



Virtuelles Testen von Software-Stacks für automatisierte Fahrzeuge

AUTOR



Martin Herrmann, M. Sc.
ist Business Development Manager
für ADAS und Automated Driving
bei der IPG Automotive GmbH
in Karlsruhe.

Der korrekte Betrieb von automatisierten Fahrfunktionen lässt sich nicht im öffentlichen Straßenverkehr nachweisen, da die dafür benötigten Szenarien dort nicht oder nur sehr selten auftreten. Mit dem virtuellen Fahrversuch stellt IPG Automotive eine Lösung vor, die den Test von Software-Stacks automatisierter Fahrzeuge ermöglicht und auf den Ergebnissen der Pegasus-Projekte basiert.

■ Es ist inzwischen anerkannt, dass es – in einem angemessenen Umfang – nicht möglich ist, automatisierte Fahrfunktionen allein im realen Fahrversuch zu testen und zu validieren. Die dafür benötigten kritischen Szenarien sind nicht oder nur sehr selten im realen Straßenverkehr anzutreffen beziehungsweise abzubilden und können eine Gefahr für Mensch und Material darstellen. Hinzu

kommt, dass die Szenarien in der Realität nicht exakt reproduzierbar sind, was vergleichbare Testergebnisse unmöglich macht.

Als Lösung bietet sich der virtuelle Fahrversuch an. Mit einer Simulationsplattform wie CarMaker von IPG Automotive gibt es die Möglichkeit, Software-Stacks von automatisierten Fahrzeugen (Automated Vehicles, AVs) durch sze-



narienbasiertes Testen zu verbessern. Hierbei handelt es sich also um den Software-Anteil der Fahrfunktionen, die es in einer Vielzahl relevanter Szenarien abzusichern gilt.

SZENARIENBASIERTES TESTEN

Das szenarienbasierte Testen stellt eine Testmethode für den virtuellen Fahrversuch dar, die durch die Projekte der Pegasus-Familie etabliert wurde. In der Simulation leistet diese Methode einen essenziellen Beitrag zur Reduzierung des Testaufwands, indem hauptsächlich die für die Fahrfunktion relevanten Szenarien untersucht werden, anstatt eine gewisse Anzahl benötigter Testkilometer festzulegen [1]. Ein Großteil der Szenarien kann simuliert werden, während nur noch wenige Tests auf dem Prüfgelände beziehungsweise im Feld durchgeführt werden müssen. Die verbleibenden realen Fahrversuche dienen vor allem der Validierung der Simulationsergebnisse. Dabei wird stets eine Durchgängigkeit von der Simulation bis zu den Prüfgelände- und Feldtests gewährleistet.

Für die hier vorgestellte Testmethode wird ein digitaler Zwilling des realen Prototyps eingesetzt: der virtuelle Prototyp. Er verfügt über Modelle aller relevanten (Sub-)Systeme des realen Fahrzeugs. Die Grundlage für das Modell des automatisierten Pkws bildet ein validier-

tes Fahrdynamikmodell, das die Lenk- und Beschleunigungsanforderungen der Fahrfunktion in Bewegungen umsetzt. Fahrzustände nahe dem physikalischen Grenzbereich stellen besonders hohe Anforderungen an die Modellierungsqualität. Vor allem beim Test der Bewegungsregelung ist ein realistisches Fahrzeugmodell wichtig. Ergänzt wird das Fahrzeugmodell durch verschiedene Sensormodelle von Zulieferern. Deren Integration soll durch Standardisierungsaktivitäten, etwa Open Simulation Interface (OSI) [2], erleichtert werden.

Die Verkehrssituationen oder Testszenarien lassen sich in sechs Ebenen unterteilen, **BILD 1**. Diese können statisch oder dynamisch sein und darüber hinaus digitale Informationen enthalten. Die erste Ebene, die Straße, enthält die grundlegenden Elemente wie den Straßenverlauf und die Anzahl der Fahrspuren. Die zweite Ebene, die Straßenausstattung, beschreibt die Straßeninfrastruktur und stationäre Objekte. Die dritte Ebene umfasst temporäre Beeinflussungen des Szenarios, etwa durch eine Baustelle. In der vierten Ebene werden bewegliche Objekte wie andere Verkehrsteilnehmer definiert. Die Umweltbedingungen wie Regen werden in der fünften Ebene festgelegt. Abschließend folgen digitale Informationen wie V2X-Informationen oder eine Karte in der sechsten Ebene [3].

Straße (E1)	Straßenausstattung (E2)	Temporäre Beeinflussung von E1 und E2 (E3)	Bewegliche Objekte (E4)	Umweltbedingungen (E5)	Digitale Information (E6)
Fahrstreifen	Zulässige Höchstgeschwindigkeit	Baustellen	Lkw	Umweltyp	V2X-Informationen
Breite	Höchstgeschwindigkeit	Temporäre Straßenmarkierungen	Masse	Wettertyp	Digitale Karte
Reibwert	Longitudinale Position des Verkehrszeichens	Baustellenschilder	Abmessungen	Tageszeit	
Kurve		Behinderungen	Pkw		
Krümmung		Verdeckte Straßenmarkierungen	Masse		
		Gegenstände auf der Straße	Abmessungen		

BILD 1 Ebenen E1 bis E6 im Szenarienmodell (© IPG Automotive)

Wenn die Simulationsplattform diese Ebenen realitätsnah abbilden kann, liegt die Hauptaufgabe in der Entwicklung einer effizienten Methode zur Generierung relevanter Testszenarien. Dabei wird zwischen logischen und konkreten Varianten differenziert. Logische Szenarien werden abstrakt beschrieben, beispielsweise über Manöverabfolgen wie Spurwechsel oder Beschleunigungen. Dabei wird jedoch keine konkrete Ausprägung von Parametern wie Geschwindigkeitsangaben oder Abstände festgelegt. Diese Parameter werden über Bereiche mit Minimal- und Maximalwerten angegeben.

Für konkrete Szenarien werden aus diesen Bereichen einzelne Werte herausgegriffen, sodass die Eigenschaften eindeutig vorgegeben sind. So wird der Aufwand der Szenariengenerierung reduziert, da aus einem logischen eine Vielzahl konkreter Szenarien abgeleitet werden kann.

FUNKTIONSBeschreibung

Wie der reale Fahrversuch muss auch die Simulation vorbereitet werden, um präzise Ergebnisse und eine ausreichende Testraumabdeckung zu erzielen. Bevor ein Software-Stack für AVs simulativ getestet werden kann, muss dessen Integration in die Simulation erfolgen. Das

Stack setzt sich aus mehreren Modulen zusammen, **BILD 2**.

Im ersten Modul erfolgt die Wahrnehmung der Umwelt über Sensoren (insbesondere Kamera, Radar, Lidar und GPS) sowie die Lokalisierung durch HD-Karten und gegebenenfalls V2X-Funktionen. Durch einen Abgleich der Sensordaten mit Informationen aus den HD-Karten ist es möglich, die eigene Position auf wenige Zentimeter genau zu erfassen und so das generierte Umfeldmodell präzise auf der Karte zu verorten.

Im Anschluss findet im zweiten und dritten Modul die Entscheidungsfindung (Prädiktion) und die Trajektorienplanung auf Basis der Navigationsaufgabe, der Fahraufgabe und des erzeugten Umfeldmodells statt. Anschließend erfolgt die Berechnung der nötigen Entscheidungen wie die Wahl der Fahrspur oder Abbiege manöver. Auf Basis der Verkehrssituation wird eine Trajektorien- und Geschwindigkeitsplanung durchgeführt, die Zielgrößen wie Sicherheit, Komfort und Energieeffizienz optimieren soll.

Abschließend wird im vierten Modul die erzeugte Zieltrajektorie möglichst präzise umgesetzt. Die Bewegungsregelung berechnet eine sinnvolle Verteilung der Stellgrößen auf die verschiedenen Aktuatoren – hauptsächlich Antriebs- und Brems- sowie Lenkungsfunktionen. Ergänzend können von diesem Modul

Informationen über den Beladungs zustand oder die Fahrbahnbeschaffenheit ermittelt und an das Planungsmodul zurückgespielt werden. Damit wird vermieden, dass bei bestimmten Umwelt einflüssen wie Regen physikalisch kritische Zieltrajektorien erzeugt werden.

EINBINDUNG IN DIE SIMULATION

Um einen Regelkreis herzustellen, ergeben sich je nach Testfokus unterschiedliche Eingangs- und Ausgangsschnittstellen, die von der Simulation befüllt und ausgelesen werden müssen. Der End-to-End- beziehungsweise Gesamtsystemtest kommt dem Fahrversuch auf der realen Straße am nächsten. Die Sensoren erzeugen dabei die Rohdaten (Kamerabilder, Lidarpunktwolken etc.) für die Eingangsschnittstelle. An der Ausgangsschnittstelle wiederum werden Lenkmoment- und Beschleunigungsanforderungen beziehungsweise die Fahrrpedal- und Bremspedalstellung bereitgestellt. Falls im Test ein Fehler auftritt, können jedoch nur bedingt Rückschlüsse auf dessen Ursprung gezogen werden, da der gesamte Bereich zwischen Ein- und Ausgangsschnittstelle als Fehlerquelle infrage kommt.

Eine weitere Testmethode ist die funktionale Dekomposition [1]. Mit ihr können bei Test und Absicherung automatisierter Fahrfunktionen einzelne Module isoliert

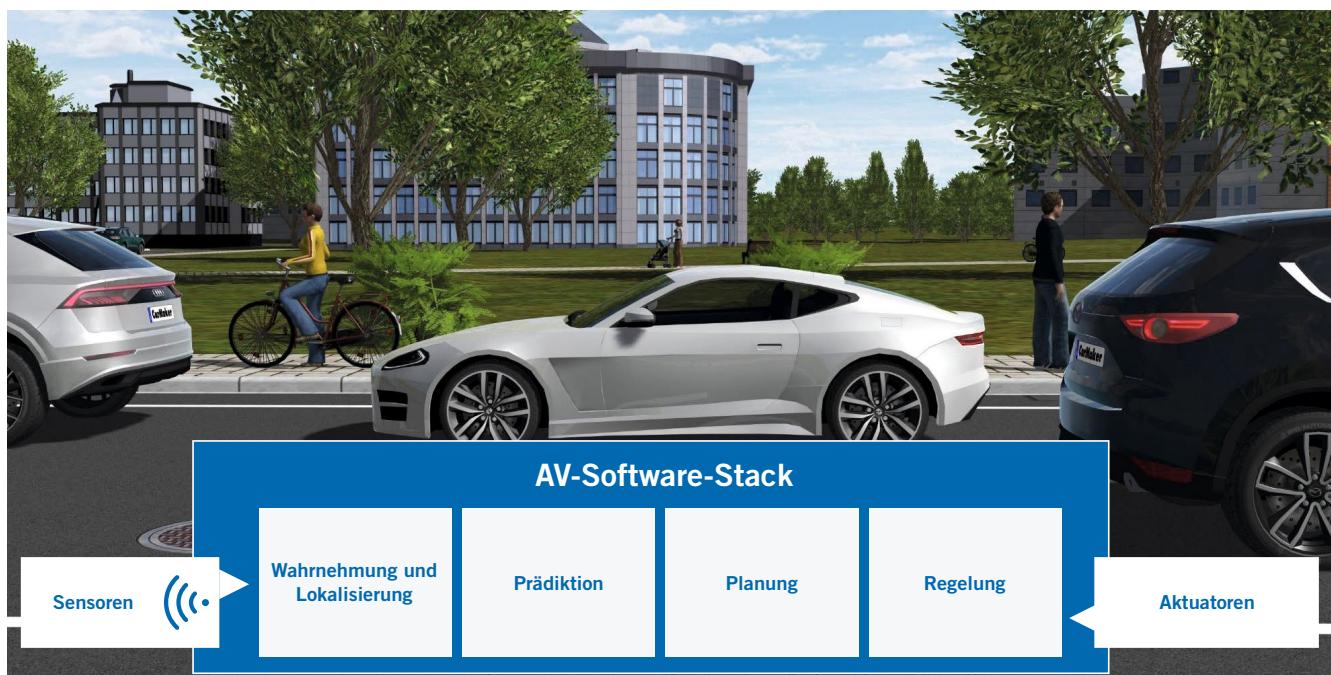


BILD 2 Schematische Darstellung des Software-Stacks für automatisierte Fahrzeuge mit vier Modulen (© IPG Automotive)

Parameter (Auszug/Beispiel)	Ebene im Szenarienmodell	Wahrnehmung	Trajektorienplanung	Bewegungsregelung	Gesamtsystem (End-to-End)
Kurvenkrümmung	1	X	X	X	X
Ampeln	2	X	X	-	X
Geschwindigkeitsverkehrszeichen	2	X	X	-	X
Randbebauung und Vegetation	2	X	-	-	X
Gegenstand auf der Straße	3	X	X	-	X
Beladungszustand	4	X	X	X	X
Abstände zu anderen Fahrzeugen	4	X	X	-	X
Fahrzeugfarbe	4	X	-	-	X
Tageszeit	5	X	-	-	X
Reibwert	5	-	-	X	X
Wunschgeschwindigkeit	6	-	X	X	X

TABELLE 1 Gegenüberstellung beispielhafter Parameter und ihr Einfluss auf das zu testende System (© IPG Automotive)

untersucht werden, wodurch eine Reduktion der relevanten Parameter in der Szenarienbeschreibung ermöglicht wird. Je nach Einsatzgebiet ergeben sich unterschiedliche Anforderungen, die in einigen Aspekten Vereinfachungen zulassen. Insbesondere die detaillierte Modellierung der statischen Umgebung ist für den Test von Trajektorienplanung und Bewegungsregelung vernachlässigbar, **TABELLE 1**. Die Identifikation von Fehlerquellen ist auf diese Weise deutlich einfacher: Es kann direkt in dem Wahrnehmungsmodul überprüft werden, ob sie fehlerfrei arbeitet, indem das Wissen über die detektierbaren Objekte („Ground Truth“) mit den tatsächlichen Detektionen abgeglichen wird. Dies gilt ebenfalls für andere Bereiche – etwa den Test verschiedener Trajektorien für die Bewegungsregelung, bei dem es sofort ersichtlich wäre, wenn die Trajektorien nicht wie gewünscht abgefahren würden.

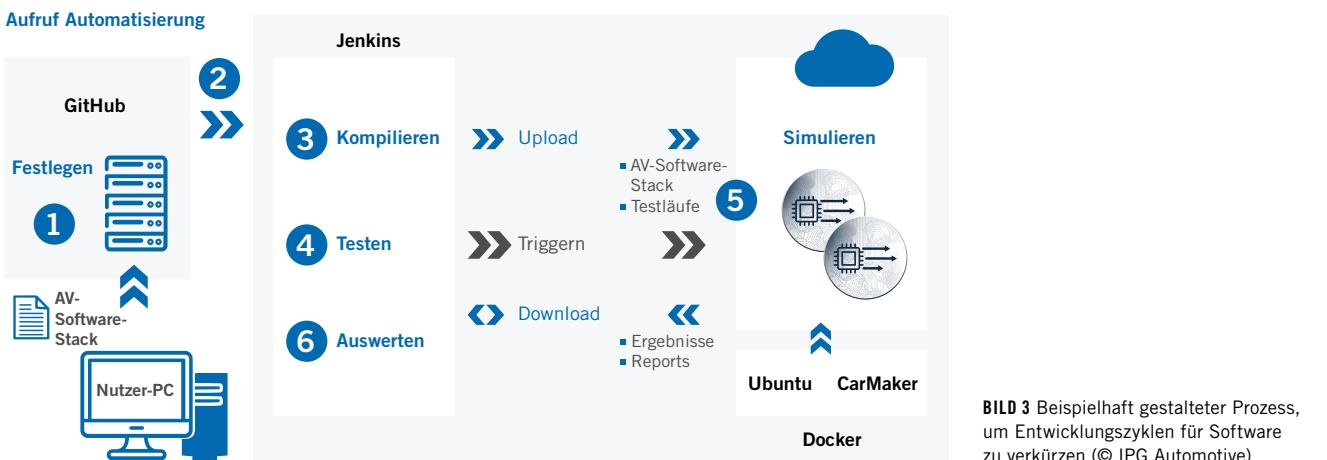
Eine weitere Einschränkung der zu untersuchenden Parameter und ihrer Räume kann durch die Definition der sogenannten Operational Design Domain (ODD) erfolgen. In dieser Domäne wird vorab festgelegt, unter welchen Bedingungen das System fehlerfrei funktionieren muss. Wenn die ODD auf Autobahnen beschränkt ist, muss das System beispielsweise keine Kreuzungen, Ampeln etc. berücksichtigen. Als Basis für die Definition dient die Anforderungsliste – das Lastenheft – der Funktion. Dort sind örtliche Gegebenheiten wie Fahrbahnbeschaffenheit und andere Verkehrsteilnehmer oder auch Vorgaben wie Geschwindigkeitsbereiche sowie Übergaben des Systems an den Fahrer definiert. Wichtig dabei ist, dass auch das Verlassen und Einfahren in die definierte ODD getestet werden muss, beispielsweise für nötige Fahrerübergaben oder -übernahmen.

Sobald die technischen Voraussetzungen für den Test einer großen Szenarienanzahl erfüllt sind, folgt die Definition, wie feingranular die Parameter und ihre Kombinationen getestet werden müssen. Da die Anzahl der Parameterabstufungen den Testaufwand für vollfaktorielle Tests exponentiell erhöht, sind effiziente Methoden zur Parameterraum-Untersuchung sowie zur Durchführung vieler Tests in kürzester Zeit nötig.

AGILE SOFTWAREENTWICKLUNG

Die Ursache für die derzeitige Transformation der Entwicklungsprozesse in der Automobilindustrie hin zu agilem Arbeiten ist der Wunsch, während eines Produktlebenszyklus mehrere Softwareupdates drahtlos (over-the-air, OTA) veröffentlichen zu können. Die Softwareentwicklungszyklen verkürzen sich dadurch drastisch. Beispiel-





haft gestaltet sich der Prozess folgendermaßen, **BILD 3**: Das Softwareentwicklungsteam pflegt am Ende eines Arbeitstags den verbesserten Code in die Versionsverwaltung ein. Ein Automatisierungsserver wie Jenkins kompiliert daraufhin den neuen Softwarestand und führt anschließend Modul- oder Systemtests in der Gesamtfahrzeugsimulation durch. Es wird eine Liste durchzuführender Testfälle generiert und auf der präferierten Computing-Plattform verteilt. Im besten Fall werden sämtliche Tests über Nacht durchgeführt, sodass am nächsten Morgen die Ergebnisse und automatisch generierte Berichte vorliegen.

Es bestehen diverse Möglichkeiten für die Skalierung der Simulation, um kürzere Testzyklen zu gestalten. Zur Erzielung der

maximalen Leistung kann CarMaker mit Hilfe von Hochleistungsrechen-Clustern (High-Performance Computing, HPC) – lokal oder in der Cloud – viele Prozesse parallel berechnen. Dafür besteht zum einen die Möglichkeit der Verwendung mehrerer GPUs für einen virtuellen Prototyp, um auch bei einer großen Anzahl detaillierter Sensormodelle die Echtzeitfähigkeit für HiL-Tests zu gewährleisten. Zum anderen kann die Parallelisierung auf Ebene des einzelnen Fahrversuchs erfolgen: Wie in der Realität wird dabei mit einer großen Anzahl (virtueller) Prototypen parallel getestet, um möglichst viele Daten in kurzer Zeit zu sammeln. Diese Methode bietet eine nahezu perfekte Skalierung und ist ein geeigneter Ansatz für große Testkataloge und viele Testkilometer. Dabei ist zu beachten, dass in der

Regel nur Wahrnehmungs- und Lokalisierungstests GPU-basierte Sensormodelle und detaillierte 3-D-Welten benötigen. Entsprechend gestalten sich die Hardwareanforderungen für die Ausführung der Simulation in HPC- und Cloud-Umgebungen. Tests der Planungsfunktion und Bewegungsregelung können in der Regel ohne GPU-Unterstützung erfolgen, da sie üblicherweise Informationen auf der Objektenebene verarbeiten, wie sie von dem Wahrnehmungsmodul geliefert werden. Objektlisten können von der Simulationsplattform mit vereinfachten, phänomenologischen Modellen oder idealen Modellen effizient bereitgestellt werden.

Sobald die Software wie gewünscht arbeitet, kann automatisiert der sogenannte Deployment-Schritt durchgeführt werden: Der neue Softwarestand wird

VISIONEN. ENTWICKLUNG. MOBILITÄT.

Die Welt der Mobilität verändert sich – die Herausforderung der Automobilentwicklung ist das Wissen von morgen mit Blick auf Technologien von übermorgen. Die Komplexität des Mobilitätswandels erfordert wegweisende Lösungen für den Transformationsprozess. ATZelektronik bietet hochaktuelle Informationen aus dem gesamten Spektrum der Automobilelektronik. Nutzen Sie zusätzlich zu den Printausgaben das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der einzigartigen **Wissensdatenbank des Onlinearchivs mit pdf-Download**.

ATZ elektronik

www.mein-fachwissen.de/ATZelektronik



dabei OTA an die Fahrzeugflotte im Feld verteilt. Während der Nutzung werden stetig neue Erkenntnisse gewonnen, die wiederum in die Weiterentwicklung des Systems einfließen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es noch keinen einheitlichen und allgemein akzeptierten Prozess, um Systeme des automatisierten Fahrens abzusichern. Die noch bis vor Kurzem existierenden technischen Hürden für die Computersimulation sind mittlerweile jedoch für große Teile der Parameterräume überwunden. Die Grenze dessen, was mithilfe der Simulation geleistet werden kann, verschiebt sich immer weiter. CarMaker als offene Integrations- und Testplattform verfügt über alle nötigen Werkzeuge, die für die effiziente Durchführung von virtuellen Fahrversuchen mit automatisierten Fahrfunktionen nötig sind.

Das Hauptaugenmerk für die weitere Virtualisierung des Entwicklungsprozesses liegt daher immer mehr auf dem Bereich der Methodik. Die Testumfänge und die Anzahl relevanter Parameter sind so groß, dass keine vollfaktoriellen Versuchspläne mehr in ausreichend kurzer Zeit durchgeführt werden können. Vielmehr sind intelligente Strategien bei der Untersuchung der Parameterräume nötig, um die Abdeckung des Testraums zu gewährleisten und zu Sicherheitsaussagen zu kommen. Für eine allgemein akzeptierte Sicherheitsaussage zu automatisierten Fahrfunktionen ist zudem ein einheitliches Verständnis über die Nutzung der Simulation in der Industrie vonnöten. Die derzeit aktiven Forschungsprojekte der Pegasus-Familie SET Level [4] und VVM [5] werden weitere Antworten auf diese Fragestellungen liefern.

LITERATURHINWEISE

- [1] DLR (Hrsg.): Pegasus Method. An Overview. Online: https://www.pegasusprojekt.de/files/tmp/1_Pegasus-Abschlussveranstaltung/Pegasus-Gesamtmethoden.pdf, aufgerufen: 21. Mai 2021
- [2] Asam e. V. (Hrsg.): OSI Open Simulation Interface. Online: <https://www.asam.net/standards/detail/osi/>, aufgerufen: 20. Mai 2021
- [3] Babschik, G.; Menzel, T.; Maurer, M.: Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles. In: Tagungsband, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Changshu, S. 1813-1820, 26.-30. Juni 2018
- [4] DLR (Hrsg.): SET Level. Die Sicherheit des automatisierten Fahrens. Online: <https://setlevel.de>, aufgerufen: 21. Mai 2021
- [5] EICT GmbH (Hrsg.): Verifikations- und Validierungsmethoden automatisierter Fahrzeuge im urbanen Umfeld. VVM-Projekt. Online: <https://www.vvm-projekt.de>, aufgerufen: 21. Mai 2021



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.atz-worldwide.com

UTAC

FRANCE
UNITED KINGDOM
USA
FINLAND
MOROCCO
GERMANY
CHINA
JAPAN
RUSSIA
KOREA



Leading international group in vehicle testing, homologation and emerging technologies for autonomous, connected and electric vehicles.

Visit us at IAA hall B3 booth A20

14 locations and proving grounds around the world:
France | UK | USA | Finland | Morocco (opening soon) | Germany | China | Japan | Russia | Korea