

AI-in-the-Loop

Neues Testsystem zur Validierung eines autonomen, KI-basierten Fahrzeugs mittels realistischer Sensorsimulation

Eine spannende Herausforderung: Wie gelingt es, ein Fahrzeug zu validieren, dessen Steuerung selbstständig Entscheidungen trifft? ZF löst diese Aufgabe mit einem Mix aus klassischer HIL-Technologie und sensorrealistischer Umfeldsimulation. Das dafür konzipierte Testsystem basiert auf der dSPACE Werkzeugkette.

Ein herkömmliches fahrgesteuertes Fahrzeug mit hohem Qualitäts- und Komfortniveau auf die Straße zu bringen, ist nur mit erheblichem Aufwand in Entwicklung und Validierung möglich. Insbesondere, da auch immer Kosten- und Zeitziele zu erreichen sind. Die Einführung autonomer Transportsysteme hebt die Anforderungen an die Qualitäts-, Effizienz- und Sicherheitsziele in völlig neue Dimensionen. Die daraus entstehende Komplexität in der Entwicklung ist nur mit besonders schlanken Methoden und Werkzeugketten beherrschbar. Schließlich geht es nicht nur darum, autonome Funktionen erfolgreich auf die Straße zu bringen, sondern diese

ausfallsicher unter verschiedensten Wetter-, Verkehrs- und Sichtverhältnissen nutzen zu können.

Autonome Technologieplattform

ZF treibt die Entwicklung einer Technologieplattform für einen autonomen, batterieelektrischen People Mover voran. Damit unterstreicht ZF seine umfangreichen Kompetenzen als Systemarchitekt für das autonome Fahren. Dazu nutzt der Technologiekonzern sein enges Kompetenznetzwerk – gerade bei der Ermittlung und Verarbeitung von Umfeld- bzw. Sensordaten. Das Projekt demonstriert auch die Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit des erst vor einem Jahr von

ZF und NVIDIA vorgestellten Supercomputers ZF ProAI. Dieser agiert als zentrale Steuereinheit im Fahrzeug. Ziel ist eine Systemarchitektur, die je nach Einsatzzweck, verfügbarer Hardware-Ausstattung und gewünschtem Automatisierungslevel skalierbar ist und auf beliebige Fahrzeuge übertragen werden kann.

Aufbau des autonomen Systems

Für die Umfelderkennung ist das Fahrzeug mit sechs Lidar-, sieben Radar- und zwölf Kamerasensoren ausgestattet. Für die exakte Positionsbestimmung sorgt ein Global Navigation Satellite System (GNSS). Alle Sensordaten werden im zentralen Steuergerä-



rät ZF ProAI zusammengeführt. Hier erfolgt die Datenvorverarbeitung und -auswertung mit den typischen Schritten Perzeption, Objektidentifizierung und Datenfusionierung sowie die Berechnung der Fahrstrategie. Daraus abgeleitet werden Signale für die Ansteuerung der Aktuatoren (Lenkung, Antrieb, Bremse) generiert. Die Analyse der Sensordaten übernehmen Algorithmen, die zum Teil auf künstlicher Intelligenz (KI) basieren. Diese KI-Software beschleunigt vor allem die Datenanalyse und präzisiert die Objekterkennung. Dabei geht es darum, aus der Fülle der Daten wiederkehrende Muster in den Verkehrssituationen zu erkennen, etwa einen Fußgänger, der die Fahrbahn überqueren will.

Konzept für die Validierung

Ein wichtiger Validierungsschritt von Steuergeräten ist der Integrationstest, bei dem ein Steuergerät zusammen mit allen Sensoren, Aktoren und der Elektrik/Elektronik (E/E)-Architektur des Fahrzeugs geprüft wird. Diese ganz-

heitliche Betrachtung dient der vollständigen Absicherung aller Fahrfunktionen inklusive der beteiligten Komponenten (Sensoren, Aktoren) sowie einer Beurteilung des Fahrzeugverhaltens. Für Integrationstests hat sich das Hardware-in-the-Loop (HIL)-Verfahren bewährt. Eine entsprechende Testlösung ist als Absicherungsschritt im Entwicklungsprojekt vorgesehen.

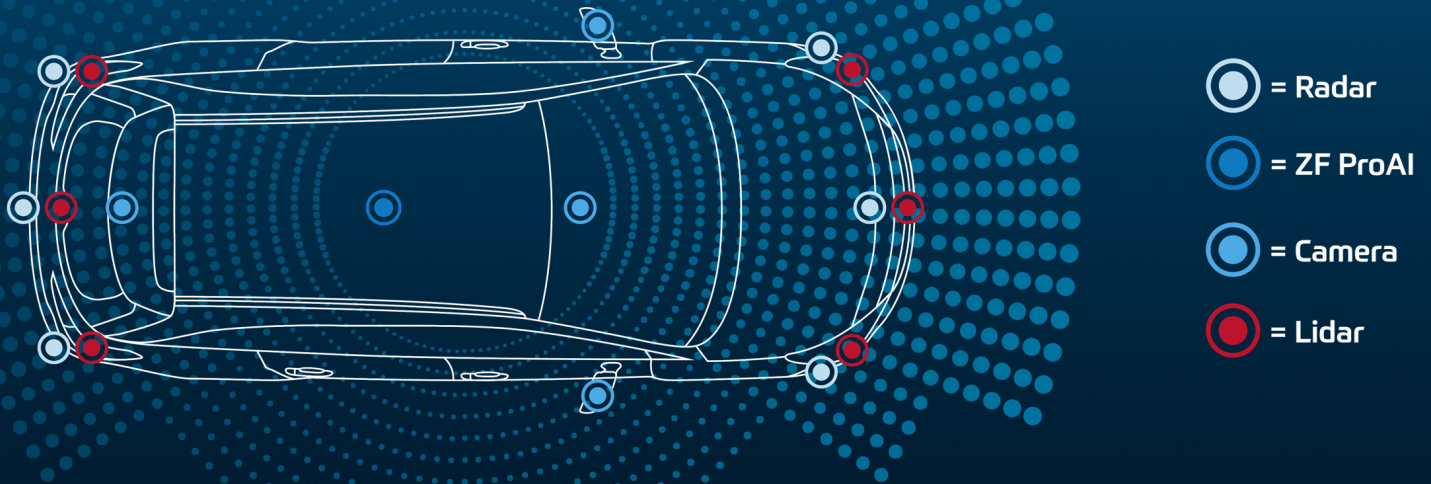
Konzept für den HIL-Simulator

Gemeinsam mit dSPACE entstand ein Konzept für einen HIL-Simulator. Mit dem auf SCALEXIO-Technologie ba-

sierenden System wird eine Gesamtfahrzeugsimulation realisiert, die neben Lenkung, Bremse und dem elektrischen Antrieb die Fahrdynamik sowie sämtliche Sensoren umfasst. Für die Eingangsseite des Steuergeräts stellt der Simulator alle Sensorsignale zur Verfügung, für die Ausgangsseite bietet er eine Restbussimulation sowie die notwendige I/O zum HIL-Betrieb der Fahrzeugaktuatorik. Um dieses realitätsnah abzubilden, werden Fahrzeug und Fahrdynamik mit der Toolsuite ASM (Automotive Simulation Models) simuliert – dies geschieht so- >>

Künstliche Intelligenz

Künstliche Intelligenz (KI) ist ein Teilgebiet der Informatik, das sich mit der Automatisierung intelligenten Verhaltens und dem maschinellen Lernen befasst. Im Allgemeinen bezeichnet künstliche Intelligenz den Versuch, bestimmte Entscheidungsstrukturen des Menschen nachzubilden, indem zum Beispiel ein Computer so gebaut und programmiert wird, dass er relativ eigenständig Probleme bearbeiten kann.



Exemplarische Darstellung der Sensorarchitektur des autonomen Fahrzeugs.

Bildnachweis: © ZF

wohl für die Sensoren als auch für das Fahrzeug in Echtzeit. Dadurch ergibt sich eine besondere Herausforderung, weil KI-Systeme per se über keine „harten“ Echtzeiteigenschaften und linearen Abhängigkeiten verfügen. Das KI-Steuergerät wird deshalb zwischen den synchronisierten Simulatoren für die Sensorik und Aktuatorik „aufgehängt“ und damit genau wie unter Realbedingungen im Fahrzeug betrieben.

Emulation der Sensoren

Das Steuergerät ZF ProAI ist so aufgebaut, dass es primär alle Sensorrohdaten direkt verarbeitet. Zusätzlich werden die Sensordaten auch in Form von Objektlisten eingelesen. Die Objektlisten werden von dem Modell ASM Traffic im Rahmen einer Ground-Truth-

Simulation des Umgebungsverkehrs zur Verfügung gestellt. Für die Rohdaten müssen alle Sensoren mit dem Simulator so realistisch emuliert werden, wie es den tatsächlichen physikalischen Gegebenheiten entspricht.

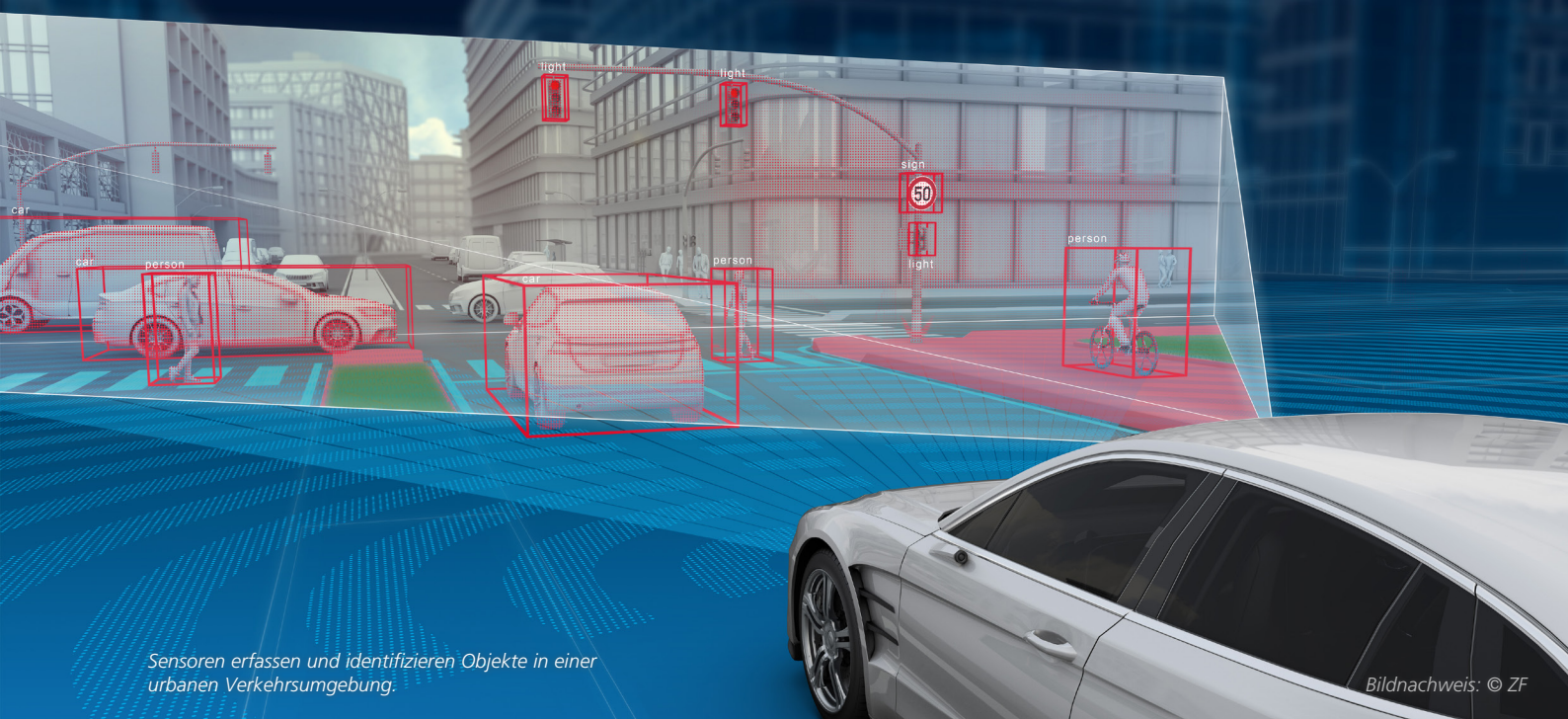
Hochgenaue Sensorumfeldsimulation

Um Sensorrohdaten zu generieren, sind Modelle erforderlich, die basierend auf definierten Testszenarien das Sensorumfeld physikalisch korrekt dargestellt berechnen. Dafür kommen die physikalischen Radar-, Lidar- und Kameramodelle aus der Werkzeugkette von dSPACE zum Einsatz. Diese hochgenauen und hochauflösenden Modelle berechnen die Übertragungsstrecke zwischen der Umgebung und

dem Sensor, inklusive Sensor-Frontend. Im Raytracer der Radar- und Lidarmodelle ist die gesamte Übertragungsstrecke von Sendezu-Empfangseinheit abgebildet und sie unterstützen Mehrwegeausbreitung. Dabei werden parallel mehrere Millionen Strahlen ausgesendet; die genaue Anzahl hängt von der jeweiligen 3D-Szene ab. In beiden Modellen werden die Reflexion und die Streuung von komplexen Objekten physikalisch berechnet. Zudem ist die Anzahl der „Hops“ bei der Mehrwegeausbreitung einstellbar. Das Lidarmodell ist sowohl für Flash- als auch für Scanning-Sensoren ausgelegt. Das Kameramodell berücksichtigt unterschiedliche Linsentypen und optische Effekte wie chromatische Aberration oder Schmutz auf der Linse. Alle Mo-

Die Plattform für die Sensoremulation: Die Simulation der Sensordaten erfolgt auf dem Sensor Simulation PC; mit der Environment Sensor Interface Unit (ESI Unit) werden die elektrischen Signale genau so aufbereitet, wie sie auch reale Sensoren zur Verfügung stellen.





Sensoren erfassen und identifizieren Objekte in einer urbanen Verkehrsumgebung.

Bildnachweis: © ZF

„Um das KI-basierte Steuergerät unserer autonomen Technologieplattform so früh wie möglich im Verbund mit den Sensoren und Aktoren abzusichern, setzen wir auf die leistungsfähige Werkzeugkette von dSPACE.“

Oliver Maschmann, ZF

delle sind so komplex, dass für die Echtzeitberechnung Modellbestandteile auf Grafikprozessoren ausgeführt werden müssen. Diese Rechenaufgabe löst der mit einer NVIDIA P6000 ausgestattete Sensor Simulation PC, der nahtlos in das Echtzeitsystem von dSPACE eingebunden ist.

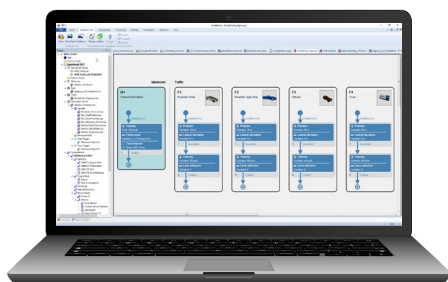
Generierung der Testszenarien

Das A und O bei den Tests für autonome Fahrzeuge ist das Generieren geeigneter virtueller Fahrszenarien, mit denen sich die Funktionen für das

autonome Fahren zuverlässig testen und absichern lassen. Für diese Aufgabe wird der Scenario Editor eingesetzt. Mit ihm lässt sich komplexer Umgebungsverkehr mit einfachen grafischen Methoden erstellen. Diese Szenarien setzen sich aus den Manövern eines Ego-Fahrzeugs (zu testendes Fahrzeug inklusive der Sensorik), den Manövern des Umgebungsverkehrs und der Infrastruktur (Straßen, Verkehrszeichen, Randbebauung etc.) zusammen. So entsteht eine virtuelle realistische 3D-Welt, die von den Fahrzeug-

sensoren erfasst wird. Die flexiblen Definitionsmöglichkeiten eröffnen Tests, beginnend bei der exakten Umsetzung standardisierter EuroNCAP-Vorgaben bis hin zu individuell aufgebauten, komplexen Szenarien in beispielsweise urbanen Räumen. Die Echtzeitsimulation der 3D-Welt inklusive der 3D-Objekte der Fahrzeuge und den Sensorumfeldmodellen für Radar, Lidar und Kamera erfolgt mit ASM. Die Trajektorien der Verkehrsteilnehmer werden mit dem Verkehrsmodell ASM Traffic simuliert. >>

Für die Parametrierung und Szenariogenerierung mit ModelDesk, inklusive Scenario Editor (links), sowie die visuelle Ausgabe der simulierten Testfahrten mit MotionDesk (rechts) stehen leistungsfähige Arbeitsstationen zur Verfügung.



Die beiden Aufbauten enthalten alle Komponenten für die Sensorsimulation: SCALEXIO-Echtzeitplattform, Sensor Simulation PCs und ESI Units. Das zu testende Steuergerät ZF ProAI ist im Einschub links untergebracht. Der Simulator für die Aktuatorik ist hier nicht dargestellt.



Komponenten der Sensorsimulation

Die Sensorumfeldsimulation in Echtzeit wird mit folgenden Komponenten realisiert:

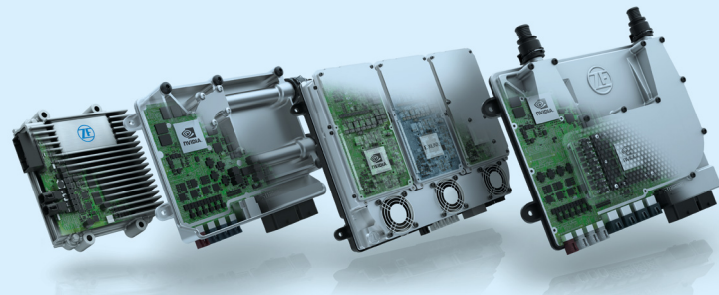
Typ	Anzahl	ESI Unit	Sensor Simulation PC
Lidar	6	1	1
Radar	7	1	4
Kamera	12	3	3

ZF ProAI

Die ZF ProAI ermöglicht hohe Rechenleistung und künstliche Intelligenz (KI) für Funktionen, die das automatisierte Fahren ermöglichen. Sie nutzt eine extrem leistungsfähige und skalierbare NVIDIA-Plattform, um Signale von Kameras sowie Lidar-, Radar- und Ultraschallsensoren zu verarbeiten. Sie versteht in Echtzeit, was rund um das Fahrzeug geschieht und sammelt Erfahrungen durch „Deep Learning“.

Vorteile

- KI-fähig
- Rechenleistung je nach Modell bis zu 150 TeraOPS (= 150 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde)
- Funktionen für automatisiertes und autonomes Fahren
- Hohe Skalierbarkeit für Schnittstellen und Funktionen



Bildnachweis: © ZF

Absicherung des autonomen Fahrzeugs

Mit dem hier dargestellten HIL-Simulatorverbund lässt sich das Gesamtfahrzeugverhalten der virtualisierten Technologieplattform unter Bedingungen untersuchen, die elementar für die weitere Entwicklung sind. Dazu gehören Szenarien, die sich in Einsatzbereichen abspielen, in denen die ersten ausgelieferten Fahrzeuge vollständig autonom ihren Weg finden. Mit

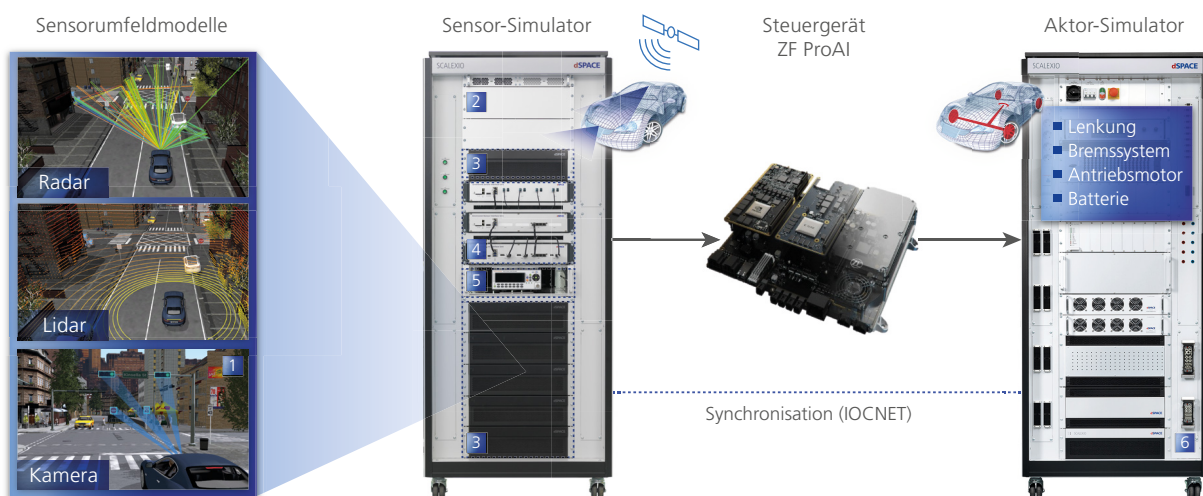
dem Simulator müssen sie eine sichere Fahrzeugführung selbst dann beweisen, wenn nicht vorhersehbare Ereignisse eintreten – und das zum Beispiel auch bei Regen, Schnee oder Glätteis. Hinzu kommen typische HIL-Testmethoden wie Fehlereinspeisungen im Bereich des E/E-Systems, also Kabeldefekte, Kurzschlüsse oder Störungen der Bussysteme. Mit diesen umfassenden und stetig ausbaubaren Testkatalogen lässt sich eine effiziente funktio-

nale Absicherung des sicherheitskritischen, autonomen Systems gewährleisten.

Bewertung und Ausblick

Mit dem installierten Testsystem können wichtige Szenarien zur Absicherung des zentralen Steuergerätes und des gesamten Fahrzeugs ausgeführt werden. Dazu gehören insbesondere Corner Cases, wie zum Beispiel Notbremsmanöver, die sich bei realen >>

Der HIL-Simulator generiert synchron in Echtzeit das Umfeld von Radar-, Lidar- und Kamerasensoren inklusive deren Front-end und stellt es dem Steuergerät ZF ProAI zur Verfügung. Abhängig von der Fahrstrategie steuert ZF ProAI die simulierten Aktoren.

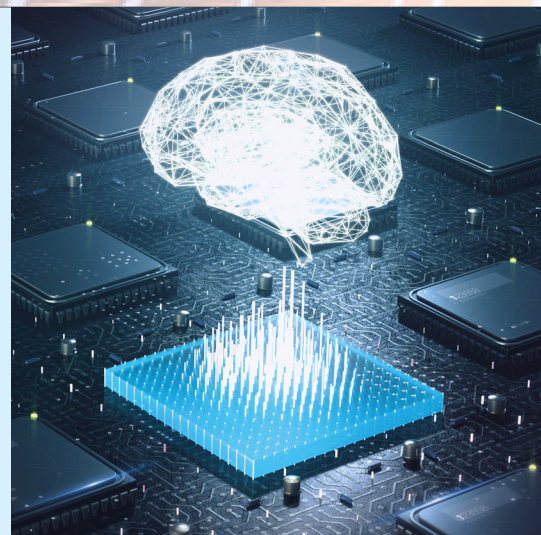


- 1) Sensorumfeldmodelle: Berechnen das vom Sensor erfasste Umfeld inklusive des Sensor-Front-ends mit einem hohen Maß an Realismus und einer hohen Auflösung
- 2) SCALEXIO + ASM Traffic: Simulation des Umgebungsverkehrs
- 3) Sensor Simulation PCs: Ermöglichen eine deterministische Echtzeit-Sensorsimulation und geben die Sensorrohdaten über eine standardisierte Grafikschnittstelle aus

- 4) ESI Units: Bereiten die Rohdaten synchronisiert für die individuellen Anforderungen der Steuergeräteschnittstellen auf
- 5) GNSS: Stellt die Navigationskoordinaten synchronisiert bereit
- 6) SCALEXIO + ASM Vehicle Dynamics, Multi-I/O Boards, Ethernet Interface, CAN FD Interface: Simulation der Aktoren und der Fahrdynamik

Deep Learning

Am Simulator „trainieren“ die ZF-Ingenieure dem Fahrzeug unterschiedliche Fahrfunktionen an. Dabei stehen besonders urbane Situationen im Mittelpunkt: zum Beispiel die Interaktion mit Fußgängern und Fußgängergruppen vor Zebrastreifen, die Kollisionsabschätzung und das Verhalten vor Ampeln und in Kreisverkehren. Im Gegensatz zu einer Autobahn- oder Landstraßenfahrt ist es in städtischen Szenarien deutlich aufwendiger, ein gesichertes Verständnis der aktuellen Verkehrssituation zu entwerfen, das die Basis für angemessene Aktionen eines computergesteuerten Fahrzeugs bietet.



„Mit den sensorrealistischen Simulationsmodellen von dSPACE gelingt es, aus komplexen 3D-Szenarien Sensorrohdaten zu generieren, die unser Steuergerät ZF ProAI direkt verarbeiten kann. Das ermöglicht uns, komplexe, realistische Tests in frühen Entwicklungsphasen komfortabel und kosteneffizient durchzuführen.“

Oliver Maschmann, ZF

Testfahrten schwer darstellen lassen. Die sensorrealistische Umfeldsimulation ermöglicht genaue Bewertungen, wie die Sensoren ihre Umwelt erfassen und welche Auswirkungen das auf die Fahrzeugführung hat. Es lassen sich auch typische Fehlinterpretationen auswerten, wenn beispielsweise der Radarsensor von einem dicht vorausfahrenden Lkw aufgrund seines Öffnungswinkels nur noch die Räder „sieht“. Aufgrund der flexiblen Konfigurier- und Parametrierbarkeit können zum Beispiel Auswirkungen untersucht werden, die sich durch Änderungen des Sensor-Front-ends ergeben würden. Durch die vollständige Automatisierung aller Tests ist es möglich, umfang-

reiche Testkataloge auszuführen und nach Auswertung der Fehlerreports die erfolgreiche Überarbeitung in Regressionstests zu bestätigen. Zukünftig werden die Tests durch weitere in Realfahrten gewonnene Umgebungsdaten angereichert. Dabei wird die gesamte Infrastruktur, Randbebauung und der

Umgebungsverkehr mit Sensoren erfasst und dann zu einer virtuellen Testumgebung aufbereitet, in der sich das Fahrzeug bewegt. Die Generierung komplexer Tests wird dadurch weiter vereinfacht. ■

Oliver Maschmann, ZF

Auf einen Blick

Die Aufgabe

- Absicherung einer autonomen, batterieelektrischen Technologieplattform
- Test der KI-basierten Fahrzeugführung

Die Herausforderung

- Emulation aller Sensoren in Echtzeit
- Aufbau einer sensorrealistischen Echtzeitsimulation des Sensorumfelds (3D-Welt)
- Simulation des gesamten Fahrzeugverhaltens in realistischem Umgebungsverkehr

Die Lösung

- Aufbau einer Echtzeitplattform für die hochgenaue Simulation von Radar-, Lidar- und Kamerasensoren
- Echtzeitsimulation von Verkehr, Fahrdynamik und elektrischen Antrieben
- Testen mit flexibel definierbaren Szenarien in einer virtuellen 3D-Welt

Oliver Maschmann

Oliver Maschmann ist Projektleiter bei ZF in Friedrichshafen und verantwortlich für den Aufbau und Betrieb der HIL Gesamtfahrzeugprüfstände.



Autonomes Fahren

ist beherrschbar



Dr. Dirk Walliser, Senior Vice President Corporate Research and Development Innovation and Technology, der ZF Friedrichshafen AG, erklärt im Interview mit dem dSPACE Magazin, warum autonomes Fahren für das Unternehmen so bedeutend ist und wie die nächsten Schritte zur Markteinführung aussehen können.

Herr Dr. Walliser, wie wichtig ist das Thema autonomes Fahren für ZF?

Das autonome Fahren ist ein Beispiel dafür, dass Entwicklungen schneller voranschreiten, als man es noch vor wenigen Jahren gedacht hätte. Wir begreifen es als Chance, um frühzeitig mit innovativen Lösungen unsere Marktposition auszubauen. Der strategische Fokus von ZF ist folglich noch stärker darauf gerichtet, Systemanbieter für Technologien zu sein, die die Mobilität der Zukunft wesentlich beeinflussen.

Wie gehen Sie bei der Entwicklung dieser Systeme vor?

Wichtig ist es, zunächst die Marktchancen zu identifizieren, die sich aus den teilweise disruptiven Veränderungen ergeben. Die für diese Chancen definierten Systeme entstehen mit sehr

viel Agilität in der Entwicklung, gestützt auf ein erfahrenes Team mit hoher Entwicklungscompetenz. Für bestimmte Themen greifen wir auch auf vorhandene Entwicklungen und Kompetenzen von Partnern zurück. So konnten wir beispielsweise unsere neue, autonom fahrende Technologieplattform zügig aufbauen und dabei schnell einem hohen Reifegrad erreichen.

Für welche Anwendungsszenarien ist die neue autonome Technologieplattform von ZF ausgelegt?

Hier stehen Mobilitätskonzepte wie Ride-Hailing im Fokus, also autonome Shuttles, die sich per App anfordern lassen. Deren Umsetzung ist zunächst für nicht öffentliche Verkehrsräume wie Flughäfen oder große Firmengelände vorgesehen. Die Technologie unserer Plattform lässt sich natürlich für weitere Einsatzfelder wie Häfen, Tagebau, oder die Landwirtschaft nutzen.

Was ist notwendig, um auch auf öffentlichen Straßen autonom zu fahren?

Die Industrie ist in Vorleistung getreten und zeigt, dass die Technologie beherrschbar ist. Das gelingt auch durch

Absicherungssysteme, wie sie dSPACE zur Verfügung stellt. Nun muss der Gesetzgeber die notwendigen Rahmenbedingungen für die Zulassung autonomer Fahrzeuge schaffen.

Wodurch zeichnet sich das neue Testsystem von ZF zur Validierung autonomer Fahrzeuge aus?

Mit dem neuen Testsystem sichern wir das zentrale, KI-basierte Steuergerät unserer autonomen Technologieplattform ZF ProAI ab. Mittels HIL-Technologie gelingt dies in frühen Entwicklungsphasen und kosteneffizient im Verbund mit Sensorik und Aktuatorik. Wenn man so will: AI-in-the-Loop. Diese Validierung erfolgt in einer sensorrealistischen Echtzeitsimulation, d.h. in einer virtuellen 3D-Welt unter Berücksichtigung der Fahrdynamik mit flexibel definierbaren Verkehrsszenarien. Die virtuelle Umgebung stellt hierbei einen Digital Twin realer Fahrtstrecken dar und wird aus Kartendaten und hochgenauen Fahrzeugmessungen generiert.

Herr Dr. Walliser, vielen Dank für das Interview.