

Realszenarien-Testen von automatisierten Fahrfunktionen

Testen auf dem Prüfgelände bis SAE Level 5,
basierend auf dem Fundament des PEGASUS-Projektes

Dr. Sebastian Siegl, CARIAD SE, Ingolstadt¹

Dr. Edgar L. v. Hinüber, CEO @ iMAR Navigation GmbH, St. Ingbert²

1. Zusammenfassung

Der Vortrag erläutert, welcher technische Fortschritt und wirtschaftliche Nutzen sich durch die aus den Ergebnissen des PEGASUS³ - Projektes nun erheblich weiterentwickelte Testmethodik für das Prüfen von hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen im Realversuch für Automobilhersteller, Zulieferer und Homologations-Dienstleister ergeben und zeigt dies anhand von realen Fallbeispielen, hier exemplarisch für die Entwicklung eines Autobahnpioten. Darüber hinaus werden generische Lösungsansätze für das effiziente Testen in komplexen Szenarien sowie das Testen nach der Verordnung zur Regelung des Betriebs von Kraftfahrzeugen und autonomer Fahrfunktionen gemäß Drucksache 86/22 des Bundesverkehrsministeriums vom 24.02.2022, sowie der darin beinhaltenden SOTIF Kriterien (ISO 21448) aufgezeigt.

2. Einleitung

Szenario-basiertes Testen rückt mit steigendem Automatisierungsgrad von Fahrfunktionen und fortschreitender Gesetzgebung für die Homologation & Zulassung, sowie mit den Anforderungen an NCAP Tests, bereits ab Fahrfunktionen mit SAE Level 2 verstärkt in den Fokus der Absicherung. Dies gilt sowohl für die Systemintegratoren, für die Steuergeräte- und Sensorzulieferer als auch für die für die Homologation des Gesamtfahrzeugs verantwortliche Institution, das KBA, sowie die mit der Umsetzung beauftragten Dienstleister.

¹ sebastian.siegl@audi.de / sebastian.siegl@cariad.technology

² v.hinueber@imar-navigation.de

³ <https://www.pegasusprojekt.de/de/about-PEGASUS>

Das Verhalten automatisierter Fahrzeuge im Straßenverkehr kann weitgehend in bekannten Simulationsumgebungen geprüft werden, sofern die Simulation hinreichend, z.B. mittels Vergleich mit Realfahrzeugtests, validiert wurde. Es gibt jedoch Verhaltenseigenschaften und Szenarien, die nur in Realtests hinreichend gut getestet, optimiert und validiert werden können. Die Vorzüge einer nach dem zukünftigen Standard ISO 22133 realisierten Testumgebung auf dem Prüfgelände für das Testen realer automatisierter Fahrzeuge bis SAE Level 5 im szenariobasierten Kontext sowie auch für nichtszenariobasierte Tests auf dem Prüfgelände und bedarfsweise auch auf öffentlichen Straßen liegen dabei auf der Hand. Im Folgenden stellen wir die im Volkswagenkonzern eingesetzte Toolchain iSWACO-ARGUS vor.



Abbildung 1: Fahrzeug (Audi) mit Staehle-Fahrroboter und iMAR Lokalisierungssystem, eingebunden in iSWACO-ARGUS Leitstand mit iARGUS-CMD Leitstandssoftware

Das Testen im gesteuerten Real-Fahrzeug Testszenario auf dem Prüfgelände erlaubt es, auch sehr komplexe Interaktionen zwischen Prüfling und Umgebung, d.h. auch und insbesondere mit anderen Fahrzeugen, Fußgängern, Tieren, Verkehrszeichen, Ampeln, Beregnungsanlagen usw., zu prüfen und diese nicht nur mit hoher Wiederholungsgenauigkeit, sondern auch mit hoher absoluter Genauigkeit beliebig häufig automatisiert erneut darzustellen. Darüber hinaus ist es für die Anwender von hoher Wichtigkeit, Prüfkomponenten auch verschiedenster Anbieter von Lokalisierung, Regelung, Kommunikation und Infrastruktur hier im eigenen Versuchs-Setup individuell kombinieren zu können.

3. Blick zurück: Das Leuchtturm-Projekt PEGASUS

PEGASUS war das Leuchtturmprojekt der deutschen Bundesregierung bis 2019 zum Thema „Automatisiertes Fahren effektiv absichern“, in dem die Autoren für den Bereich „Prüfgelände“ (iMAR Navigation GmbH⁴ zusammen mit der Audi AG und dem TÜV) praktische und theoretische Grundlagen zum szenariobasierten Testen auf dem Prüfgelände gelegt haben. Dabei bedeutet „szenariobasiert“, dass

⁴ <https://www.imar-navigation.de>

sich das Verkehrsszenario, welches für die Validierung der Fahrfunktionen des Prüflings (VUT, Vehicle-under-Test) auf dem Prüfgelände dargestellt wird, im Realtest automatisch an das responsive Verhalten des VUT selbst, i.d.R. bestimmt durch dessen integrierte HAF-Funktion (HAF – hochautomatisiertes Fahren), adaptiert. Abbildung 2 zeigt exemplarisch ein derartiges Szenario, in dem das Fahrzeug auf der rechten Spur vor einem Hindernis ausweicht und den Prüfling auf der mittleren Spur zu einer Aktion zwingt.

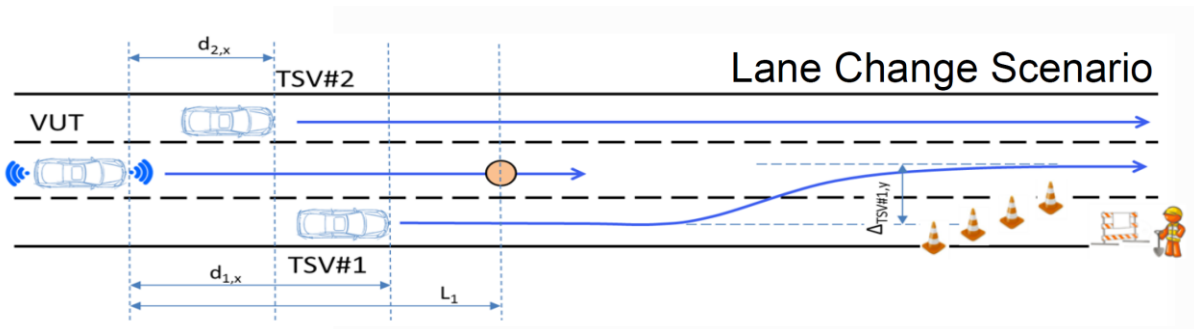


Abbildung 2: Verkehrsszenario an einer Baustelle mit einscherenden (TSV#1) und die Nebenspur blockierenden (TSV#2) Fahrzeugen. Das VUT wird somit gezwungen, in einem Szenario eine Entscheidung zu treffen und auszuführen

In PEGASUS wurde auch die erforderliche Ausstattung der das Verkehrsszenario darstellenden Fahrzeuge vorgeschlagen (Abbildung 3), die auch heute noch grundlegend Bestand hat.

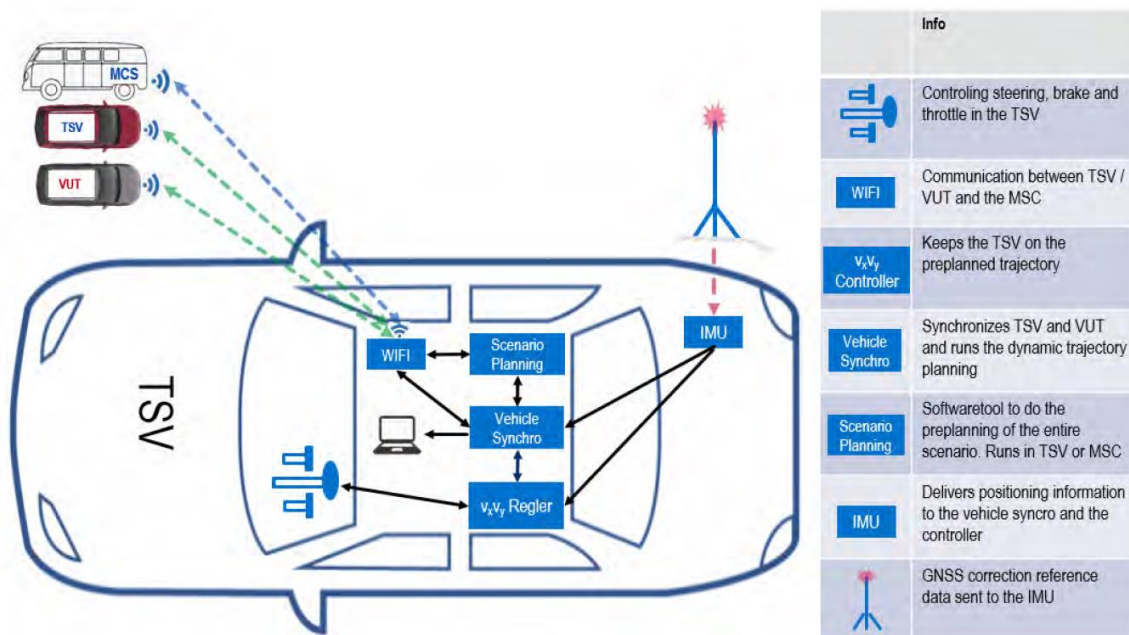


Abbildung 59 Überblick über Komponenten im TSV

Abbildung 3: Überblick über Komponenten im TSV (aus PEGASUS Abschlussbericht)

Ein Ergebnis des Projektes PEGASUS⁵ (2015 – 2019, 17 nationale automobile Projektpartner, Projektbudget 34.5 Mio €) bzgl. der erforderlichen Realtests (Durchführungspunkt Nr. 14 der PEGASUS-Methodik) ist die Beschreibung der Anforderungen an das oder die Testfahrzeuge (VUT; Vehicle under Test), an die Verkehrssimulationsfahrzeuge (Traffic Simulation Vehicle, TSV) sowie überfahrbare Soft Crash Targets, SCT) sowie an den übergeordneten Leitstand (als Master Control Station, MSC, oder Control Center, CC, bezeichnet) und an notwendige FAIL/SAFE Mechanismen, die beim szenariobasierten Testen auf einem Prüfgelände mindestens vorauszusetzen sind. Darüber hinaus hat PEGASUS auf theoretischer Basis einen exemplarischen Umfang an Szenarien, der für die Absicherung einer Funktion auf einem Prüfgelände getestet werden soll, beschrieben.

Auf eine realisierbare Umsetzung auf dem Prüfgelände sowie einen optimierten Ressourceneinsatz wurde im Rahmen des Projekts PEGASUS jedoch nicht im Detail eingegangen. Um die Testszenarien für HAF Funktionen, die für die Absicherung einer Fahrfunktion mit Level 3, 4 und auch 5 notwendig sind, jedoch wirtschaftlich effizient in Realität testen zu können, ist eine stark skalierbare Nutzung der Prüfgeländekapazitäten genauso Voraussetzung wie eine Tool-Kette, die die Anforderungen an eine robuste Testumgebung erfüllt. Dies erforderte ausgehend von PEGASUS einen erheblichen funktionalen und ressourcenseitigen Methodenhub.

Daher haben iMAR und Audi / CARIAD das Gesamtthema der Absicherung durch Realtests in Ergänzung zu den allfälligen Simulationen nach Abschluss des Projektes PEGASUS zu einer operationell einsetzbaren gesamtheitlichen ToolChain mit der Bezeichnung iSWACO-ARGUS⁶ weiterentwickelt.

4. Anforderungen an die Toolchain und Methode für das Testen von automatisierten Fahrfunktionen

a. Überblick zu den Anforderungen

Prüfgeländetests für automatisierte Fahrfunktionen haben sich aus anderen bekannten Testformen wie Fahrdynamiktests oder NCAP-Tests herausentwickelt. Diese zeichneten sich durch statische oder direkt synchronisierte Abläufe aus, d.h. ein aktives Reagieren des Prüflings (VUT) auf sein Prüfumfeld oder gar die aktive Einflussnahme des Prüfumfeldes (TSVs, SCTs usw.) auf den Prüfling (VUT) lag aufgrund fehlender Notwendigkeit außerhalb der Anforderungen dieser bewährten Prüfmethode, die aber heute noch fast ausschließlich die Prüfgeländelandschaft und die dortigen Testaktivitäten bestimmen.

⁵ <https://www.pegasusprojekt.de/de/about-PEGASUS>

⁶ [iSWACO-ARGUS](#) ist ein Kunstname und reflektiert die Fähigkeit zur Schwarmkontrolle und zugleich die Überwachung aller Aktivitäten auf dem Prüfgelände mit der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der sagenhaften „Argus-Augen“, wie sie aus der griechischen Mythologie überliefert sind.

Das Testen automatisierter Fahrfunktionen erfordert die Bereitstellung dieser Interaktionsfähigkeit der beteiligten „Moveable Objects“. Dies wird auch als Trigger & Action – oder Detection & Action - Fähigkeit bezeichnet.

Im Folgenden werden die wesentlichen Anforderungen an die Gesamt-Toolkette vorgestellt. Zugleich werden diese anhand der Umsetzung durch die von der AUDI AG und CARIAD mit iMAR konzipierten Toolkette iSWACO-ARGUS erläutert. Die für die ganzheitliche Planung und Durchführung von Realtests auf Prüfgeländen verwendete Tool-Kette iSWACO-ARGUS basiert auf einer felderprobten Systemarchitektur, die aus den Erkenntnissen im Projekt PEGASUS weiterentwickelt wurde. Die Schnittstellen werden derzeit in der ISO 22133 standardisiert, ein erster Draft dieses Standards wurde 2021 veröffentlicht, ein zweiter ist noch für das 2.Quartal 2022 geplant. An der ISO 22133 sind die meisten führenden Anbieter von Prüfgelände-Ausstattung beteiligt.

b. Anforderungen an den Leitstand

Der Leitstand sollte folgende Features aufweisen:

- Einrichtung zur Kommunikation mit allen Fahrzeugen („Schwarm“) auf dem Prüfgelände in Echtzeit.
- Bereitstellung von zentimetergenauen GNSS Korrekturdaten für alle Fahrzeuge („Moveable Objects“) zur Ermöglichung präziser und wiederholbarer Abläufe in Raum und Zeit.
- Leistungsfähige Leitstandsoftware zur Orchestrierung des Prüfablaufes inkl.
 - Schnittstellen zu allen Objekten auf dem Prüfgelände sowie zur vorgelagerten Simulation (Import von Trajektorien) und der nachgelagerten Datenauswertung und Reporterstellung (Datenexport);
 - Testvisualisierung und Sicherheitsüberwachung aller Objekte in Echtzeit, inkl. konkaver und konvexer Geo-Fences und sog. Local-Fences.
 - Behandlung von Notfallsituationen unter Verwendung einer Versuchsabbruch-Metrik
 - Bereitstellung einer skalierbaren Bewertungsmetrik für die Qualifizierung der Testergebnisse
 - Verfügbarkeit eines definierbaren Start- und Terminierungsverfahrens, z.B. Heranführen und Rückführen der Fahrzeuge automatisch an eine definierte Position (z.B. Garage).

Die Leitstandsoftware wird auf dem Leitstand ausgeführt. Dieser kann sowohl stationär installiert sein als auch alternativ als mobiles Leitstandsfahrzeug realisiert sein – zweiteres z.B., wenn Realtests nicht auf dem Prüfgelände, sondern im öffentlichen Raum durchgeführt werden sollen, etwa für Monitoring-Aufgaben, Erfassung des Verhaltens von menschlichen Fahrern in provozierten Verkehrssituationen zu Studienzwecken o.a..

Der Leitstand verteilt auch die GNSS RTK Korrekturdaten an alle Moveable Objects, damit diese mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern lokalisiert und geregelt werden können. Er ist eingebunden in die Kommunikation aller Teilnehmer, die bei Bedarf auch redundant ausgeführt werden kann durch z.B. ein WLAN Mesh Netzwerk und privates Mobilfunknetz. Auch bildet er das Interface zu sog. Indoor-VDI Tagung „Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren“, Aachen (Mai 2022)

Ortungssystemen, unter deren Einbindung auch Fahrzeugtests unter dem Einfluss von GNSS-Abschattungen und GNSS-Störungen (Jamming, Spoofing) durchgeführt werden können. Er verfügt auch über Geo-Fence- und Local-Fence-Funktionen zur Erkennung und Behandlung ungewollten Verhaltens von Fahrzeugen.

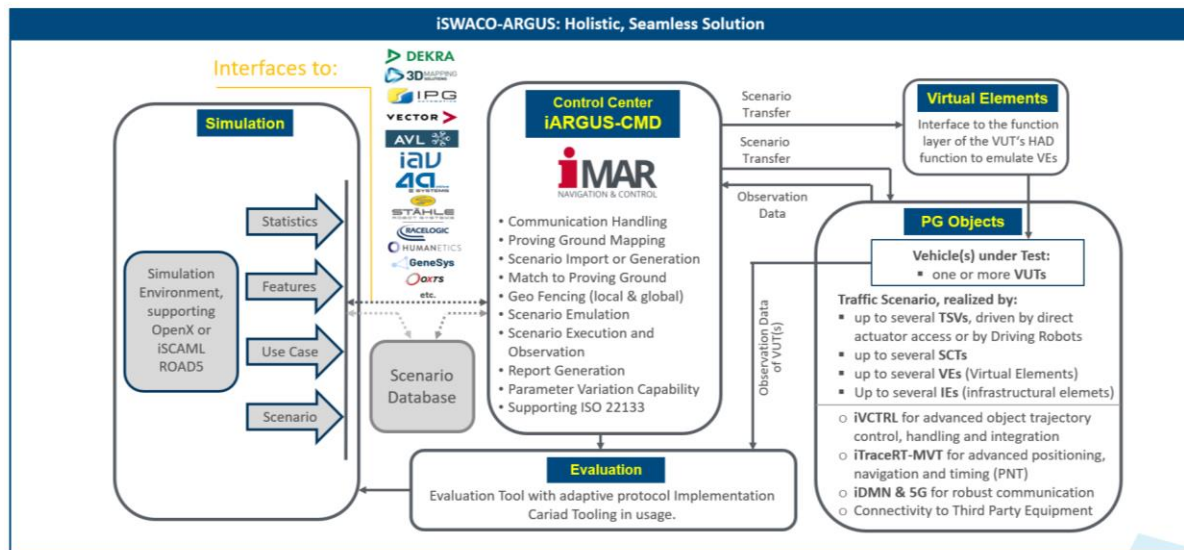
Die Leitstandsoftware bietet neben dem Testen automatisierter Fahrzeuge im szenariobasierten Kontext auch die bewährten Prüfgelände Testmethoden an, damit alle Anforderungen vom Testen mit statischen Trajektorien bis zum szenarienbasierten Testen vollautomatisierter oder autonomer Fahrzeuge mit einer einzigen ToolChain komplett gemäß den genannten Anforderungen erfüllt werden können.

Ein ganz entscheidender Aspekt für eine effiziente Nutzung einer solchen Tool-Kette ist die Kompatibilität zu auf dem Prüfgelände ggf. bereits vorhandener Infrastruktur und vorhandenem Testequipment. Dazu zählt die Bereitstellung von Schnittstellen zur Regelung sog. „Moveable Objects“ wie z.B. für Lenkroboter oder Soft Crash Targets quasi beliebiger Hersteller, die oft bereits schon auf den Prüfgeländen vorhanden sind. Ebenso zählt hierzu die Einbindung sog. virtueller Objekte, auch als virtuelle Elemente (VE) bezeichnet, oder die Konnektivität zu Lichtzeitanlagen oder Umweltsimulationsanlagen (z.B. das Ein-/Ausschalten von Windgeneratoren oder Bewässerungseinrichtungen in Abhängigkeit von der Testausführung, in der ISO 22133 als Infrastruktur-Elemente bezeichnet; IE). Die Orchestrierung der genannten Objekte gemäß Szenario, auch und gerade bei einer hohen Objektdichte und komplexen Szenarien im Schwarm, ist wesentlicher Bestandteil des zentralen Leitstandes im Zusammenspiel mit einer dezentralen Intelligenz, die auf den beteiligten Objekten lokalisiert ist.

Ferner muss eine entsprechende ToolChain für das gesamtheitliche effektive Testen in Realumgebung nahtlose Schnittstellen zu entsprechenden Simulations-Tools, zu Szenario-Testdatenbanken und zu entsprechenden Datenanalyse-Tools zur Auswertung der erhaltenen Daten aus dem Realtest und Validierung der Simulationsergebnisse aufweisen. Als Beschreibungsform eines Verkehrsszenarios auf dem Prüfgelände wird in der ISO 22133 [DRAFT] neben dem Standard OpenSCENARIO 2.0 [DRAFT] insbesondere die Metasprache iSCAML zur Beschreibung auch sehr komplexer Szenarien genannt.

Das folgende Diagramm zeigt die ganzheitliche iSWACO-ARGUS ToolChain mit der Leitstand-Software iARGUS-CMD und der Anbindung an diverse Komponenten und Arbeitsumgebungen.

Testen auf dem Prüfgelände bis SAE Level 5
iSWACO-ARGUS: „Schwarmregelung, dokumentiert mit Argus-Augen“



Realszenarien-Testen von automatisierten Fahrfunktionen | Dr.-Ing. Sebastian Siegl, CARIAD SE | Dr.-Ing. Edgar v. Hinüber, iMAR Navigation GmbH

12

Abbildung 4: Nahtlose Einbindung der Leitsandsoftware iARGUS-CMD im Kontext der Prüfgeländeautomatisierung iSWACO-ARGUS

Auf der linken Seite der Abbildung 4 erkennt man die Übergabe des auszuführenden Szenarios aus der Simulation im Format iSCAML oder OpenScenario 2.0 oder einer anderen geeigneten Szenarienbeschreibungssprache. iSCAML wurde von iMAR entwickelt, ist seit mehreren Jahren im Feldeinsatz und wird heute bereits von diversen führenden Anbietern von Lenkrobotern, Soft-Crash-Targets, Virtuellen Elementen und Simulations-Tools eingesetzt. Die Standardisierung ist noch für 2022 als Anlage zur ISO 22133 avisiert. Im rechten Teil der Abbildung sieht man die messtechnische Umsetzung auf dem Prüfgelände inkl. der Lokalisierung der Objekte (iTraceRT-MVT, sog. INS/GNSS Systeme, „Moveable Objects“, „Virtual Elements“ usw.), im mittleren unteren Teil der Abbildung erkennt man die Auswertung der erhaltenen Messdaten aller Objekte sowie die optionale Rückführung der Messergebnisse in die Simulation. Zentral in der Mitte der Abbildung ist der Leitstand mit seiner Leitstandsoftware iARGUS-CMD zur gesamtheitlichen Durchführung des Realtests auf dem Prüfgelände verortet.

Das folgende Bild zeigt den Sachverhalt aus Komponentensicht und hiermit verbunden die offene Kommunikationsfähigkeit der ToolChain iSWACO-ARGUS mit externen Komponenten:

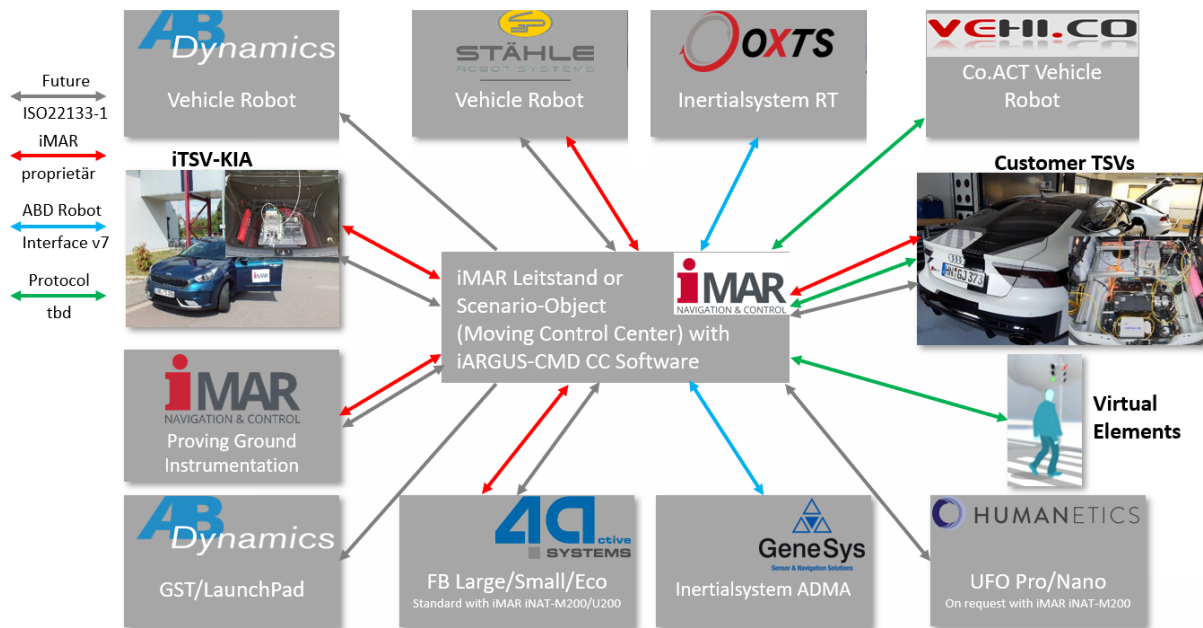


Abbildung 5: Leitstand als zentrale Einheit mit exemplarischer Darstellung der Anbindungen von Testentitäten

c. Anforderungen an den Testablauf

Zur effizienten Ausnutzung eines Prüfgeländes ist es vorteilhaft, wenn mehrere Tests sequenziell auf diesem ausgeführt werden können. Insb. wenn dasselbe VUT mehrere unterschiedliche Tests in Folge absolvieren soll, wie dies u.a. bei der Homologation von automatisierten Fahrzeugen gewünscht ist, muss ein sequenzieller Testablauf unterstützt werden: Das VUT wird automatisiert vom Parkplatz in den Bereich A des Prüfgeländes geführt und durchläuft dort den ersten Test. Dann wird es automatisiert in den Bereich B des Prüfgeländes überführt, wo es sich dem nächsten Test unterziehen muss usw. Nach Testdurchlauf wird das Testumfeld automatisiert zurück in die Ausgangslage versetzt, damit nahtlos ein weiterer Testdurchlauf stattfinden kann. Währenddessen wird das VUT automatisiert zum Parkplatz zurückgeführt.

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist eine offene Systemarchitektur der Tool-Kette, damit es möglich ist, vom nicht-szenarienbasierten Testen (klassischer Euro NCAP-Test) bis zum hochkomplexen szenarienbasierten Testen alle Anwendungen zukunftssicher mit derselben ToolChain zu bedienen. Darüber hinaus wird die Anbindung an eine digitale Karte mit Fahrspurrepräsentation im de-facto Standard OpenDrive, die kontextabhängige Online-Trajektorienplanung für alle beteiligten Fahrzeuge im Test und insb. auch die Fähigkeit der ToolChain, aus bekannten Simulationsformaten wie z.B. OpenScenario oder iSCAML das für das Prüfgelände ausführbare Szenario automatisiert zu generieren, vorausgesetzt. Auch diese Anforderungen werden durch iSWACO-ARGUS erfüllt.

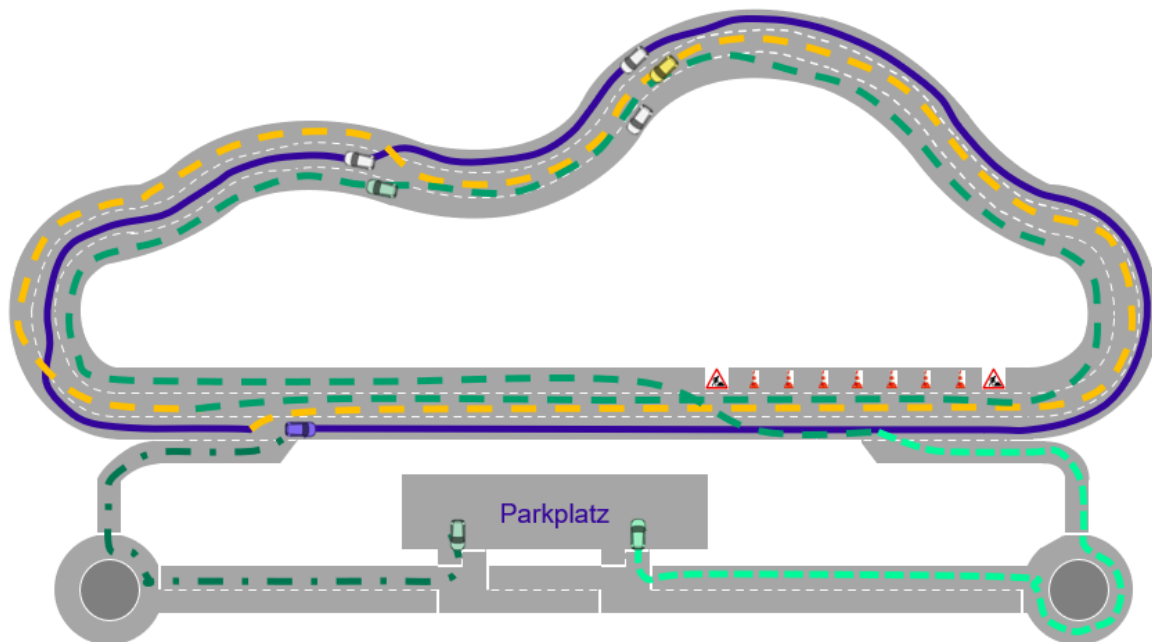


Abbildung 6: Sequenzieller Testablauf: Anfahrt - Szenario 1 - Szenario 2 – Szenario x - Rückfahrt

- . - . Anfahrt zur Teststrecke
- Testszenario 1 (Runde 1)
- - - - Testszenario 2 (Runde 2)
- - - - Testszenario x (Runde x)
- - - - Abfahrt von der Teststrecke

d. Anforderungen an die „Moving Objects“

Als Moving Objects (Bezeichnung gemäß ISO 22133) werden alle bewegbaren Fahrzeuge und Objekte auf dem Prüfgelände bezeichnet. Eine geeignete Schnittstelle erlaubt die direkte Anbindung der Objekte an die Leitstandsoftware. Es werden auch Objekte unterstützt, die noch nicht dem Standard ISO 22133 folgen. Beispiele hierfür sind spezifische Fahrzeuge des Anwenders oder etwa der [ITSV-KIA \(www.imar-navigation.de\)](http://www.imar-navigation.de). Dabei ist kein Lenkroboter erforderlich, wenn direkt die Aktuatoren des Fahrzeugs durch die Regeleinheit iVCTRL von iMAR angesteuert werden können. Die Ist-Trajektorie wird dabei durch das Inertial/GNSS-Messsystem iTraceRT-MVT-200 in Echtzeit erfasst und an die Regeleinheit übergeben. Solche Fahrzeuge stellen eine kostengünstige Alternative zu den sog. Soft Crash Targets dar, aber natürlich mit einer höheren Gefahr von Schäden an TSV und VUT im Falle einer Kollision - allerdings mit dem Vorteil, dass mit derartigen TSVs mit > 130 km/h auch Geschwindigkeiten realisiert werden können, die mit einem SCT aufgrund der erforderlichen Überfahrbarkeit notwendigen geringen Bodenfreiheit und dadurch bedingten kleinen Raddurchmesser nicht möglich sind. Mit dieser Technologie kann jedes andere OEM Fahrzeug als Traffic Simulation Vehicle eingesetzt werden, vorausgesetzt die entsprechenden Aktuatoren-Schnittstellen stehen zur Verfügung.

Stehen die internen Fahrzeugaktuatoren nicht zur Verfügung, kann ein Fahrroboter eingesetzt werden. Es gibt diverse Produkte am Markt, beispielhaft ist die Ansteuerung eines Stähle Roboters an den iARGUS-CMD Leitstand in Abbildung 1 gezeigt.

e. Anforderungen an die Kommunikation

Die Verfügbarkeit einer zuverlässigen Kommunikation zwischen Leitstand und allen Objekten sowie zwischen den Objekten untereinander sind essenziell für die effiziente Durchführung von Realtests auf dem Prüfgelände. Hierzu ist eine entsprechende Redundanz vorteilhaft, die durch den Leitstand unterstützt werden muss. Ein WLAN-basiertes Mesh-Netzwerk (iDMN) kann hier mit einem 5G Campusnetzwerk kombiniert werden. Die Erläuterung von Details würde im Rahmen dieser Übersichtsdarstellung zu weit führen. Aktuelle und zukünftige Themenfelder befassen sich hier u.a. mit Fragestellungen bezüglich Best-Routing in einem 5G-WLAN Mischbetrieb oder der Kommunikationssicherheit in Campus- und (halb-) öffentlichen Netzwerken.

f. Anforderungen an die Testdurchführung

Die Durchführung des Realtests wird durch die verfügbare ToolChain für den Anwender möglichst einfach gehalten. Die ToolChain ist bewusst derart ausgelegt, dass auch angelernte Kräfte (d.h. Fachkräfte ohne tiefes Spezialwissen) die Realtests auf dem Prüfgelände instrumentieren und durchführen können. Hierzu wurden mehrjährige Erfahrungen umfangreicher Testkampagnen auf verschiedenen Prüfgeländen zur kontinuierlichen Weiterentwicklung der ToolChain iSWACO-ARGUS einbezogen.

Das folgende Diagramm zeigt den Ablauf eines Realtests auf dem Prüfgelände. Dabei führt die ToolChain iSWACO-ARGUS den Anwender durch einen Ablauf, der sicherstellt, dass alle erforderlichen und umfangreich automatisierten Prüfungen von Trajektorienplanung, Testfahrzeugen, Lokalisierungs- und Regelsystemen, Definition von Geofences sowie der funkbasierten Datenkommunikation erfolgreich durchgeführt worden sind, bevor der Test auf dem Prüfgelände real ausgeführt wird.

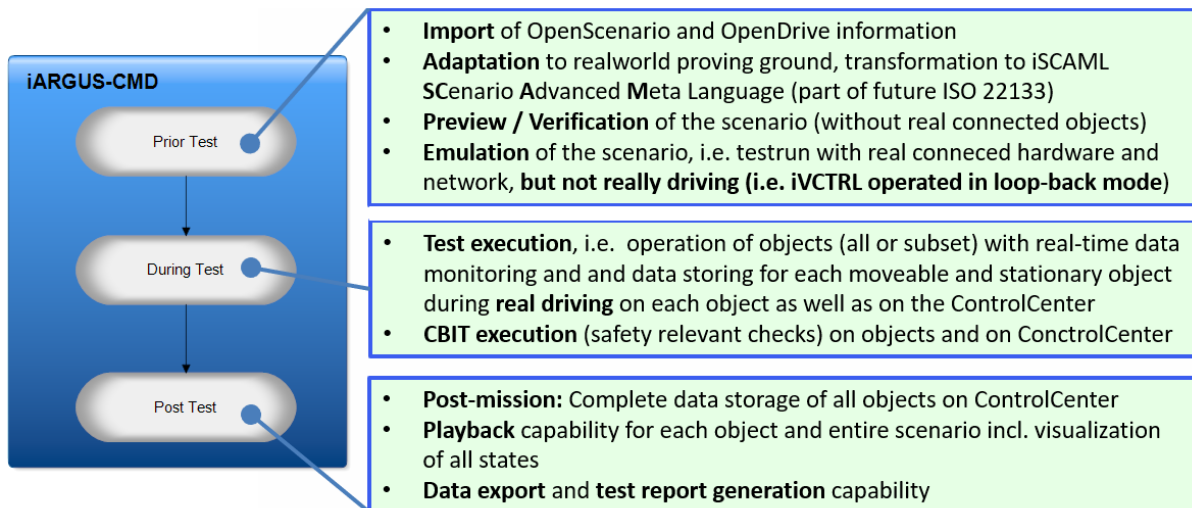


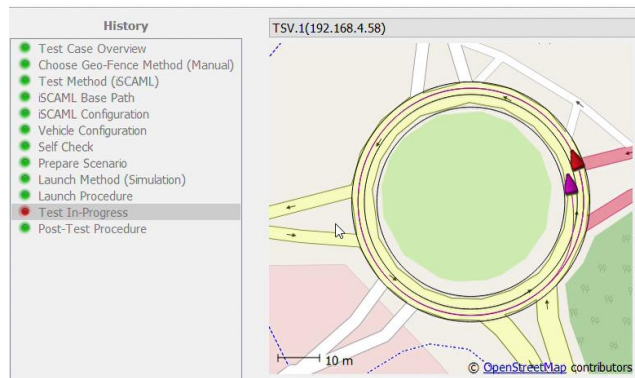
Abbildung 7: Dreistufiger Ablauf des Realtests auf dem Prüfgelände

5. Beispielhafte Szenarien

Exemplarisch werden mehrere komplexe Testszenarien unter der Einbindung von mehreren Fahrrobotern, SCTs und TSVs erläutert, um den Umfang der angesteuerten Objekte der vorgestellten Testmethode und Toolkette aufzuzeigen.

a. Spurwechsel im Kreisverkehr mit variablen Geschwindigkeiten des VUT

Es handelt sich um ein Szenario in einem Kreisverkehr, und zwar mit mehreren Spuren, auf denen verschiedene Teilnehmer nach individuell festgelegten sog. Trigger-Action Bedingungen in Abhängigkeit voneinander und vom Verhalten des VUT ihre Geschwindigkeiten ändern, anpassen und/oder Spurwechselmanöver durchführen. Der Leitstand kann stationär aufgebaut sein oder mobil, d.h. in einem der teilnehmenden Fahrzeuge mitfahren. Dieses Beispiel macht besonders deutlich, warum eine in den einzelnen Objekten lokal verteilte Trajektorienplanungs-Intelligenz so wichtig ist, da durch die physikalische Nähe der Fahrzeuge untereinander bei höheren Geschwindigkeiten nur eine direkte Kommunikation der Fahrzeuge untereinander eine hinreichend gute Abstimmung zwischen den Fahrzeugen mit geringen Latenzen sicherstellen kann.



Kurzbeschreibung Szenario:

Das VUT triggert den Beginn des Szenarios, sobald $v_{VUT} > 0$ m/s. Mit diesem Trigger beschleunigt das TSV von v_0 auf die festgelegte Geschwindigkeit v_{TSV} . Es gilt $v_{TSV} > v_{VUT}$.

Das schnellere TSV erhält mit Erreichen eines festgelegten Abstandes zum VUT einen Trigger zum Ausscheren und Überholen.

Wiederum nach einem definierten Abstand schert das TSV vor dem VUT ein.

Das Szenario kann beliebig oft gefahren werden. Es enthält keine ortsfesten Abhängigkeiten, sodass sowohl der Ausschervorgang als auch der Einschervorgang an einer beliebigen Stelle stattfinden können, abhängig davon, mit welcher Geschwindigkeit sich das VUT zur jeweiligen Zeit bewegt.

b. Automatisierte Fahrfunktion: Einscherer aufgrund von Spurverengung wegen einer Baustelle

Prüfung der Reaktion des VUT in Abhängigkeit des Einschierens eines Fahrzeugs aufgrund einer Engstelle auf der Autobahn.

Ausgangssituation:

- VUT: Pkw mit HAF Funktion und Fahrroboter (lokalisiert und geführt über iSWACO-ARGUS)
- TSV#1: Pkw als Traffic Support Vehicle (Realfahrzeug, über iSWACO-ARGUS geregelt)
- TSV#2: Pkw als Traffic Support Vehicle (Realfahrzeug, über iSWACO-ARGUS geregelt)
- TSV#3: Lkw als Traffic Support Vehicle mit Fahrroboter (Realfahrzeug, über iSWACO-ARGUS geregelt)
- SCT: Soft Crash Target (über iSWACO-ARGUS geregelt)

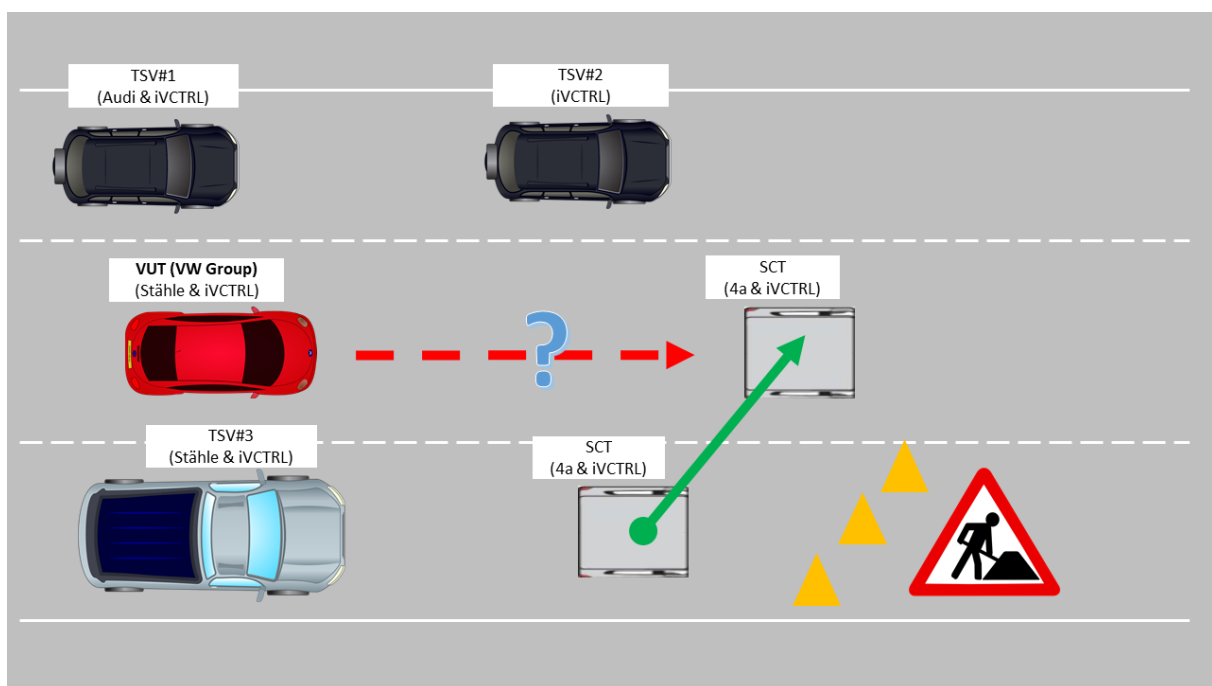


Abbildung 8: Autobahnszenario mit Engstelle und Ausscherer

Ablauf (Szenario):

- Alle Entitäten fahren von der Werkstatt automatisiert zum Szenario-Startpunkt
- Mit dem Start-Trigger, ausgelöst vom VUT mit $V_0 > 0\text{m/s}$, bewegen sich alle Entitäten auf den in OpenDrive definierten Fahrspuren (gerade oder gekrümmt).
- Ausgelöst durch das Ereignis „Minimal-Distanztrigger“ des SCT zur Baustelle, wird der Einscheerer nach links durchgeführt, auf den das VUT reagieren muss.
- Die beiden TSVs begleiten das VUT geschwindigkeitsabhängig mit der „elektronischen Deichsel“ Funktion derart, dass das VUT nicht nach links ausweichen kann.

c. Prüfung eines Cut-out auf der Autobahn:

Es handelt sich um ein Manöver, bei dem ein TSV auf der Autobahn vor dem VUT fährt und stets, wenn das VUT zum Überholvorgang ansetzt, einen Spurwechsel derart vollzieht, dass das VUT nicht passieren kann. Die automatisierte Fahrfunktion des VUT soll auf die Situation angemessen reagieren.



Abbildung 9: Szenariobasierte Prüfung der automatisierten Fahrfunktion des VUT - Aktion des TSV in Abhängigkeit des Überholversuchs des VUT

Das Video, welches dieses Szenario zeigt, ist unter YouTube zu finden: <https://youtu.be/nrylSXN9j3Y>

6. Zusammenfassung, Ausblick und Danksagung

Es wurde die Methodik zum Testen von automatisierten Fahrfunktionen basierend auf Szenarien, Trajektorien und Triggern vorgestellt. Dabei wurden die Anforderungen an eine Prüfgelände-Instrumentierung wie eine Anbindbarkeit von Realfahrzeugen sowie marktbekannten Plattformen sowie Robotersystemen mit offenen Schnittstellen (z.B. ISO 22133) sowie die Notwendigkeit zur Verzahnung mit VDI Tagung „Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren“, Aachen (Mai 2022)

Simulations- und Auswerte-Tools vorgestellt und der Erfüllungsgrad durch die Prüfgelände-Implementierung iSWACO-ARGUS beispielhaft dargestellt. Es wurde erläutert, wie CARIAD SE / AUDI AG die Methodik und Toolkette für das szenarienbasierte Testen gemeinsam mit iMAR Navigation kontinuierlich weiterentwickeln und erprobt haben.

Es wurde gezeigt, dass die Weiterentwicklung der PEGASUS-Ideen durch einen kontinuierlichen Entwicklungs- und Erprobungsprozess bis zur Anwendbarkeit der Tool-Kette iSWACO-ARGUS in der Serienentwicklung und zum entwicklungsbegleitenden Test von automatisierten Fahrfunktionen umgesetzt worden ist. Die dabei zugrunde liegende Systemarchitektur erlaubt es, auch zukünftig als erforderlich angesehene Eigenschaften der ToolChain effizient zu implementieren und zu integrieren.

Die Autoren danken neben allen beteiligten Kolleg*innen in den eigenen Häusern insbesondere auch den Teams der DEKRA und der TRIWO für die gute Zusammenarbeit und die Erfahrungsberichte zur Weiterentwicklung der vorgestellten ToolChain an die Bedürfnisse der Anwender.

7. Linksammlung:

- Verordnung des Bundesverkehrsministeriums vom 24.02.2022 zur Validierung automatisierter Fahrzeuge:
<https://dip.bundestag.de/vorgang/verordnung-zur-regelung-des-betriebs-von-kraftfahrzeugen-mit-automatisierter-und/284831>
- PEGASUS-Projekt: Abschlussbericht 2019:
<https://www.pegasusprojekt.de/de/information-material>
- iSWACO-ARGUS ToolChain zum Validieren der Fahrfunktionen automatisierter Fahrzeuge:
<https://www.imar-navigation.de/de/produkte-uebersicht/product-overview-by-product/item/is-waco-argus-proving-ground-infrastructure-for-testing-vehicles-up-to-sae-level-5>