



© likehans | Shutterstock.com, | PG Automotive

## Entwicklung

# Virtuelle Erprobung: Schlüssel zu automatisierten Fahrfunktionen

Die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen verlangt Validierung und Absicherung auf höchstem Niveau. Wegen der Variantenvielfalt stoßen klassische Tests schnell an ihre Grenzen. IPG Automotive zeigt, wie Simulation funktionale Sicherheit, Robustheit und Effizienz im Entwicklungsprozess deutlich steigert.

**Martin Herrmann, Henning Kemper**

Die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen zählt zu den anspruchsvollsten Aufgaben der Branche. Ihr Schwierigkeitsgrad resultiert aus der enormen Vielfalt an Verkehrssituationen, die von einem automatisierten System mindestens so gut wie von einem menschlichen Fahrer bewältigt werden müssen. Reale Fahrversuche stoßen hier schnell an ihre Grenzen. Der Aufwand, Millionen von Testkilometern abzudecken, ist wirtschaftlich nicht

vertretbar. Gleichzeitig lassen sich Sicherheit und Robustheit automatisierter Systeme so nicht gewährleisten.

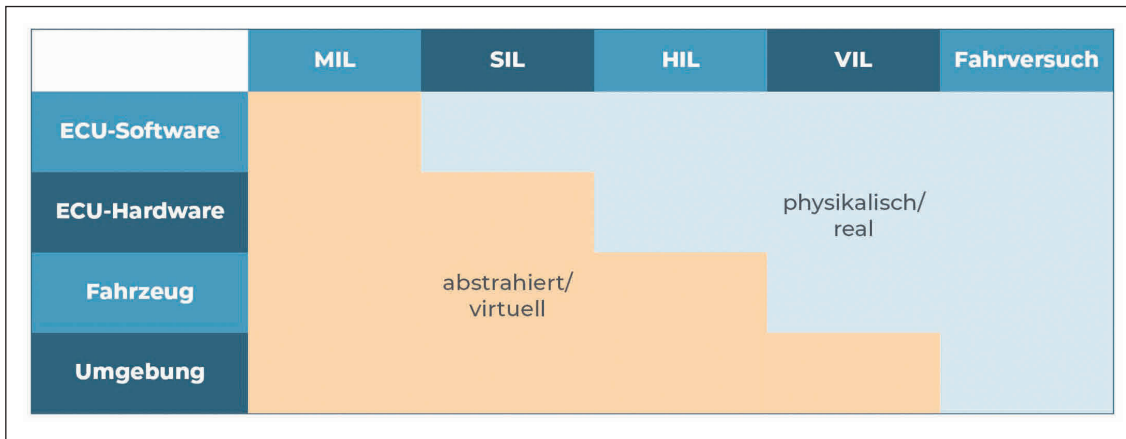
Die Komplexität der Aufgaben, die eine automatisierte Fahrfunktion in den Bereichen Umgebungswahrnehmung, Entscheidungsfindung und Bewegungsregelung bewältigen muss, macht deutlich: Für Entwicklung und Absicherung entsprechender Systeme sind leistungsfähigere Methoden erforderlich. In diesem Kontext etabliert sich die Simulation

als Schlüsseltechnologie. Sie ermöglicht skalierbare, reproduzierbare und risikofreie Tests – auch in sicherheitskritischen Situationen. Gleichzeitig steigert sie die Effizienz des Entwicklungsprozesses und bildet die Grundlage für eine systematische, wirtschaftliche Implementierung.

### Simulationsumgebungen

Im Entwicklungsprozess automatisierter Fahrfunktionen kommen abgestufte

**Bild 1: Reale und virtuelle Komponenten verschiedener Testumgebungen**  
© IPG Automotive



Simulationsumgebungen zum Einsatz, die sich am Reifegrad der Funktionen orientieren (**Bild 1**).

Bei Model-in-the-Loop (MiL) werden Funktionen auf Basis mathematischer Modelle ohne reale Software oder Hardware getestet. Ziel ist die Überprüfung der Regelalgorithmen unter idealisierten Bedingungen. Bewertet werden Regelgüte, Stabilität und grundlegendes Funktionsverhalten. MiL eignet sich besonders für schnelle Iterationen und die systematische Erkundung des Designraums.

Software-in-the-Loop (SiL) dient der frühzeitigen Validierung der Softwarelogik und der Fehleridentifizierung vor der Hardwareintegration. Dafür wird die Software auf konventioneller Hardware eingesetzt. Einzelne Module und ihr Zusammenspiel werden dabei in einer integrierten Umgebung getestet. Durch

die Nutzung virtueller Steuergeräte lassen sich komplexe Systemzustände realitätsnah simulieren.

Bei Hardware-in-the-Loop (HiL) wird das reale Steuergerät mit einer simulierten Umgebung verbunden. Es verarbeitet simulierte Sensordaten und sendet reale Aktorsignale. Damit lassen sich Echtzeitverhalten, Kommunikationsschnittstellen und Systemrobustheit unter verschiedenen Bedingungen verifizieren.

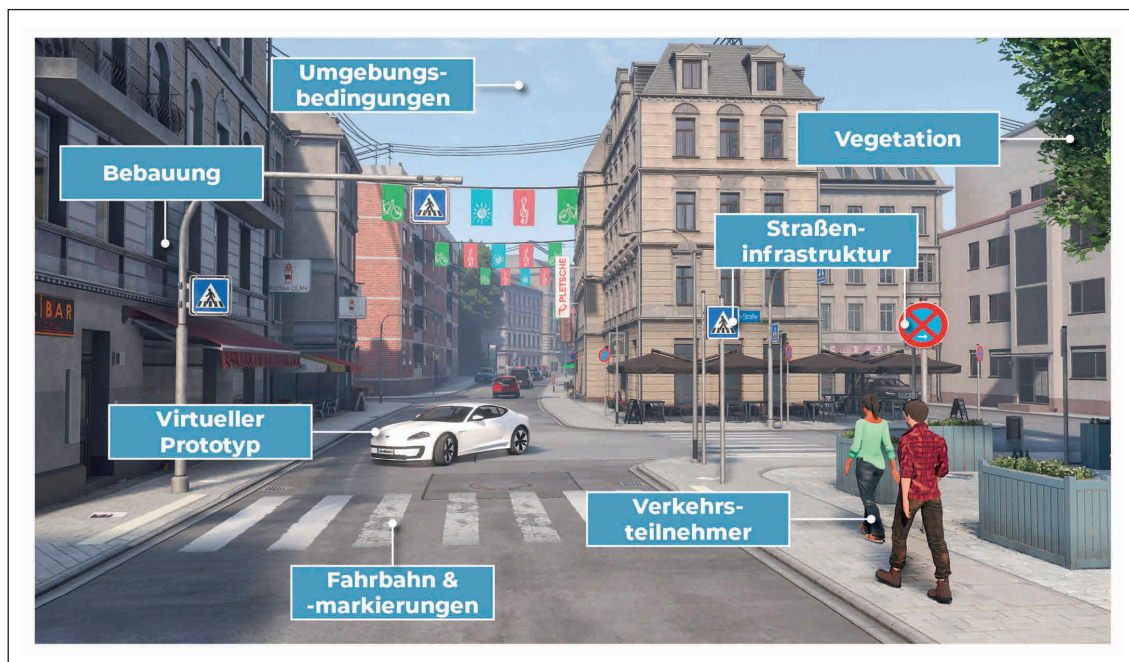
Vehicle-in-the-Loop (ViL) verbindet ein reales Fahrzeug mit virtuellen Szenarien, etwa auf einem Rollenprüfstand oder Testgelände. Diese Methode erlaubt eine umfassende Bewertung des Gesamtsystems unter realen Bedingungen. Dabei stehen das Fahrgefühl, die Mensch-Maschine-Interaktion und die Fahrerakzeptanz im Fokus.

**Umgebungs- und Sensormodellierung**

Um eine realistische und belastbare Simulation automatisierter Fahrfunktionen zu gewährleisten, sind drei zentrale Bausteine erforderlich.

Für plausible Tests ist eine präzise Umgebungsmodellierung unerlässlich. Dazu gehören hochauflösende Straßennetze mit exakten Fahrbahnmarkierungen, Spurverläufen und Kreuzungsgeometrien sowie statische Objekte wie Gebäude oder Verkehrsschilder. Dynamische Umweltbedingungen und Lichtverhältnisse erhöhen die Aussagekraft zusätzlich (**Bild 2**).

Auch das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer ist ein zentraler Einflussfaktor, weshalb die Verkehrssimulation den zweiten Baustein bildet. Für die realitätsnahe Abbildung von



**Bild 2: Übersicht über die Bestandteile eines Simulationsszenarios**  
© IPG Automotive



**Bild 3: Herausfordernde Situation für die Kamera bei der Fahrspur-erkennung**

© IPG Automotive

Fahrzeugen, Fußgängern und Radfahrern existieren zwei Ansätze: manöverbasiert mit vordefinierten, reproduzierbaren Abläufen sowie agentenbasiert mit individuell agierenden Verkehrsteilnehmern, die auf ihre Umwelt reagieren. Letzterer erlaubt komplexe, dynamische Szenarien und ist entscheidend für die Systemvalidierung unter realitätsnahen Bedingungen.

Die Sensormodellierung bildet den dritten Baustein. Je nach Anwendungsfall liefern Sensormodelle vorverarbeitete Objektlisten oder synthetische Rohdaten – etwa Kamerabilder, Lidar-Punktwolken oder Radarreflexionen. Physikalisch-basierte Modelle simulieren Lidarreflexionen, Radareffekte wie Dämpfung und Doppler sowie Kamerabilder mit physikalisch korrekter Beleuchtung und Linsenverzerrung (**Bild 3**). So lassen sich Wahrnehmung und darauf basierende Systemreaktionen präzise testen.

### Anwendungen im Entwicklungsprozess

Bereits in der Phase der Anforderungsspezifikation und Konzeptentwicklung von automatisierten Fahrfunktionen übernimmt die Simulation eine zentrale Rolle. Durch den frühzeitigen virtuellen Test lassen sich erste Systemarchitekturen und Funktionslogiken effizient testen und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Gesamtfahrzeugverhalten bewerten. Dies ermöglicht es, potenzielle Schwachstellen oder konzeptionelle Mängel bereits in einem sehr frühen Stadium zu identifizieren und gezielt zu adressieren.

Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Analyse von Funktionssicherheitskonzepten im Sinne der ISO 26262. Simulation erlaubt eine fundierte Bewertung der Sicherheitsmechanismen durch gezielte Nachbildung spezifischer Fehler Szenarien und Analyse der Systemreaktionen. So lässt sich die Wirksamkeit von Redundanzstrategien und Fehler-toleranzmechanismen überprüfen.

Zudem bildet die Simulation die Grundlage für die Erstellung und Optimierung von Algorithmen. Sie ermöglicht das Trainieren und Testen der Wahrnehmung hinsichtlich Sensordatenfusion, Objekterkennung und -klassifikation unter variablen Umweltbedingungen. Für die Planung werden Algorithmen zur Bahn- und Trajektoriengenerierung erstellt und entwicklungsbegleitend in komplexen Verkehrsszenarien getestet. In der Bewegungsregelung unterstützt die Simulation das Design und die Feinabstimmung von Reglern für Lenkung, Bremsen und Antrieb. Darüber hinaus ermöglicht sie eine gezielte Parameteroptimierung durch explorative Verfahren und Optimierungsalgorithmen. So unterstützen etwa genetische Algorithmen oder Reinforcement-Learning dabei, automatisch optimale Parameterkonfigurationen für spezifische Leistungs- oder Sicherheitsziele zu finden.

Ein weiterer Anwendungsfall liegt in der Verifikation und Validierung. Die gezielte Generierung von Testfällen ermöglicht eine strukturierte Abdeckung kritischer Verkehrsszenarien. Dabei kommen deterministische Testfälle auf Basis konkreter Anforderungen ebenso wie parametrische Testfälle zum Einsatz, die durch systematische Variation

einzelner Parameter erstellt werden. Stochastische/probabilistische Testfälle sorgen mit zufällig generierten Szenarien – etwa durch Monte-Carlo-Simulationen [1] – für eine breite Streuung möglicher Randbedingungen, um die Robustheit auch in unvorhergesehenen Situationen zu gewährleisten. Der Aufbau umfangreicher Bibliotheken validierter Testszenerien und Metriken, die Aufschluss über die Abdeckung des Funktions- und Parameterraums geben, sichert dabei die Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit der Tests.

Für die Sicherheitsbewertung sind insbesondere Corner Cases und physikalische Grenzbereiche entscheidend. Die Simulation ermöglicht deren systematische Identifikation sowie die gezielte Analyse der Systemreaktionen – auch im Hinblick auf SOTIF, also der Sicherheit bei korrekter Funktion ohne technische Defekte [2]. So lassen sich sicherheitskritische Schwachstellen frühzeitig erkennen. Automatisierte Regressionstests gewährleisten darüber hinaus, dass Codeänderungen keine unerwünschten Auswirkungen auf bestehende Funktionen haben und beschleunigen die kontinuierliche Absicherung im Entwicklungsprozess.

Mit steigendem Testaufwand für automatisierte Fahrfunktionen gewinnt die Simulation auch im Homologations- und Zulassungsprozess an Bedeutung. Im Vergleich zu physischen Tests erlaubt sie die Abdeckung eines deutlich größeren Spektrums sicherheitsrelevanter Szenarien. Dadurch steigt die Akzeptanz von Simulationsergebnissen als Bestandteil des Sicherheitsnachweises.

Parallel entwickeln sich die gesetzlichen Rahmenbedingungen weiter. Vorschriften wie die UN-Regelung Nr. 157 (ALKS) erlauben explizit den Einsatz von Simulation zur Typgenehmigung [3]. Für eine regulatorische Anerkennung sind jedoch hochvalide Simulationsmodelle und methodisch saubere Verifikationsprozesse unverzichtbar. Simulation wird somit zunehmend zum integralen Bestandteil des Zulassungsverfahrens.

### Herausforderungen und zukünftige Trends

Die simulationsgestützte Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen stößt jedoch auf mehrere technische Hürden. Eine davon ist der sogenannte Reality-Gap – die unvermeidliche Diskrepanz zwischen Simulation und Realität. Um diese zu minimieren, müssen Simulationsmodelle für Fahrdynamik, Sensorik und Umgebungsabbildung sorgfältig verifiziert, validiert und anhand realer Messdaten kalibriert werden.

Eine weitere Herausforderung liegt in der Skalierbarkeit. Millionen Simulationskilometer generieren enorme Datenmengen, die effizient gespeichert, verarbeitet und ausgewertet werden müssen. Um die notwendige Rechenkapazität bereitzustellen, sind leistungsfähige Cloud-Infrastrukturen und High-Performance-Computing-Lösungen erforderlich.

Neben den technischen Aspekten bestehen auch methodische Herausforderungen bei der Absicherung automatisierter Fahrfunktionen. Entscheidend ist die Auswahl geeigneter Testscenarien: Der Szenarienpool muss zum einen die Vielfalt realer Fahrsituationen abdecken, zum anderen effizient durchführbar bleiben. Dies erfordert eine strukturierte Analyse und Klassifikation der Szenarien.

Besonders herausfordernd ist der Umgang mit nicht-deterministischen Systemen, etwa bei KI-basierten Funktionen. Ihr Verhalten ist nicht immer reproduzierbar, was den Nachweis der hinreichenden Testabdeckung in Verifikation und Validierung erheblich erschwert. Zudem fehlen bislang allgemeingültige Metriken oder Standards, die definieren, wann die Testabdeckung als hinreichend gilt.

Für das Training von KI-Modellen bietet die Simulation allerdings auch zahlreiche Vorteile. Sie ermöglicht die Erzeugung großer Mengen synthetischer, annotierter Daten – insbesondere für seltene oder sicherheitskritische Szenarien, die in der Realität nur schwer erfassbar sind.

### Fazit

Simulation ist ein zentraler Bestandteil der Entwicklung und Absicherung automatisierter Fahrfunktionen – ohne sie wären komplexe Systeme weder wirtschaftlich noch technisch realisierbar.

Eine durchgängige Simulationskette über alle Entwicklungsstufen hinweg ist essenziell für effiziente und belastbare Testergebnisse. Gleichzeitig erfordert die Komplexität eine kontinuierliche Weiterentwicklung von Modellen, Szenarien und Automatisierungsmethoden.

Zukünftig wird insbesondere die Integration von KI, Cloud-Technologien und Standardisierung die Leistungsfähigkeit der Simulation weiter steigern. So trägt die Simulation maßgeblich zur sicheren und zeitnahen Einführung automatisierter Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen bei. ■ (ah)

[www.ipg-automotive.com](http://www.ipg-automotive.com)

### Quellenverzeichnis

[1] PEGASUS-Projekt: PEGASUS Method – Section 12, online verfügbar unter: <https://www.pegasusprojekt.de/en/pegasus-method> [Zugriff am 09.07.2025].

[2] DIN ISO 21448:2022-12. Straßenfahrzeuge – Sicherheit der intendierten Funktion (SOTIF). Deutsche Fassung EN ISO 21448:2022. Berlin: Beuth Verlag.

[3] UNECE (2023): UN Regulation No. 157 – Automated Lane Keeping Systems (ALKS), Genf: Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa, online verfügbar unter: <https://unece.org/sites/default/files/2023-12/R157e.pdf> [Zugriff am 09.07.2025].



**Martin Herrmann** ist Senior Global Sales Strategy Manager bei IPG Automotive. © IPG Automotive



**Henning Kemper** ist Senior Specialist Editor bei IPG Automotive. © IPG Automotive