



## AUTOR



**Martin Herrmann**

ist Business Development Manager ADAS and Automated Driving bei der IPG Automotive GmbH in Karlsruhe.

Um die funktionale Sicherheit von automatisierten Fahrfunktionen sicherzustellen, sind sehr viele Tests notwendig. Vor allem die mögliche Anzahl verschiedener Szenarien, in denen die Fahrfunktionen fehlerfrei arbeiten müssen, ist herausfordernd. IPG Automotive beschreibt einen möglichen Lösungsweg, der auf dem konsequenten Einsatz des virtuellen Fahrversuchs in Kombination mit High-Performance Computing basiert.

Für den hohen Testaufwand automatisierter Fahrfunktionen existieren verschiedene Haupttreiber – beispielsweise extrem hohe Anforderungen, um die funktionale Sicherheit gewährleisten zu können (ASIL D nach ISO 26262 [1]). Um eine Zulassung zu erlangen, müssen automatisierte Fahrfunktionen grundsätzlich die höchstmögliche Sicherheitsstufe erfüllen, da von ihnen ein ernst zu nehmendes Risiko hinsichtlich lebensgefährlicher Verletzungen ausgehen kann.

Auch die Komplexität der Operational Design Domain (ODD) trägt maßgeblich zum gestiegenen Testaufwand bei, da sie die Anzahl der relevanten Testparameter massiv erhöht. Hier gilt die Regel: Je komplexer die geplante Zielanwendung, desto mehr unterschiedliche Situationen können während des Betriebs auftreten. Um die Absicherung aller potenziell auftretenden Situationen zu ermöglichen, steigt sich der Testaufwand exponentiell mit jedem zusätzlichen Einflussfaktor in der ODD, **BILD 1**.

# Parallelisierte Simulation automatisierter Fahrfunktionen



Die Sicherheitsanforderungen und die Komplexität der ODD führen so automatisch zu einer enorm hohen Systemkomplexität. Beispielsweise werden für Perzeptionssysteme – die zu jeder Tageszeit und unter allen Wetterbedingungen robust funktionieren müssen – über 20 am Fahrzeug verbaute Sensoren benötigt. Die automatisierte Fahrfunktion muss entsprechend in der Lage sein, große Datenmengen aus diversen Quellen zu verarbeiten und verlässlich zu bewerten. Aufbauend auf diesen Daten werden im Anschluss Entscheidungen getroffen, die auch im Mischverkehr, also einer Kombination aus nicht-automatisierten und automatisierten Fahrzeugen, zu keinen gefährlichen Situationen führen dürfen. Für den Fall, dass eine Komponente fehlerhaft arbeitet, muss sichergestellt werden, dass das Fahrzeug in einen Zustand mit minimalem Risiko überführt wird. In vielen Fällen ist dies der Stillstand am Fahrbahnrand.

Die genannten Herausforderungen führen dazu, dass die Entwicklung ent-

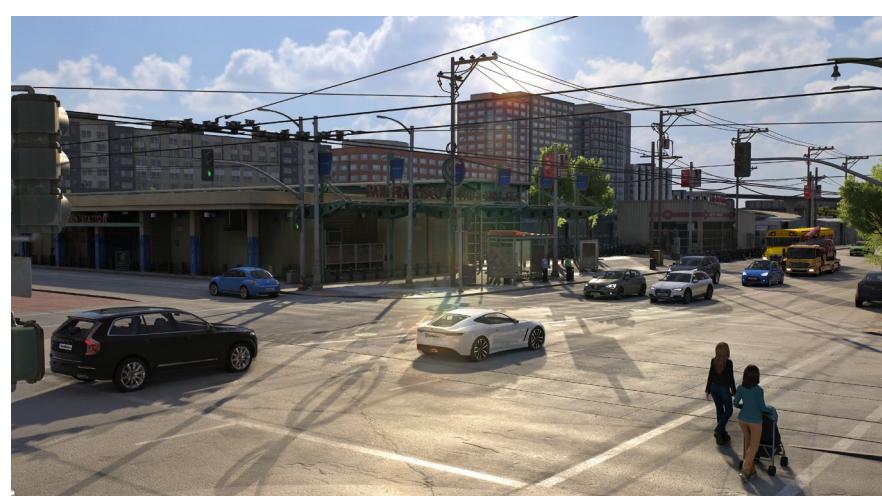
sprechender Funktionen im realen Fahrversuch nur stark eingeschränkt umsetzbar ist. Mithilfe von Simulationsmethoden hingegen ist es möglich, Fahrfunktionen in allen vorstellbaren Szenarien zu testen und abzusichern. Da softwaredefinierte Fahrzeuge in den nächsten Jahren von immer größerer Bedeutung sein und auch automatisierte Fahrzeuge einen signifikanten Marktanteil aufweisen werden, **BILD 2**, steigt die Relevanz effizienter Entwicklungsprozesse unter Nutzung des virtuellen Fahrversuchs enorm.

## TESTUMGEBUNGEN FÜR AUTOMATISIERTE FAHRFUNKTIONEN

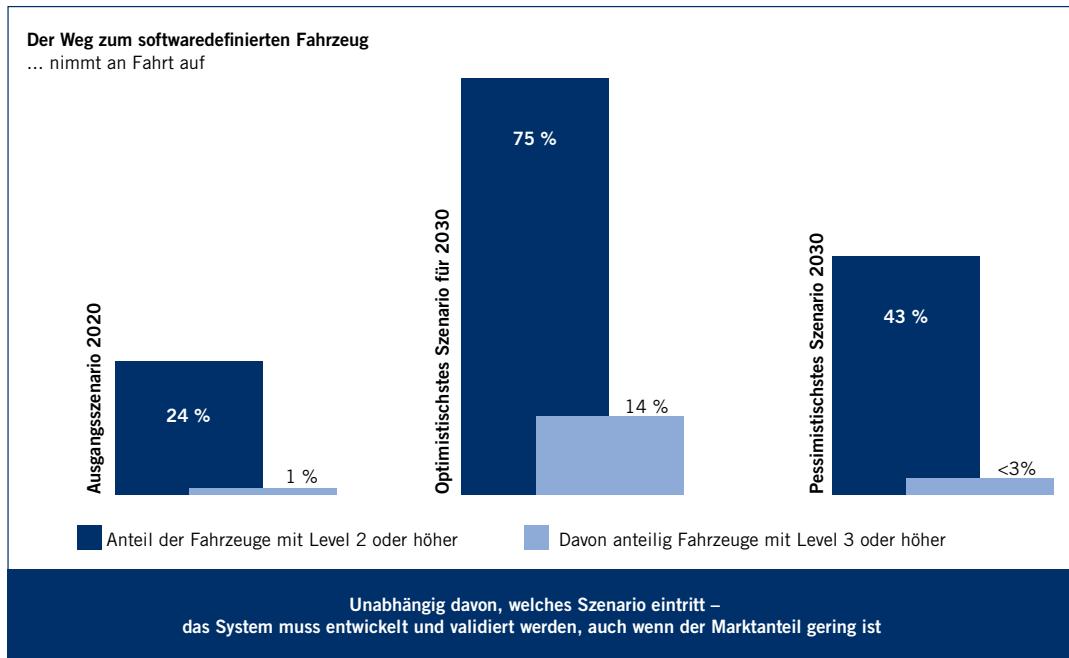
Um mithilfe der Simulation die Absicherung zu gewährleisten, ist ein durchgängiger Einsatz verschiedener Testumgebungen mit unterschiedlich großem Anteil realer Komponenten notwendig. Die Basis bilden rein virtuelle Testme-

thoden, die überwiegend in einer Closed-Loop-Simulation durchgeführt werden: Deren Bezeichnungen lauten Model-in-the-Loop (MiL) oder Software-in-the-Loop (SiL). Im Hinblick auf Perzeptestests wird in dieser Phase zusätzlich eine Open-Loop-Reprozessierung aufgezeichneter Daten vorgenommen, da die für die Perzeption herausfordernden Corner Cases nur eingeschränkt von Simulationstools generiert werden können.

Den nächsten Schritt zur Absicherung stellen Open-/Closed-Loop-Methoden mit realen Hardwarekomponenten dar, Hardware-in-the-Loop (HiL) genannt. Die Testmethoden, in denen zumindest teilweise virtuelle Komponenten zur Anwendung kommen, reichen bis hin zu Driver-in-the-Loop (DiL) und Vehicle-in-the-Loop (ViL). Bei diesen Methoden wird ein menschlicher Fahrer oder auch ein reales Fahrzeug in den Test integriert. Die darauf folgenden Prüfgelände- und Feldtests basieren vollständig auf realen Komponenten [3], **BILD 3**.



**BILD 1** Beispielhafte Operational Design Domain im komplexen urbanen Umfeld (© IPG Automotive)



Das szenarienbasierte Testen [4] ist dabei für den Gesamtsystemtest und für Tests ohne Perceptionslayer interessant, da sich das Verhalten von Entscheidungsfindung und Bewegungsregelung signifikant auf die weitere Entwicklung eines Szenarios auswirkt. Die Verwendung der Reprozessierung (Open Loop) eignet sich deshalb nur bedingt für Gesamtsystemtests und wird überwiegend für Perceptions- und Sensorsdatenfusionstests eingesetzt.

Sämtliche aufgeführten Testumgebungen leisten einen essenziellen Beitrag zur Sicherheitsargumentation und bringen jeweils verschiedene Vorteile, aber auch Limitierungen mit sich. Daher ist

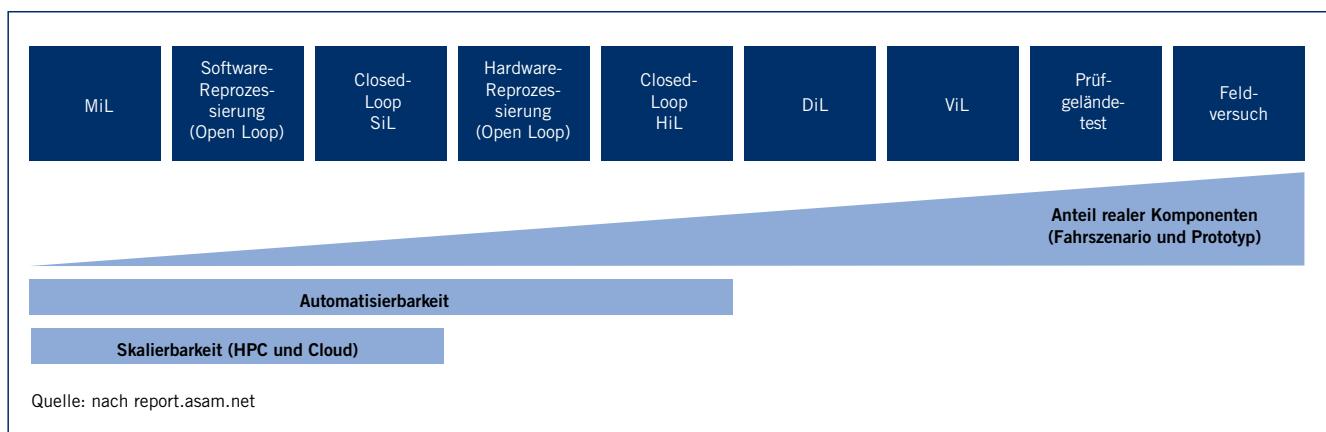
es wichtig, sie gezielt und korrekt einzusetzen. Testmethoden mit realem Hardwareanteil lassen sich etwa vergleichsweise schlecht skalieren, da die Testumgebungen sowie die Vorbereitung der Prototypen – beispielsweise in Laboren mit HiL-Prüfständen oder auf einem Prüfgelände – große Anforderungen an Platz, Zeit und Budget stellen. Darüber hinaus ist reale Hardware je nach Entwicklungsphase oft nur stark eingeschränkt verfügbar. Entsprechende Testmethoden bieten durch den höheren realen Hardwareanteil gleichzeitig allerdings eine größere Nähe zum realen Betrieb. Auf diese Weise ermöglichen sie andere Testschwerpunkte wie

den Test der Buskommunikation oder die Einspeisung elektrischer Fehler.

Rein virtuelle Methoden hingegen eignen sich besonders gut für große Testumfänge und bieten aufgrund der Unabhängigkeit von realen Komponenten die beste Skalierbarkeit.

## NOTWENDIGKEIT SKALIERBARER SIMULATIONSPLATTFORMEN

Der Einsatz von High-Performance Computing (HPC) ermöglicht die Generierung sehr vieler Ergebnisse in wirtschaftlich angemessener Zeit, **BILD 4**. Die Parallelisierung kann dabei vor Ort (On-prem) durch den Einsatz eines performanten



**BILD 3** Der Anteil realer Fahrzeugkomponenten an verschiedenen Testumgebungen (© IPG Automotive)

Rechenzentrums oder vernetzter Workstations erfolgen. Alternativ ist eine Parallelisierung in der Cloud möglich. Welche Methode die sinnvollste Option darstellt, wird maßgeblich von der bereits vorhandenen Infrastruktur beeinflusst.

Eine Parallelisierung On-prem findet vor allem dann Anwendung, wenn vor Ort ausreichende Rechenkapazitäten zur Verfügung stehen. Vorteilhaft ist dabei die vollumfängliche Kontrolle über die zur Verfügung stehende Infrastruktur sowie die Hoheit über sämtliche Daten. Eine geringere Flexibilität bei Lastspitzen sowie bei wechselnden Hardwareanforderungen kann sich hingegen nachteilig auswirken. Auch die Anschaffungs- und Wartungskosten können je nach Projektumfang beträchtlich sein.

Die Parallelisierung in der Cloud bietet in dieser Hinsicht mehrere Vorteile. Da es beim Test von autonomen Fahrfunktionen häufig zu Lastspitzen kommt – etwa während Regressionstests über Nacht – stellt die Cloud eine flexible Alternative dar. So können je nach Bedarf Rechenkapazitäten flexibel hinzugebucht und auch

wieder abgewählt werden. Das kann sich im Fall der Lastspitzen sowie bei wechselnden Hardwareanforderungen positiv auswirken. Darüber hinaus müssen für die Verwendung der Cloud keinerlei Anschaffungs- und Wartungskosten eingeplant werden, im Gegensatz dazu stehen allerdings geringfügig höhere Betriebskosten. In Bezug auf die Datensicherheit bieten viele Anbieter von Cloud-Lösungen hohe Sicherheitsstandards durch exklusiv buch- und nutzbare Hardware sowie Serverstandorte innerhalb der Europäischen Union.

Unabhängig von der verwendeten Infrastruktur kann eine skalierbare Durchführung von virtuellen Fahrversuchen einen großen Mehrwert für verschiedene Anwendungsszenarien liefern. Die wichtigsten Anwendungen werden nachfolgend dargestellt.

### BESCHLEUNIGUNG KOMPLEXER SIMULATIONSMODELLE

Im MiL-Bereich werden häufig sehr komplexe Simulationsmodelle verwendet, die

beispielsweise in Matlab Simulink entwickelt wurden. Diese Modelle erreichen aufgrund ihrer Komplexität häufig lediglich eine stark eingeschränkte Performance, weshalb mit ihnen nur verhältnismäßig langsam Ergebnisse generiert werden können. Darüber hinaus ist in frühen Entwicklungsstufen oft noch keine Zeit für die Optimierung der Modellperformance eingeplant, da in diesem Schritt vorerst andere Fragestellungen priorisiert werden.

Mithilfe einer automatischen Codegenerierung wird in der Regel eine leichte Performanceverbesserung erzielt. Das Niveau einer manuell optimierten Implementierung wird dabei allerdings nicht erreicht. Um etwa beim entwicklungsbegleitenden Testen und Debugging hinreichend schnell Ergebnisse ausgewählter Szenarien zu erzielen, ist der Einsatz der Parallelisierung zielführend. Indem Simulationsergebnisse deutlich schneller zur Verfügung stehen, kann die Arbeitszeit in einem größeren Umfang für die eigentlichen Entwicklungsaufgaben genutzt werden.

# AUTONOMOUS MOBILITY BEYOND MEASURE.

## PROVIDING CONNECTIONS FOR A BETTER FUTURE.

Mit unseren innovativen Lösungen im Bereich der LiDAR-Prüfung und in Kombination mit modernsten numerischen Berechnungstools schließen wir die Lücke zwischen der realen Welt und Simulation.

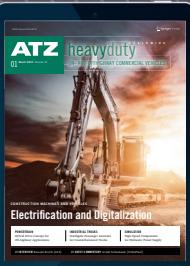
[horiba.com](http://horiba.com)



**HORIBA**  
Automotive

# THE BEST FOR YOUR TEAM. THE WORLD'S LEADING AUTOMOTIVE MAGAZINES IN ONE PACKAGE.

YOU  
GET:



WATCH OUR VIDEO AND GET TO LEARN MORE:

[www.atz-magazine.com/automotive-package](http://www.atz-magazine.com/automotive-package)

## ENTWICKLUNG AUTOMATISIERTES FAHREN

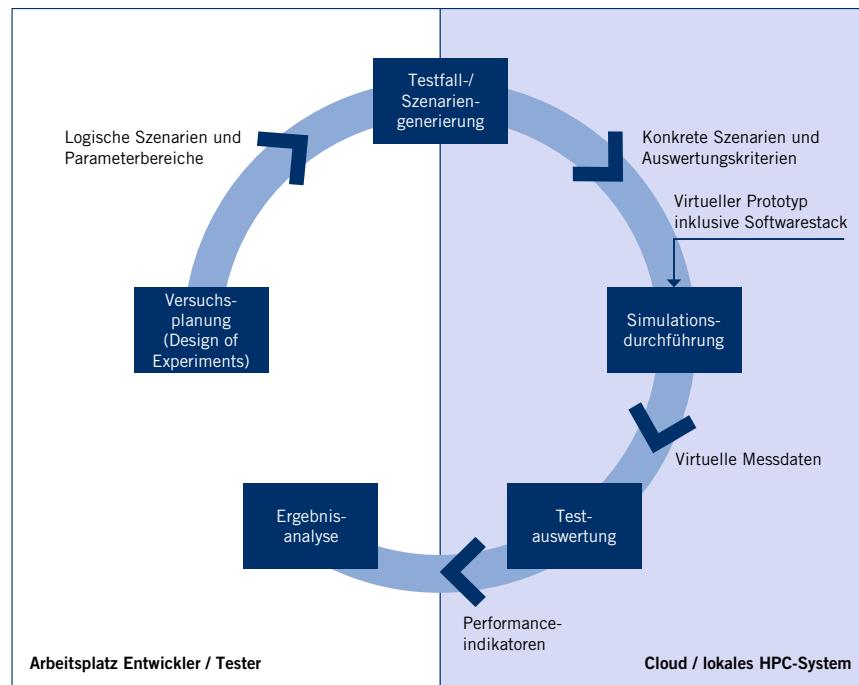


BILD 4 Prozessschritte bei skaliertener Ausführung und Auswertung der Simulation (© IPG Automotive)

### VERIFIKATION BASIEREND AUF TESTRAUMABDECKUNG

Sollen in begrenzter Zeit eine möglichst große Testraumabdeckung und damit ein möglichst großer Erkenntnisgewinn über das Systemverhalten erzielt werden, stellen intelligente Algorithmen zur Testfallgenerierung eine vielversprechende Lösung dar [5]. Diese erzeugen die durchzuführenden Simulationsszenarien während des Testdurchlaufs basierend auf der Definition der ODD und entsprechend festgelegter Kriterien zur Testraumabdeckung. Der Testumfang sowie die genaue Testausprägung sind vorab nicht bekannt. Ziel ist ein größtmöglicher Erkenntnisgewinn bei der Exploration des Testraums. Gleichzeitig wird eine Reduzierung des Testaufwands angestrebt, beispielsweise gegenüber vollfaktoriellen Versuchsplänen.

Einen exemplarischen Anwendungsfall stellen Einschersituationen mit unterschiedlichen Time-to-Collision (TTC)-Kennwerten dar, die das Fahrzeug absolvieren soll. Während der Szenariendefinition ist es kaum einschätzbar, welche Parameter vorab zur Erreichung einer bestimmten TTC gewählt werden müssen – das Verhalten der automatisierten Fahrfunktion hat einen unmittelbaren Einfluss auf den konkreten Ablauf

des Szenarios. Eine Optimierung der Parameter basierend auf den Ergebnissen der Szenarien, die bereits im gleichen Testlauf durchgeführt wurden, ermöglicht eine schnelle Abdeckung des gesamten TTC-Bereichs mit vorab definierter Auflösung. Durch den Einsatz von Parallelisierung kann die Abdeckung hochdimensionaler Testräume enorm gesteigert werden.

### REGRESSIONSTESTS ZUR VALIDIERUNG

Um aktuelle Softwareversionen (beispielsweise Daily Builds) zu testen und die agile Entwicklung von Fahrfunktionen zu ermöglichen, soll mithilfe von Continuous Integration, Testing und Deployment (CI/CT/CD) ein vorab definierter Testkatalog in kürzester Zeit absolviert werden.

Anfangs in der reinen Softwareentwicklung eingesetzt, findet CI/CT/CD zunehmend auch im Automotive-Umfeld Anwendung. Ursächlich hierfür ist vor allem der immens steigende Softwareanteil in modernen Fahrzeugen. Auf dem Weg zum sogenannten softwaredefinierten Fahrzeug steigt auch die Wichtigkeit von Over-the-Air-Updates. Damit diese effizient entwickelt werden können, bilden SiL-Simulationen sowie die entspre-

chenden CI/CT/CD-Frameworks die Basis für das regelmäßige Testen, beispielsweise über Nacht.

Die Prozessschritte sind automatisiert durchführbar: Ist in der Codebasis eine Aktualisierung erfolgt, wird der angepasste Code durch das Softwareentwicklungsteam in eine Versionsverwaltung eingepflegt. Ein Automatisierungsserver wie Jenkins erkennt dies und stößt die Kompilierung des neuen Softwarestands an. Im Anschluss wird der Softwarestack in den virtuellen Prototyp integriert. Nach Abschluss des Build-Prozesses werden automatisiert Modul- oder Systemtestfälle auf der Computing-Plattform verteilt und im Anschluss automatisiert mithilfe der Simulation ausgeführt. Die Durchführung der Testzyklen kann hier durch die bereits erwähnten Methoden drastisch beschleunigt werden.

Auf Basis der durchgeführten Tests werden für das Entwicklungsteam automatisch Reports oder Tickets generiert, die einen detaillierten Überblick über die Testergebnisse liefern. Die kontinuierliche Nutzung des identischen Testkatalogs erlaubt dabei einen sehr guten Vergleich des Verhaltens verschiedener Softwarestände.

## ZUSAMMENFASSUNG

Der virtuelle Fahrversuch und HPC sind Schlüsseltechnologien bei Entwicklung und Test des automatisierten Fahrens. Durch ihren konsequenten Einsatz können effiziente Entwicklungsprozesse und das systematische Auffinden von Sicherheitslücken gewährleistet werden. Entsprechend wichtig ist es, frühzeitig die hierfür notwendige Infrastruktur zu schaffen – sei es vor Ort oder in der Cloud.

## LITERATURHINWEISE

- [1] ISO 26262-2:2018: Road vehicles – Functional safety – Part 2: Management of functional safety. 2018
- [2] Doll, G.; Ebel, E.; Heineke, K.; Kellner, M.; Wiemuth, C.: Private autonomous vehicles: The other side of the robo-taxi story. Online: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/private-autonomous-vehicles-the-other-side-of-the-robo-taxi-story>, aufgerufen: 14. Juni 2022
- [3] ASAM Test Specification Study Group: Report 2022. Online: <https://report.asam.net/>, aufgerufen: 15. Juni 2022
- [4] Herrmann, M.: Virtuelles Testen von Software-Stacks für automatisierte Fahrzeuge. In: ATZ 123 (2021), Nr. 9, S. 36-40
- [5] Amid, G.: Coverage Driven Verification – Tying Together Simulation and Measurable Safety. DSC Europe VR, München, 2021



### READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: [www.atz-worldwide.com](http://www.atz-worldwide.com)



**Wir auch.**

**Deshalb haben wir auch die Wellenfeder erfunden.**

- Weniger Bauraum und weniger Gewicht
- Fachmännische Konstruktionsunterstützung
- Große Auswahl ab Lager
- Leicht anpassbar



**Crest-to-Crest® Wellenfedern**



**SMALLEY**

THE ENGINEER'S CHOICE®



IN DEUTSCHLAND VERTRETEN DURCH  
[tfcdeutschland.com](http://tfcdeutschland.com)

**Fordern Sie telefonisch +49 (0) 234 97849-011 oder auf unserer Website [smalley.com/de](http://smalley.com/de) kostenlose Muster an**