsysteme, die anwendungsspezifisch konzipiert, entwickelt und realisiert werden.



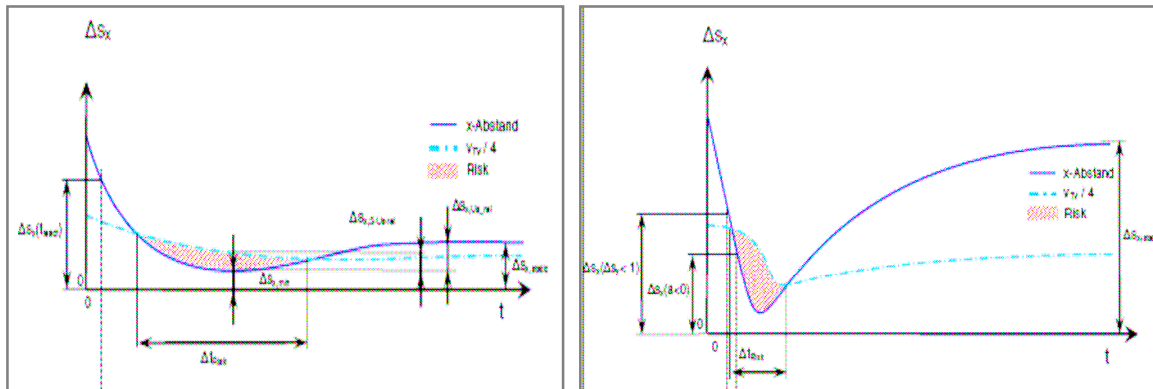
Abbildung 7: Standard HILSystem/ESP+ACC

### Ergebnisanalyse und Post-Processing

Für die Auswertung der Simulationsergebnisse aus MIL, SIL und HIL generiert ScriptControl automatisch Testprotokolle, in denen wichtige Signalverläufe, wie Abstände, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, über die Zeit und über den Abstand zum Vorderfahrzeug in Tabellen und Grafiken dargestellt werden.

Aufgrund der enormen Anzahl der berechneten Werte werden im Post-Processing die relativen Fahrzeugbewegungsgrößen (Relativposition, Relativgeschwindigkeit, Relativbeschleunigung) analog zum Verfahren in [1] und basierend auf den Erfahrungen aus der Fahrdynamik zu qualifizierbaren Kennwerten verdichtet. Diese geben die Systemeigenschaften komprimiert wieder und gestalten den Vergleich der Ergebnisse übersichtlich. Neben Momentanwerten wie Maxima und Minima dienen insbesondere Reaktionszeiten, Reaktionsabstände, Ansprechzeiten und Über-/Unterschwingwerte als wertvolle Kennwerte.

Dieses Auswertungsverfahren hat den Vorteil, dass zum einen der Vergleich der Ergebnisse zwischen MIL, SIL und HIL leicht durchführbar ist. Zum anderen bietet es aber auch die Möglichkeit, Ergebnisse zwischen dem Fahrversuch, wie bei [1] durchgeführt, und der Simulation auszutauschen. Eine durchgängige Methodik ist damit nicht nur vom Simulationsrechner ins HIL-Labor sichergestellt, sondern zieht sich bis zum Fahrversuch auf der Teststrecke durch.



**Bild 8: Beispiel Auswertungsvorschrift der Kennwerte (Auffahrmanöver)**

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Ausführungen zeigen die Herausforderungen, Potenziale und den Nutzen einer durchgängigen Simulationsmethodik zur funktionalen Evaluierung und Verifizierung von Fahrerassistenzsystemen. Die Grundlage für die Entwicklung der vorgestellten Methodik stellt ein von TÜV SÜD Automotive im Fahrversuch entwickelter Versuchs- und Bewertungskatalog dar. Dieser wurde optimiert, erweitert und in die Simulationssoftware CarMaker von IPG Automotive integriert. Für die Anwendung ACC entstand so ein in der Simulation implementiertes Testpaket, welches alle wichtigen Testfälle zur Verifizierung von ACC basierten Systemen beinhaltet und durchgängig für MIL, SIL und HIL angewendet werden kann. Damit ist es möglich, Funktionen, Fehlfunktionen, Failsafe-Verfahren, Sicherheitsfunktionen und die Regelgüte des Systems umfassend zu analysieren und zu bewerten. Die große Anzahl der implementierten Testfälle wird mit einer automatischen Testdurchführung effizient bewältigt. Die Ergebnisse der Simulation werden dem Anwender dabei in einem automatisch generierten Testprotokoll bereitgestellt.

Da es in Zukunft neben den Systemen der Längsregelung wie dem ACC-System vermehrt auch Systeme der Querregelung geben wird, soll das entwickelte Testpaket erweitert und für spezielle Anwendungsfälle angepasst werden. Auch für Systeme wie „Lane Keeping Assistance“ oder „Lane Departure Warning“ soll damit die Grundlage für einen durchgängigen und mit dem Fahrversuch harmonisierten Test- und Entwicklungsprozess geschaffen werden.

Löst man sich von der rein funktionalen Evaluierung der Fahrerassistenzsysteme, ergeben sich weitere Potenziale der vorgestellten Methoden- und Toolkette. So besteht die Möglichkeit, die Simulationsumgebung nicht nur für die objektive Bewertung der Systeme einzusetzen, sondern in Richtung der subjektiven Bewertung zu erweitern. Aufgrund der hohen Flexibilität der Systemumgebung von CarMaker ist z.B. eine Driver-in-the-Loop- oder Vehicle-in-the-Loop-Konfiguration möglich, bei der ein realer Fahrer in die geschlossene Regelschleife eingebunden wird. Die virtuellen Fahrversuche würden dabei von CarMaker simuliert und mit IPGMovie oder anderen Animationsmedien vor das Blickfeld des Fahrers projiziert. Damit lassen sich die Funktionen von Fahrerassistenzsystemen in der Wechselwirkung mit einem gewöhnlichen Durchschnittsfahrer in Simulatoren oder Fahrzeugen testen. Es können kritische Verkehrssituationen generiert werden, die für den Fahrversuch mit einem humanen Fahrer zu



gefährlich wären. Auf diese Weise lässt sich das wichtige Usability Testing der Mensch-Maschine-Schnittstelle bereits sehr früh in den Entwicklungsprozess integrieren.

Weiteres Anwendungspotenzial der vorgestellten Lösung liegt in der Verbrauchsoptimierung und CO<sup>2</sup>-Reduktion durch Fahrerassistenzsysteme. Ein Abstandsregeltempomat ermöglicht schließlich nicht nur mehr Komfort und Sicherheit, sondern kann durch die vorausschauende Fahrweise (Preview Strategie) auch zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs beitragen. Um solche Effekte zu untersuchen, sind einfache Längszyklen zur Verbrauchsbestimmung absolut unzureichend. Daher wurde in CarMaker die Möglichkeit geschaffen, eine detaillierte und präzise Antriebsstrangsimulation mit Motor, Getriebe, Differentialen, Regelung und Steuerprogrammen zu integrieren. Damit lässt sich der Beitrag der einzelnen Fahrzeugkomponenten auf den Verbrauch in realistischen Fahrzyklen, in denen Längs-, Quer- und Vertikaldynamik berücksichtigt werden, untersuchen. Analog zu dieser Arbeit sollen spezielle Fahrmanöver herausgearbeitet und in die Simulation implementiert werden, mit denen der Einfluss von Fahrerassistenzsystemen auf den Verbrauch untersucht werden kann. Dies würde einen weiteren wichtigen Schritt darstellen, um Antrieb, Fahrwerk und Assistenzsystem ganzheitlich im Gesamtsystem Fahrzeug zu untersuchen und zu optimieren.

## Literatur

- [1] Bernhard Schick, Rolf Büttner, Klaus Baltruschat, Günther Meier, Heiko Jakob, TÜV SÜD Automotive GmbH: Bewertung von Funktion und Güte von Fahrerassistenzsystemen bei aktivem Bremsengriff. ATZ 2007-05
- [2] Udo Steininger, Marcus Rau, Bernhard Schick, TÜV SÜD Automotive GmbH: Fahrerassistenzsysteme im Spannungsfeld zwischen Nutzen und Risiken. Wie werden komplexe Fehlerstrukturen beherrschbarer? Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme 2006, München
- [3] Dr. Jürgen Schwarz, DaimlerChrysler AG: RESPONSE 3 - Code of Practice for development, validation and market introduction of ADAS. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme 2006, München
- [4] Bernhard Schick, Steffen Witschaß, TÜV SÜD Automotive GmbH: High-Resolution Road Surface Data and Tire Measurements for Vehicle Dynamics Simulation. CarMaker User Conference 2006, Karlsruhe

## **SIMULATION METHODS TO EVALUATE AND VERIFY FUNCTIONS, QUALITY AND SAFETY OF DRIVER ASSISTANCE SYSTEMS IN THE CONTINUOUS MIL, SIL, AND HIL PROCESS**

Bernhard Schick, Josef Henning, Uwe Wurster, Birgit Klein-Ridder

IPG Automotive GmbH  
Bannwaldallee 60  
76185 D-Karlsruhe

### **Keywords**

Active Safety, Driver Assistance Systems, MIL, SIL, HIL Simulation, Vehicle Dynamics Simulation

### **Summary**

Driver assistance systems provide an enormous potential for the improvement of active safety. However, between the poles of usefulness and risks [1]: the complexity and the requirements of the system development are very high. Not only the security concept but also the reliability of functions during a multitude of possible scenarios arising from the interactions of the driver, vehicle, driving situation and road conditions pose great challenges. For the function development and verification, especially of security-relevant functions, a seamless method and tool chain for simulation and test driving is essential. The functions of the systems must be evaluated, optimized, and assured during all phases of the V development process in test cases and scenarios that are as realistic as possible. In spite of strong efforts to develop processes for the analysis and evaluation of driver assistance systems, for example with respect to functional safety [2] or human behavior and expectations [3], significant gaps currently exist in the development process. A seamless method and tool chain still has to be established and standards have to be set in this relatively new working area.

The present paper will show simulation and evaluation methods as well as tools that allow the engineer to simulate realistic scenarios in the simulation for testing driver assistance systems for lateral dynamics control. Using them, functions, failures, failsafe methods, security functions and the performance of the systems can be analyzed and evaluated comprehensively. A test and evaluation catalog that has been developed by TÜV SÜD Automotive from real driving tests [1] (figure 1) provided the basis for the development of these methods. This has been optimized, enlarged and integrated into the simulation software CarMaker from IPG Automotive. To represent the test scenarios, the traffic functionality of this vehicle dynamics program (figure 2/3) has been used. Arbitrary traffic situations with stationary and moving obstacles can be simulated in this way.

CarMaker offers direct variable access (DVA) to almost all model parameters that can be programmed freely with ScriptControl. Thus, any amount of test vectors, cases, scenarios, configurations and variants could be reproduced and represented effectively in a full test

automation process. In contrast to the driving tests the test catalog could be enlarged and improved especially for security relevant and risky scenarios.

On the basis of methods and fundamentals of vehicle dynamics the relative vehicle moving quantities were analyzed and aggregated to qualifiable characteristic values. For this, the quantities have been automatically generated in a post processing process and the corresponding graphics and reports have been created (figure 4).

The new method and tool chain enables a continuous process for the development of driver assistance systems. Control and system models can be integrated in the simulation environment (“MIL – model-in-the-loop”) and analyzed in an early development phase. In later steps the compiled software code can be verified (“SIL – software-in-the-loop”) and the software integration in the electronic control unit (ECU) can be tested in an enlarged real-time capable “HIL – hardware-in-the-loop” environment (integration stage 1). The final verification and validation is performed in the highest integration stage - in the driving test like it has been developed by TÜV SÜD Automotive [1].

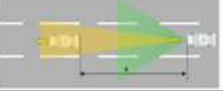
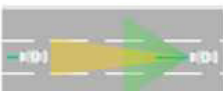
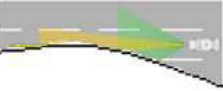
Manöver	Grafik	Beschreibung		Bewertung
		Leadfahrzeug	Testfahrzeug	
Abstand Stationär		Konstantfahrt: 50, 80, 100, 120, 130, 140, 160, 180 km/h		Abstände - Relativ zum gesetzlichen Sicherheitsabstand
Auffahren auf Kolonne		Konstantfahrt mit 100 km/h	Konstantfahrt: 120, 140, 160, 180 km/h auf	- Reaktionsab- stand, - minimaler Abstand - Verzögerung - Harmonie der - Bremsung - Rückmeldung Fahrer
Fahren in Kolonne		Beschleunigung von 80 – 100 km/h in 2 Beschleunigung	Konstantfahrt: Tempomat- einstellung 120 km/h	- Reaktionszeit, - maximaler Abstand, Beschleunigung

Figure 1: Extract from the test catalog [1]



Figure 2/3: Real and simulated test scenario „Changing lane into a convoy“

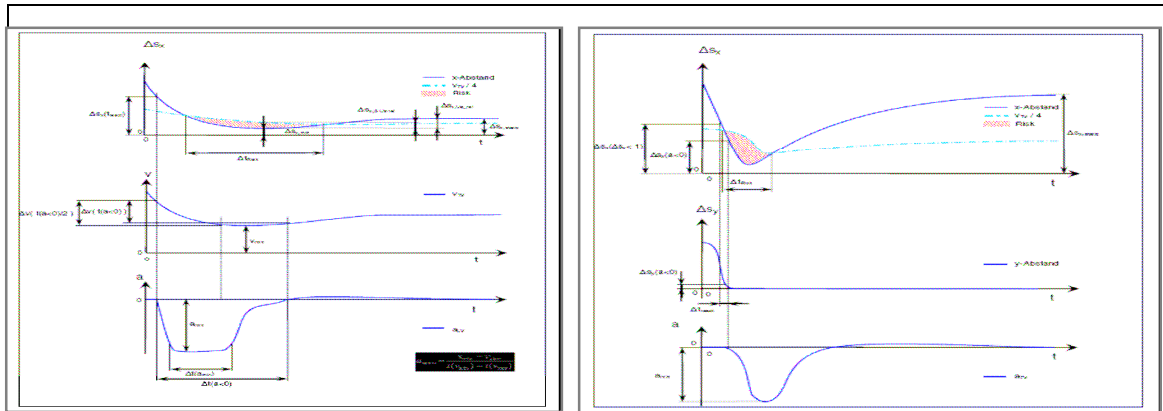


Figure 4: Example analysis code of characteristic values (tailgating maneuver)

## Literature

- [1] Bernhard Schick, Rolf Büttner, Klaus Baltruschat, Günther Meier, Heiko Jakob, TÜV SÜD Automotive GmbH: Bewertung von Funktion und Güte von Fahrerassistenzsystemen bei aktivem Bremsengriff. ATZ 2007-05
- [2] Udo Steininger, Marcus Rau, Bernhard Schick, TÜV SÜD Automotive GmbH: Fahrerassistenzsysteme im Spannungsfeld zwischen Nutzen und Risiken. Wie werden komplexe Fehlerstrukturen beherrschbarer? Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme 2006, München
- [3] Dr. Jürgen Schwarz, DaimlerChrysler AG: RESPONSE 3 - Code of Practice for development, validation and market introduction of ADAS. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme 2006, München
- [4] Bernhard Schick, Steffen Witschaß, TÜV SÜD Automotive GmbH: High-Resolution Road Surface Data and Tire Measurements for Vehicle Dynamics Simulation. CarMaker User Conference 2006, Karlsruhe