Schlussbericht für das Gesamtprojekt

PEGASUS

Projekt zur **E**tablierung von **g**enerell **a**kzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie **S**zenarien **u**nd **S**ituationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen

Laufzeit: 01.01.2016 – 30.06.2019

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert.

Version: 1.0

Stand: 28.02.2020

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

PEGASUS-Projektpartner:

- Audi AG
- ADC Automotive Distance Control Systems GmbH
- BMW Group
- Continental Teves AG & Co. oHG
- Daimler AG
- Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH, Aachen (fka)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
- iMAR Navigation GmbH
- IPG Automotive GmbH
- Opel Automobile GmbH
- QTronic GmbH
- Robert Bosch GmbH
- Technische Universität Darmstadt – Automotive Engineering (FZD)
- TraceTronic GmbH
- TÜV SÜD Auto Service GmbH
- VIRES Simulationstechnologie GmbH
- Volkswagen AG

0 Zusammenfassung

Auf dem Weg zu einem neuen ganzheitlichen Verkehrssystem werden in das automatisierte Fahren große Erwartungen gesteckt. Denn es soll denn Verkehr effizienter, sicherer und zugleich komfortabler machen und spielt damit eine .entscheidende Rolle.

Dabei ist die Grundfunktionalität zum automatisierten Fahren heute technisch bereits erarbeitet und wird in verschiedenen Prototypenanwendungen aktuell auf den Straßen demonstriert. Dabei resultieren bei höheren Automatisierungsgraden hohe Anforderungen an Güte und Qualität des Systemverhaltens, da die Rückfallebene Mensch entfällt. Entsprechend entstehen für die Freigabe und Zulassung von Seriensystemen neue Anforderungen in Bezug auf Güte und Qualität.

Das BMWi-geförderte Forschungsprojekt PEGASUS (**P**rojekt zur **E**tablierung von **g**enerell **a**kzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie **S**zenarien **u**nd **S**ituationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen) hat sich zum Ziel gesetzt eine einheitliche Methode zur Absicherung von hochautomatisierten Fahrfunktionen zu erarbeiten, die eine essenzielle Fragestellung beantworten soll: „Wie gut ist gut genug und wie weise ich dies nach?“

Dabei wurden vier wesentliche Ziele definiert:

- Definition eines einheitlichen Vorgehens beim Testen und Erproben automatisierter Fahrzeugsysteme in der Simulation, auf Prüfständen und in realen Umgebungen.
- Entwicklung einer durchgängigen und flexiblen Werkzeugkette zur Absicherung des automatisierten Fahrens.
- Integration der Tests in die Entwicklungsprozesse bereits zu einem frühen Zeitpunkt.
- Schaffung einer herstellerübergreifenden Methode zur Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen.

In dem Projekt PEGASUS, an dem 17 Projektpartner aus Industrie und Wissenschaft beteiligt waren, wurden ausgehend von den übergeordneten Fragestellungen Einzelfragestellungen für verschiedene Bereiche abgeleitet und so die zentralen Elemente einer Werkzeugkette zur Absicherung automatisierter Fahrzeuge konzipiert, entwickelt und beispielhaft demonstriert. Dabei wurde darauf wertgelegt, dass das bislang herstellerspezifische Vorgehen zur Erprobung und Absicherung von Assistenzfunktionen in ein neues generelles Vorgehen überführt wurde, sodass die gleichen Kriterien und Maße angelegt wurden. Essenziell war dabei die bestehenden Werkzeuge mithilfe von einheitlichen Schnittstellen zu erweitern und eine gemeinsame Grundlage für das Testen zu erstellen.

Mit der entstandenen Methode ist es dem Projekt gelungen eine Blaupause, als neuen Stand der Technik, zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen zu definieren und damit einen Beitrag für den gesamten Sicherheitsnachweis zu leisten.

Im Fokus der Arbeiten stand das anwendungsnahe Beispiel des Autobahn-Chauffeurs mit dem SAE-Level 3, mit dem Anspruch, die erzielten Ergebnisse auch auf andere Anwendungsfälle übertragen zu können.

Ausgehend von einer kontinuierlichen Diskussion auf internationaler Ebene war es PEGASUS zudem möglich auch externe Meinungen und relevante Ansätze mit in die Arbeiten einzubeziehen und die PEGASUS-Gesamtmethode als eine wichtige Ausgangsbasis für internationale Aktivitäten, wie beispielsweise der Standardisierung, einzubringen.

Mit der Fortführung der in PEGASUS gestarteten Aktivitäten innerhalb der PEGASUS-Projektfamilie, werden in den Nachfolgeprojekten SETLevel 4to5 und VV-Methoden die Ergebnisse aus PEGASUS aufgegriffen und auf weitere Anwendungsfälle und höhere Automationsgrade erweitert.

1 Übersicht

Das **P**rojekt zur **E**tablierung von **g**enerell **a**kzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie **S**zenarien **u**nd **S**ituationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen (PEGASUS) war eine gemeinschaftliche Forschungs- und Entwicklungsinitiative von Industrie und Wissenschaft und Vorhaben zielte auf die Schaffung einer allgemein akzeptierten Herangehensweise zum Testen automatisierter Fahrfunktionen ab.

Entsprechend wurden im Projekt PEGASUS Methoden (grundsätzliche Herangehensweisen und Lösungsansätze sowie geeignete Instrumente (Tools, Laborumgebungen, Testgeländebausteinen und Komponenten für Feldtests) in den Mittelpunkt des Projektes gestellt. Bei der Erarbeitung dieser Ergebnisse wurde stets berücksichtigt, dass die Ergebnisse mit bereits existierenden Standards und Entwicklungsprozesse sowie Produkt-Roadmaps der Industrie harmonieren. Die erarbeiteten Methoden wurden insbesondere im Bereich der Simulation sowie mit verschiedenen Versuchsträgern der Projektpartner praktisch demonstriert, erprobt und bewertet. So wurden die folgenden relevanten Ziele des Projektes definiert (Auszug):

- Entwicklung eines Vorgehens zur Festlegung von Auslegungskriterien
- Gestaltung des Entwicklungsprozesses zur Freigabe von hochautomatisierten Fahrzeugsystemen.
- Konzeptionierung, Aufbau und Demonstration von Bausteinen für eine effiziente Werkzeugkette für Simulation, Testgelände und Feldtest
- Einbettung der Erkenntnisse in die Industrie sowie Verbreitung der Erkenntnisse und Erfahrungen in entsprechenden Gremien zur Wegbereitung einer daran anschließenden Standardisierung

Im Projekt PEGASUS entstand erstmalig eine abgestimmte und valide Methodik sowie ein zur Umsetzung geeignetes Werkzeugportfolio bzw. Instrumentarium für das Testen automatisierter Fahrzeugfunktionen mit Bezug zur Serienentwicklung und der Fahrzeugfreigabe. Die Projektergebnisse wurden anhand praxisrelevanter, marktnaher und dennoch komplexer Referenzszenarien exemplarisch dargestellt und bewertet. Als Beispielanwendung diente der „Autobahn-Chauffeur“ mit SAE Level 3, der wissenschaftlich bereits gut untersucht ist und eine unmittelbare Praxisrelevanz für die Industriepartner besitzt. Die Funktion stellt aus diesem Grund eine für PEGASUS geeignete Startfunktion dar, die einen schnellen Einstieg in die fachliche Arbeit ermöglichte. Im laufenden Projekt wurden auf theoretischer Ebene zudem weitere Funktionen zur Validierung der Ergebnisse ergänzt, die insbesondere mit existierenden Funktions-Roadmaps der Industriepartner harmonieren.

Um die gewonnenen Ergebnisse, die unmittelbar zum Testen und zur Freigabe benötigt werden, unabhängig von der eigentlich zu prüfenden Fahrfunktion dem Bereich des Testens bereitzustellen, entstand mit der PEGASUS Gesamtmethode ein neuer Ansatz und Leitfaden zur Testvorbereitung, Testdurchführung sowie eine Schärfung der Rolle der Testwerkzeuge sowie Anforderungen an eine Datenbank für relevante Fahrsituationen und Szenarien.

Das Resultat ist ein skalierbarer, wiederverwendbarer und flexibler Ansatz zum Testen im Labor und unter Realweltbedingungen, der aussagekräftige und verlässliche Testergebnisse bei kurzen Durchlaufzeiten liefert. Die Arbeiten im Projekt waren dabei so ausgelegt, dass die weitere Nutzung der Ergebnisse auch über die Projektlaufzeit hinaus zukunftsfähig und durch alle nutzbar ist, sowie in Folgeprojekten (wie SETLevel4to5 und VV-Methoden) genutzt und ergänzt werden kann. Hiermit wurde ein effektiver Beitrag geleistet, der ein flexibles Testen einer Fahrfunktion ermöglicht.

Dabei wurde großer Wer auf die Ausdehnung des simulationsbasierten Testens gelegt, um das Testen auch bereits zu einem frühen Zeitpunkt in Entwicklungsprozesse zu integrieren und den Aufwand (insbesondere bezogen auf die benötigte Zeit) für die Gesamtabsicherung automatisierter Fahrzeuge bis zu deren Freigabe gering zu halten.

Um eine Blaupause sowie eine Werkzeugkette zum effizienten und hinreichendes Testen von hochautomatisierten Fahrfunktionen (HAF) zu erstellen, sind verschiedene Funktionsbausteinen notwendig. Dabei zielen alle Bausteine auf die Schaffung von Grundlagen sowie umsetzbaren Prüfprozeduren, die insbesondere in der Simulation bzw. im Labor abbildbar sein sollen. Denn der Fokus der Tests liegt klar auf der Simulation, mit dem Ziel die notwendigen „Freifahr-Kilometer“ im öffentlichen Raum signifikant zu reduzieren. Dabei wurde die Werkzeugkette nicht nur konzipiert, sondern auch anhand realer Testdurchläufe im Labor, auf dem Prüfgelände und im realen Verkehr exemplarisch durchlaufen und demonstriert.

Strukturiert wurden die Arbeitsabläufe in den vier Teilprojekten (TP) „Szenarienanalyse und Qualitätsmaße“, „Umsetzungsprozesse“, „Testen“, „Ergebnisreflexion und Einbettung“ sowie dem Projektmanagement. Dabei waren Teilprojekte eng miteinander vernetzt und griffen wechselseitig auf die Teilergebnisse der anderen Teilprojekte auf.

TP 1 Szenarienanalyse und Qualitätsmaße

Die Entwicklung eines erfolgreichen Vorgehens zum Testen von HAF-Funktionen beruht auf der Analyse der zu testenden Szenarien sowie der Definition geeigneter Kriterien und Maße zur Beurteilung der Qualität. Sollen Prozesse, Methoden und Werkzeuge anhand von Anwendungsfällen erprobt und evaluiert werden, die selbst aber noch Gegenstand der Forschung und Entwicklung sind, so können im Allgemeinen schwer Qualitätsmaßstäbe hierfür definiert werden. Deshalb baut PEGASUS auf dem zukunftsnahen Szenario Autobahn-Chauffeur auf.

Diese Funktion wird in TP 1 aufgegriffen, gezielt erweitert und konkretisiert. Das Ergebnis ist ein umfassendes Szenario für ein hochautomatisiertes Fahrzeug auf der Autobahn. Die Arbeitsergebnisse stützen sich dabei nicht nur auf technische Analysen, sondern beruhen auch auf Erkenntnissen aus menschzentrierten Untersuchungen sowie Realdaten. Mit der Entwicklung einer entsprechenden Methodik und Kriterien wurden Qualitäts- und Gütemaße als Basis für das weitere Testen abgeleitet.

Mit der Betrachtung weiterer Szenarien im Bereich von Landstraßen, wurde die theoretische Übertragbarkeit des PEGASUS-Ansatzes stichpunktartig geprüft, sodass ein skalierbares Vorgehen für weitere Anwendungssituationen und Fahrzeugfunktionen entstanden ist.

TP 2 Umsetzungsprozesse

Die Identifikation und Erstellung möglichst allgemeingültiger Entwicklungs- sowie Testprozesse lag als Querschnittsthema im Fokus des TP 2. Ausgehend von den Kriterien und Maßen aus TP 1 erfolgte die Analyse des Modifikationsbedarfes existierender Kriterien, Metriken und Prozesse (u.a. beim Nachweis der funktionalen Sicherheit) wie sie bereits in der Automobilindustrie etabliert sind. Ergänzend erfolgte im Zusammenwirken mit TP 1 eine Betrachtung innovativer Ansätze und Konzepte zur Analyse neuartiger Automatisierungssysteme. Die erarbeiteten Umsetzungsprozesse harmonieren dabei dem schrittweisen Vorgehen des automobilen Entwicklungsprozesses im Rahmen des V-Modells Rechnung und bieten eine ausreichende Flexibilität für individuelle Prozesse. Zudem müssen sie auch ausreichend robust für den Einsatz im Rahmen der Serienentwicklung sein. Eine diesbezügliche Schärfung der Ansätze erfolgte u.a. durch das Einbeziehen von Rückkopplungsschleifen bzw. entsprechenden Ebenen im V-Modell.

TP 3 Testen

Innerhalb des TP 3 kommt es zu der eigentlichen Umsetzung der Testaufgaben mit Hilfe von konkreten Testmethoden und Testverfahren für die Bereiche Simulation/Labore/Prüfstände, Prüfgelände und Feldtest. Es wird dabei auf den im TP 1 erhobenen Daten aufgesetzt, die u.a. nach Auftretenswahrscheinlichkeit und Gefahrenpotential, wie bspw. TTC (time to collision) klassifiziert sind.

Der Nachweis, dass diese Situationen hinreichend sicher beherrscht werden, wird dabei mit den erarbeiteten Testmethoden, -verfahren und realen Erprobungen geführt. Für die Bewertung, ob die Beherrschung „hinreichend sicher“ ist, wird auf Kriterien und Maße zurückgegriffen, die u.a. in TP 1 ermittelt wurden. Weiterhin fließen Erkenntnisse aus TP 2 ein, welche insbesondere die zusätzlichen, aus der Automatisierung entstehenden besonderen Prüfaufgaben definieren. Bei der Festlegung der Prüfumfänge wurde eine Methodik entwickelt, die festlegt welche Tests im Labor durch Simulation (HIL, SIL) durchgeführt werden können, welche am Fahrzeug auf dem Prüfgelände durchgeführt werden und welche durch Absicherung im Feld umgesetzt werden müssen. Durch die Verknüpfung von Simulation und Prüfgelände wird eine Verifikation und Validierung der einzelnen Ergebnisse ermöglicht.

TP 4 Ergebnisreflexion und Einbettung

Das TP 4 Ergebnisreflexion und Einbettung wurde in zwei Phasen aufgeteilt, die in unterschiedlichen Abschnitten das Projekt begleitet haben. Mit der Ergebnisreflexion erfolgte parallel zu den anderen Teilprojekten eine kontinuierliche kritische Beleuchtung der Arbeitsergebnisse. Damit konnte aktiv ein unabhängiges Feedback in die Teilprojekte gegeben werden. Mit der abschließenden Bewertung zum Projektende wurden zudem die Weichen zur dauerhaften Einbettung der PEGASUS-Methode, bzw. einzelner Schritte in die Unternehmen unterstützt.

1.1 Aufgabenstellung

Heute auf dem Markt verfügbare Assistenzsysteme greifen zumeist punktuell in das Fahrgeschehen ein und unterstützten den Fahrer bei seiner Fahraufgabe. Dabei sind die Vorgehen zur Auslegung und Validierung oftmals stark herstellerspezifisch und Normen und Richtlinien, die entstehen oftmals erst nach der Markteinführung. Dabei wird oftmals anhand spezifischer Einzeltests die korrekte Quasi-Funktionalität bescheinigt. Für die nächste Generation, das automatisierte Fahren mit einer kontinuierlich mitregelnden Funktion, bei der sich der Fahrer auch anderen Tätigkeiten widmen kann, ist jedoch bereits vor Markteinführung ein allgemeingültiges, akzeptiertes und einheitliches Bewertungsschema und entsprechendes Vorgehen zum Testen und zur Freigabe notwendig. Dies existierte zum Projektstart sowie auch aktuell nicht.

Die deutsche Automobilindustrie und relevante wissenschaftliche Einrichtungen waren sich einig, dass ein solches Vorgehen nur gemeinsam erarbeitet werden kann. So war es das Ziel mit PEGASUS ein neuer Stand der Technik zur Absicherung von hochautomatisierten Fahrzeugen erreicht werden. Mit der geplanten Einführung höherer Automatisierungsgrade entsteht eine steigende Verantwortlichkeit (Haftung) der Hersteller. Auch hier kann ein allgemein akzeptierter und genutzter Ansatz zum Testen und zur Freigabe helfen, Schadensfälle eindeutig zu klären.

Doch was umfasst ein gemeinschaftlich hinreichendes und akzeptiertes Vorgehen zum Testen und zur Freigabe? Die Arbeit in PEGASUS beginnt mit der systematische Erstellung eines Lastenheftes anhand einer naheliegenden Beispielanwendung, dem sogenannten Autobahn-Chauffeur. Auf Basis des 4-Ebenen-Modells (Straßennetzwerk, Situationsspezifische Anpassungen, Dynamische Objekte, Umwelteinflüsse) sollten Analysen von potentiell kritischen Verkehrssituationen für den Autobahn-Chauffeur abgeleitet werden. Hierzu sollten Unfalldatenbanken, FOT sowie NDS genutzt wie auch Simulator- und Fahrzeugstudien durchgeführt werden. Das Projekt hatte die Aufgabe allgemeingültige Ansätze zur Bestimmung der Kritikalität und weiterer möglicher Kriterien Verkehrssituationen zu clustern, zu bewerten und diese entstehenden Metriken auf die verfügbaren Daten anzuwenden.

Aufbauend auf bestehenden Prozessen und Vorgaben sollte eine einheitliche und herstellerunabhängige Empfehlung zur Prozessgestaltung als Rahmenbedingungen für ein umfängliches Testen automatisierter Systeme durch PEGASUS erarbeitet werden, welche die Bereitstellung gemeinschaftlich getragener und verbindlicher Richtlinien fördert. Denn ohne diese

erscheint die zeitnahe Einführung von HAF-Funktionen im öffentlichen Straßenraum nicht möglich.

Für das eigentliche Testen sollte das Projekt eine Klärung der Grenzen der Anwendbarkeit von simulativer Absicherung erarbeiten und herausstellen, wie Instanzen im Bereich der Prüfgelände- und Realerprobung die Ergebnisse aus der Simulation verifizieren können. Ergänzend sollte eine Argumentation bzw. der Prozess zur Auswahl der jeweils passenden bzw. notwendigen Testmethode (Simulation/Labor, Prüfgelände, Feldtest) für verschiedene Szenarien und deren Zusammenspiel mit anderen Testmethoden erarbeitet werden. Alle Schritte sollten dabei exemplarisch abgebildet und durchgeführt werden.

Dazu war gefordert die Testspezifikationen herstellerunabhängig zu gestalten, sodass eine vereinheitlichte Testauswertung ermöglicht wird. Das Ergebnis sollte ein generischer Ansatz zur Absicherung von HAF-Funktionen auch unter komplexen Umgebungs- und Verkehrsbedingungen sein. Somit sollten mit PEGASZS neue innovative Ansätze insbesondere in Simulationen und Laboren erarbeitet werden, die ein effizientes Testen ermöglichen und Produkte in kurzer Zeit bei geringeren Kosten mit hoher Qualität für den Markt zu entwickeln.

Die Ergebnisse von PEGASUS sollen einen neuen Stand der Technik zur Absicherung von hochautomatisierten Fahrfunktionen darstellen, der gemeinschaftlich erarbeitet und durch alle Partner getragen wird.

Mit den Ergebnissen aus PEGASUS sollte damit erstmalig ein Vorgehen entstehen, das den Sicherheitsnachweis hochautomatisierter Fahrfunktionen ermöglicht werden, welches eine essenzielle Grundvoraussetzung für die Einführung hochautomatisierter Fahrzeuge im Markt darstellt.

Um die Ergebnisse aus dem Forschungs- und Entwicklungsprojekt möglichst bruchlos und dauerhaft in die einzelnen Unternehmen zu überführen, sollte ein Vorgehen erarbeitet werden, welches die Ergebnisse projektbegleitend reflektiert und bei der Einbettung der Ergebnisse unterstützt.

1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Durch die Expertise der beteiligten Verbundpartner entstand die Möglichkeit ein durchgängiges Testkonzept für hochautomatisierte Fahrfunktionen zu erarbeiten und somit einen neuen Stand der Technik zu erzielen. Das Konsortium setzte sich dabei aus allen relevanten nationalen Bereichen, wie Fahrzeugherstellern (OEM), Zulieferern (hier Tier 1), innovativen kleinen und mittelständigen Unternehmen (KMU), einer Prüforganisation sowie wissenschaftlichen Einrichtungen zusammen.

Die Rollen- und Aufgabenverteilung zwischen den beteiligten Unternehmenstypen lässt sich wie folgt aufteilen:

Tabelle 1 Überblick über Unternehmenstyp und Rolle im Projekt

Unternehmenstyp	Rolle / Hauptaufgabe
OEM	Die Ergebnisse aus PEGASUS sollen eine sichere und effiziente Erprobung von HAF-Funktionalitäten ermöglichen. Die Erarbeitung eines geeigneten Vorgehens, die Definition von durchzuführenden Prozessen, sowie die Durchführung von Testdurchläufen in den Bereichen Simulation/Labor, Prüfgelände sowie Feldabsicherung sind dabei die Fokusthemen der OEM, um freigabefähige Produkte zu ermöglichen.
Tier 1	Die Automobilzulieferer liefern und testen Komponenten sowie Funktionen für Automatisierungssysteme, die im Einklang mit dem Gesamtfahrzeug stehen müssen. Diese Einzelelemente haben einen hohen Einfluss auf die Prüfergebnisse der Fahrfunktion sowie auf das Gesamtfahrzeug. Für eine effiziente Auslegung der Produkte und Dienstleistungen der Fahrzeugzulieferer müssen diese Produkte eng mit den OEM-Tests gekoppelt werden.
Technische Prüforganisation	Eine Prüforganisation bringt zusätzlich zur Umsetzung der Testaspekte, eine neutrale und OEM-unabhängige Begutachtung/Betrachtung unter gesellschaftlichen und kundenspezifischen Aspekten in das Projekt PEGASUS ein.
KMU	Die am Projekt PEGASUS beteiligten KMU liefern insbesondere für den Bereich Test und Erprobung eine Vielzahl von Tools und Werkzeugen für die Automobilindustrie, die dort in bestehenden Werkzeugketten zum Tragen kommen. Diese Tools und Werkzeuge werden im Projekt genutzt und erweitert, um das Testen von hochautomatisierten Fahrfunktionen durchzuführen.
Forschung	Im Projekt PEGASUS müssen für ein sicheres und effizientes Testen wissenschaftliche Fragestellungen bearbeitet werden. Dies erfolgt durch neutrale Forschungseinrichtungen, die Bausteine für alle Industriepartner erzeugen, die in deren Werkzeugketten und Prozesse integriert werden können.

Mit der Förderung des Projektes PEGASUS durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) wurde die Programmsäule „Automatisches Fahren“ des Förderprogrammes „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ adressiert. Innerhlab des Förderpohramms wurde besonders den Schwerpunkt „Angepasste Testverfahren und Validierung“ adressiert. PEGASUS bearbeitete dabei aber auch wesentliche Aspekte in anderen Schwerpunkten. Hierzu zählen Innovative Sensorik und Aktoriksysteme, Hochgenaue Lokalisation, Verfahren zur Datenfusion und –verarbeitung, Mensch-Maschine-Interkation sowie Querschnittsthemen.

Aufbauend auf der Förderung entwickelte das PEGASUS-Konsortium Gütekriterien, Werkzeuge und Methoden zur Absicherung und zum Nachweis der funktionalen Sicherheit hochautomatisierter Fahrfunktionen, um diese schließlich freigeben zu können. Das Ergebnis ist eine Blaupause, die Testmethoden und -Werkzeuge als auch entsprechend zu prüfende Situationen umfasst, so dass eine Evaluierung auch durch weitere Stakeholder möglich wird.

Um der entsprechend der höheren Entwicklungskomplexität ebenfalls rapide anwachsenden Zahl an „klassischen“ Testkilometern zu begegnen, lag in PEGASUS ein Fokus auf dem Testen in Simulationen und unter Nutzung von Modellen. Die in diesem Zusammenhang vorgeschlagenen Methoden können mit etablierten Test- und Freigabemethoden kombiniert und erweitert werden (z.B. mit der Erprobung auf Testfedern und in Feldtests, um schließlich ein effizientes und gleichzeitig effektives Testen zu ermöglichen). Der entstandene ganzheitliche Ansatz ist ein deutlicher Fortschritt gegenüber dem Stand der Forschung und Technik zu Projektbeginn.

PEGASUS erarbeitete in einer vorwettbewerblichen Phase mit wesentlichen Stakeholdern aus Fahrzeugherstellern, ihrer Zulieferindustrie, essentiellen kleinen und mittelständischen Technologietreibern und zentralen wissenschaftlichen Partnern einen deutlichen Entwicklungsfortschritt. Hierdurch sollte ein nationaler Technologie- und Wissensvorsprung entstehen, der maßgeblich zur Steigerung des Technologiereifegrades hochautomatisierter Fahrfunktionen beitragen sollte. Durch PEGASUS sollte es erstmalig möglich sein, einen Ansatz

zu formulieren, der es ermöglicht Funktionen sicher und zuverlässig für den Markt vorzubereiten. Hierüber sollte die deutsche Automobilindustrie ihre volkswirtschaftlich essentielle Rolle weiter sichern und ausbauen. Damit sollte mit PEGASUS ein effektiver Beitrag zum langfristigen wirtschaftlichen Erfolg der nationalen Industrie und der wissenschaftlichen Einrichtungen der Bundesrepublik Deutschland geleistet werden.

1.3 Planung und Ablauf

Das Projekt PEGASUS erfolgt als vorwettbewerbliches Verbundvorhaben. In PEGASUS arbeiten Firmen der Automobil-, Automobilzulieferer-, Elektronikindustrie, Unternehmen aus dem IT-Bereich sowie akademische Einrichtungen zusammen.

Geleitet wurde das Gesamtprojekt durch Volkswagen und DLR. Die Verantwortung für die Teilprojekte hatte die Industrie, um eine größtmögliche Anwendungsnähe zu erzielen:

- PEGASUS-Projektkoordinator — Volkswagen AG, DLR e.V.
- Leitung TP 1 Szenarienanalyse und Qualitätsmaße — Volkswagen AG
- Leitung TP 2 Umsetzungsprozesse — Adam Opel AG
- Leitung TP 3 Testen — Daimler AG
- Leitung TP 4 Ergebnisreflexion und Einbettung — Continental Teves AG

Die Teilprojekte in PEGASUS wurden so ausgelegt, dass eine schnelle und effiziente Ergebnisverwertung über die Projektlaufzeit ermöglicht wird. Dabei lieferten Teilprojekte bereits in einer frühen Reifephase erste Zwischenergebnisse als Input in anderen Teilprojekten. Abbildung 1 zeigt dabei die fachlichen Kernfragestellungen der einzelnen Teilprojekte. Jedes der vier fachlich inhaltlichen Teilprojekte besitzt dabei Arbeitspakete (AP), die von der Struktur so ausgelegt waren, dass sie bereits nach kurzer Laufzeit greifbare Ergebnisse liefern und diese an weitere Teilprojekte als Input weitergeben.

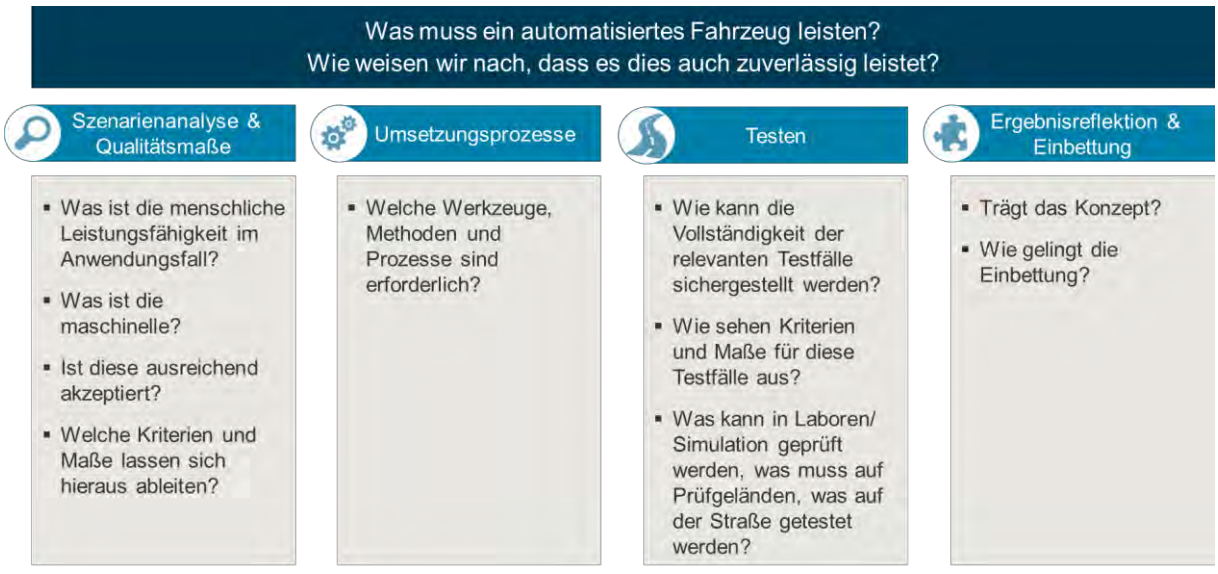


Abbildung 1 Übergeordnete Fragestellungen sowie innerhalb der Teilprojekte

Den eigentlichen Testphasen im TP 3 waren die Erarbeitung von Qualitätsmaßen und die Ableitung von Entwicklungs- und Testprozessen im TP 1 bzw. TP 2 vorangestellt. In den ersten beiden Teilprojekten wurden somit die Rahmenbedingungen und Randbedingungen für die präzise Umsetzung der Tests herausgearbeitet und Gütemaße zur Bewertung der Anforderungsumsetzung bzw. der Fahrfunktionen erarbeitet. Das TP 4 unterstützte mit der Reflexi-

on die Prüfung der Ergebnisqualität von TP 1 – TP 3 und war maßgeblich für die Prüfung der Übertragbarkeit zuständig.

Darüber hinaus gab es ein weiteres Teilprojekt 0, was sich mit dem Projektmanagement beschäftigte.

TP 0 Projektmanagement

TP 0 umfasste die Projektmanagementaufgaben, unterstützte das Zusammenwirken der einzelnen Teilprojekte und koordinierte die Ergebnisverbreitung, die Einbringung des Projekts und seiner Ergebnisse in Gremien und Ausschüssen sowie die Erstellung von Veröffentlichungen zu Projektergebnissen. Diese Aufgaben wurden dabei durch einen PEGASUS-Steuerkreis bewertet und unterstützt.

Ab Mitte/Ende 2016 stieg das internationale Interesse an den Arbeiten und Ergebnissen aus PEGASUS kontinuierlich an, sodass aus PEGASUS heraus eine entsprechende Kommunikation sowie die Durchführung von Veranstaltungen initiiert wurde, um auch auf einem internationalen Level eine entsprechende Akzeptanz zu erreichen. Ziel war/ist, dass möglichst viele PEGASUS-Bausteine zukünftig international tragfähig werden. Mit der Durchführung des ersten internationalen PEGASUS-Symposiums in 2017 erfolgte noch einmal eine zusätzliche Steigerung der internationalen Aufmerksamkeit. So wurden beispielsweise regelmäßige Workshops organisiert, fachlich/inhaltlich vorbereitet, durchgeführt und die Ergebnisse nachgepflegt. Zu den Veranstaltungsorten der Workshops zählen Aachen, Wien, San Francisco, Tokio und Wolfsburg. Aber auch neben den durchgeführten Workshops wurden eine Vielzahl weiterer internationaler Aktivitäten gestartet: im Fokus stehen hier auch weiterhin bilaterale Abstimmungen sowie ein gesteigertes Engagement im Bereich der Normierung und Standardisierung.

Zur Fokussierung und Strukturierung der internationalen Aktivitäten sowie zur Festigung der PEGASUS-Ergebnisse auch über Deutschland hinaus wurde eigens eine Arbeitsgruppe zur „Ausarbeitung von Möglichkeiten zum Austausch mit Externen“ etabliert, die sich aus den Projektkoordinatoren, PEGASUS-Steuerkreismitgliedern sowie dem Projektbüro zusammensetzt. Diese AG tagte im 6 Wochen Rhythmus und wägt ab, welche Aktivitäten zielführend sind und liefert parallel wichtige Informationen zu weiteren aktuellen international relevanten Aktivitäten.

Alle in PEGASUS erzielten Ergebnisse werden dabei in den Nachfolgeprojekten der PEGASUS-Projektfamilie fortgeführt.

TP 1 Szenarienanalyse und Qualitätsmaße

Zielsetzung des TP 1 Szenarienanalyse und Qualitätsmaße war es, eine Methode zur Festlegung von Auslegungskriterien für hochautomatische Fahrfunktionen zu entwickeln und diese Methode anhand konkreter Beispielfunktionen und Szenarien zu demonstrieren. Die hieraus abgeleiteten funktionalen Anforderungen an die Beispielfunktion dienten den anderen Teilprojekten als Arbeitsgrundlage.

Aufbauend auf den Ergebnissen bestehender Projekte wurde im TP 1 initial der sog. Autobahn Chauffeur als konkretes Anwendungsbeispiel für das hochautomatisierte Fahren auf der Autobahn für das Projekt definiert – dieses liegt innerhalb des SAE-Level 3. Damit wurde ein schneller und sehr konkreter Start in das Projekt ermöglicht. Die mögliche Erweiterung der Szenariokomplexität wurde im weiteren Verlauf des TP 1 mit der Erweiterung der Qualitätsmaße auf Basis theoretischer Untersuchungen nachgewiesen. Das TP 1 gliederte sich in folgende Arbeitspakete:

- AP 1.1 Anwendungsszenario
- AP 1.2 Qualitätsmaße
- AP 1.3 Erweitertes Anwendungsszenario
- AP 1.4 Erweiterung Qualitätsmaße

TP 2 Umsetzungsprozesse

Im TP 2 Umsetzungsprozesse erfolgte die Ableitung, Überarbeitung und Erarbeitung von Entwicklungs- und Testprozessen zur Erprobung von hochautomatisierten Fahrfunktionen. Basis waren die bestehenden Industrieprozesse, die zunächst dahingehend kritisch hinterfragt wurden, ob diese auf die neuen Anforderungen adaptierbar sind. Aufbauend auf der Analyse erfolgte die Erarbeitung einer Methodik zur Auslegung und Bewertung der Anwendbarkeitsgrenzen für einen szenariobasierten Ansatz. Mit der anschließenden Definition von Vorgaben und Leitlinien für die Testspezifikation in Form von Prozessen wurde ein systematischer Übergang von der Erhebung (TP 1) zum eigentlichen Testen (TP 3) gewährleistet. Das TP 2 gliederte sich in folgende Arbeitspakete:

- AP 2.1 Prozessanalyse
- AP 2.2 Prozessmethodik
- AP 2.3 Prozessspezifikation

TP 3 Testen

In TP 3 erfolgte zunächst die allgemeine Konzeptionierung für Labor/Prüfgelände und Feldtests sowie die Abgrenzung der einzelnen Bereiche ausgehend von den einzelnen Randbedingungen. Im Anschluss erfolgte die detaillierte Betrachtung der drei Testmöglichkeiten inklusive ihrer Vorbereitung, Durchführung und Auswertung. Durch die praktische Erprobung der Arbeitsergebnisse im Labor, auf dem Prüfgelände sowie im realen Verkehrsgeschehen, wurden die erarbeiteten Lösungen praktisch validiert. Das übergreifende Zusammenspiel von Labor- mit Prüfgelände- und Feldtests wurd hier ebenfalls behandelt. Mit dem Fokus zuverlässige Testverfahren im Labor sicherzustellen, besteht die Möglichkeit zur Reduzierung von Erprobungs- und Evaluierungsfahrten. Anspruch an die entwickelten Konzepte und Instrumente des Projekts war es, möglichst viele Tests bereits im Labor durch Simulationen umsetzten zu können und dass Prüfgelände- und Feldtests die Validierung vorangegangener Testergebnisse und weitere notwendige Tests durchführen. Das TP 3 gliederte sich in folgende Arbeitspakete:

- AP 3.1 Testvorbereitung
- AP 3.2 Labortests/Simulation
- AP 3.3 Prüfgeländetest
- AP 3.4 Feldabsicherung

TP 4 Ergebnisreflexion und Einbettung

In dem TP 4 Ergebnisreflexion und Einbettung erfolgt parallel zu den anderen Projektphasen die Reflektion der bestehenden Arbeiten und die Untersuchung auf deren Wirksamkeit sowie der Möglichkeit zur Einbettung in etablierte Entwicklungsprozesse der Industriepartner. Anhand von ausgewählten Themen gab es entsprechende Reflexionsrunden. Hier spielte insbesondere die gesamtwirtschaftliche Beurteilung in Bezug auf Anwendbarkeit, Zeit und Kosten eine wichtige Rolle. Ausgehend von den Ergebnissen der Reflektion erfolgte eine Rückkoppelung der Inhalte an die anderen Teilprojekte. Mit der abschließenden Untersuchung, welche Ergebnisse sich direkt in die Unternehmensprozesse einbinden lassen und welche noch weiter entwickelt werden müssen, lieferte das TP 4 entscheidende Informationen für die Einbettung bei den Partnern. Das TP 4 gliedert sich in folgende Arbeitspakete:

- AP 4.1 Ergebnisreflexion
- AP 4.2 Einbettung

Allgemeiner Ablauf

Die strategische Ausrichtung und Koordination von PEGASUS erfolgte durch einen Steuerkreis. Der Steuerkreis bestand dabei aus den Projektleitern der Teilprojekte „Szenarienanalyse- und Qualitätsmaße“, „Umsetzungsprozesse“, „Testen“ und „Ergebnisreflexion und Einbettung“, Vertretern aus jedem Bereich, einem Mitarbeiter des Projektbüros, sowie den PEGASUS-Projektkoordinatoren.

Die PEGASUS-Projektkoordinatoren waren gemeinsam mit dem Projektbüro die zentralen Ansprechpartner des Projektträgers TÜV Rheinland und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) für administrative und inhaltliche Fragen.

Für die Beantwortung komplexer grundlegender Sachfragen waren in passendem Umfang akademische Partner aus der industrienahen Forschung als Projektpartner oder im Sinne der Tandembildung als Unterauftragnehmer eingebunden. Es erfolgten zudem zielgerichtete Unterbeauftragungen an systemrelevante Unternehmen, deren Ergebnisse durch den Industriepartner in das Projekt integriert wurden. Die Einbindung von Unterauftragnehmern (sowohl wirtschaftliche Unternehmen, als auch akademische Einrichtungen) erfolgten stets durch einen Partner, mit der Zielsetzung, insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) (NKS) einzubinden.

Die Abstimmung zwischen den einzelnen Teilprojekten „Szenarienanalyse- und Qualitätsmaße“, „Umsetzungsprozesse“, „Testen“ sowie „Ergebnisreflektion und Einbettung“ erfolgte auf strategischer Ebene im PEGASUS-Steuerkreis. Der inhaltlich operative Austausch erfolgte zwischen den Teilprojektleitern.

Das Projektbüro unterstützte die PEGASUS-Projektkoordinatoren, die Teilprojektleiter, sowie den PEGASUS-Steuerkreis in sämtlichen operativen Aufgaben des Projektmanagements sowie der Projektkommunikation. Es war zudem die zentrale Anlaufstelle für öffentliche Anfragen und steuerte die Projektkommunikation.

Für eine zielgerichtete und einheitliche Ergebniskommunikation von PEGASUS war eine PR-Gruppe etabliert, die durch das Projektbüro koordiniert wird.

Zur Ergebnispräsentation erfolgten eine Halbzeit- sowie Abschlusspräsentation der erzielten Projektergebnisse sowie die Durchführung von internationalen Workshops und PEGASUS-Symposien.

Um die Projektergebnisse auch über die Projektlaufzeit effizient nutzen und ausbauen zu können, wurde zudem ein Projekt-Beirat installiert. Dieser setzte sich aus dem Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (BMJV), Deutscher Verkehrssicherheitsrat (DVR), ADAC und dem Verband der Automobilindustrie (VDA) zusammen.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Vision des automatisierten Fahrens begleitet bereits kontinuierlich einschlägige Fahrzeughersteller, Zulieferer sowie Forschungseinrichtungen seit mehreren Jahrzehnten. Basierend auf dem Projekt PROMETHEUS (Daimler) aus dem Jahre 1987 starteten eine Vielzahl von Förderprojekten, die sich mit dem automatisierten Fahren im öffentlichen Straßenverkehr beschäftigten. Begleitet wurde die Forschung stets von der Vision vom unfallfreien bzw. sicheren Fahren. Dabei erfolgten in den bisherigen Forschungsprojekten meist nur die Betrachtung von Einzelaspekten und nie die Betrachtung aller notwendigen Schritte zum Testen und somit zur ganzheitlichen Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen.

Die meisten der heute erhältlichen Fahrerassistenzsysteme (FAS) sind für relativ einfache Verkehrssituationen im Bereich von Autobahnen, auf Landstraßen oder an Kreuzungen ohne Gegenverkehr sowie das Fahren mit niedrigen Geschwindigkeiten konzipiert. Durch geschickte Beschränkung der Anwendungsfälle gelingt es, dem Kunden robuste Systeme in die Hand zu geben, obwohl die für Einzelaufgaben optimierte Sensoren und Steuergeräte den Fahr-

zeugen nur eine sehr eingeschränkte „Sicht“ auf die Umgebung erlauben. All diese Fahrerassistenzsysteme sind lediglich eine Unterstützung für den Fahrer in seiner Fahraufgabe – somit ist der Fahrer heute vollumfänglich verantwortlich.

Den Antragstellern war zu Beginn des Projektes keine Systematik bekannt, um komplexe Verkehrskonstellationen und die sich daraus potenziell entwickelnden Verkehrssituationen systematisch zu analysieren. Die Darstellung und Prognose komplexer Situationen und die Gesamtheit aller möglichen Verkehrssituationen ist jedoch für das Testen automatisierter zwingend notwendig.

Die nachfolgende Darstellung beschreibt den Stand der Technik zu Projektbeginn:

1.4.1 Entwicklungen im Bereich der Assistenz[1]

Der technologische Fortschritt auf dem Weg zum automatischen Fahren zeigt sich bereits heute in modernen Fahrzeugen, die in hohem Maße mit Fahrerassistenzsystemen ausgerüstet sind. Diese Systeme sind infolge verbesserter Umgebungserfassung und Situationsanalyse heute leistungsfähiger als jemals zuvor. Viele dieser Systeme haben bereits ihren Weg von der Oberklasse in die Mittelklasse und teilweise sogar bis in die Kompaktklasse gefunden.

Aus Abstandsregelfunktionen (ACC) mit einem deutlich eingeschränkten Geschwindigkeitsbereich von z.B. 30 bis 160 km/h in den ersten Ausführungen sind in heutigen Fahrzeugen umfassende Systeme zur Regelung der Längsdynamik entwickelt worden. Diese Funktionen decken häufig den gesamten Geschwindigkeitsbereich einschließlich der Nutzung im „Stop and Go“-Verkehr mit großer Zuverlässigkeit ab. Im Hinblick auf diese schnelle Entwicklung der Fahrerassistenz liegt die Überlegung nahe, das Autofahren in einigen Bereichen zu automatisieren. So ist die Einführung von höheren Automatisierungsgraden, mit Blick auf die Komplexität, auf der Autobahn am wahrscheinlichsten.

Beispiele für etablierte Vorgängersysteme der Stufe 0 „Driver Only“, die auf hauptsächlich auf die Anwendung auf der Autobahn zielen, sind LDW, LCA, FCW und PDC, die den Fahrer warnen, aber nicht in die Längs- und/oder Querführung des Fahrzeugs eingreifen. Letzteres erfolgt erst bei Systemen der Stufe 1 „Assistiert“ wie z.B. ACC, ACC Stop & Go, PLA und LKA sowie zukünftigen Systemen wie Eco ACC oder Baustellenassistenz.

Teilautomatische Systeme der ersten Generation sind Stauassistenz und Parkassistenz. Letztere Funktion ermöglicht das automatische Ein- und Ausparken auf öffentlichen Parkplätzen oder in privaten Garagen. Mittels Smartphone oder Funkschlüssel wird der Ein- bzw. Ausparkvorgang gestartet, das Fahrzeug parkt dann selbstständig ein bzw. aus. Der Fahrer steht dabei außerhalb des Fahrzeugs, muss das System aber dauerhaft überwachen und unterbricht ggf. das Parkmanöver. Dieses System verspricht einen Sicherheitsgewinn durch Vermeidung von Parkschäden und verbesserter Umfeldüberwachung sowie einen Komfortgewinn durch einfacheres Ein- und Aussteigen insbesondere bei engen Parklücken oder Garagen.

Ein hochautomatisches System der ersten Generation ist z.B. der Stauchauffeur. Dieser ermöglicht das automatisierte Fahren im Stau z.B. bis 60 km/h auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen. Das System ist aktivierbar, wenn eine Stausituation vorliegt, also langsame, vorausfahrende Fahrzeuge detektiert werden. Der Fahrer muss das System bewusst aktivieren, braucht es aber nicht dauerhaft zu überwachen. Der Fahrer kann das System jeder Zeit übersteuern bzw. ausschalten. Wenn die Stausituation nicht mehr vorliegt erfolgt eine Übernahmeaufforderung vom System an den Fahrer. Das System verspricht einen Sicherheitsgewinn durch die Entlastung des Fahrers beim ermüdenden, manuellen Fahren im Stau, sowie einen Komfortgewinn durch Entspannen und Nutzen von ausgewählten Infotainment-Funktionen während der automatischen Staufolgefahrt.

[1] angelehnt an VDA-Kongress 2014

In der zweiten Generation werden vollautomatische Systeme wie der Park Pilot eingeführt. Dieser ermöglicht das automatische Ein- und Ausparken inkl. Parken und Bereitstellung des Fahrzeugs in einem Parkhaus. Der Fahrer muss das System nicht überwachen und kann sich entfernen. Mittels Smartphone oder Funkschlüssel wird das Parken oder die Bereitstellung gestartet. Das System verspricht einen Sicherheitsgewinn durch Vermeidung von Parkschäden sowie einen Komfortgewinn durch Zeitersparnis, da der Kunde das Parkhaus nicht betreten muss und somit kurze Wege zum Fahrzeug hat.

Ein hochautomatisches System der zweiten Generation ist der Autobahn-Chauffeur. Dieser ermöglicht das automatische Fahren auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen bis 130 km/h von der Auffahrt bis zur Abfahrt auf allen Fahrstreifen inkl. Überholen. Der Fahrer muss das System bewusst aktivieren aber nicht dauerhaft überwachen und er kann das System jederzeit übersteuern bzw. ausschalten. Der Fahrer erhält eine rechtzeitige Übernahmeaufforderung, wenn Systemgrenzen erreicht werden. Das System verspricht einen Sicherheitsgewinn durch Entlastung des Fahrers beim ermüdenden, manuellen Fahren auf Langstreckenfahrten sowie einen Komfortgewinn durch Entspannen und Nutzen von ausgewählten Infotainment-Funktionen.

In der dritten oder vierten Generation automatischer Fahrfunktionen ist dann auch ein Autobahn-Pilot denkbar, welcher bei ähnlicher Funktionalität wie der Autobahn-Chauffeur die Durchführung fahrfremder Tätigkeiten inkl. Schlafen uneingeschränkt ermöglich. Fahrerlose Systeme wie z.B. Roboter-Taxis, die das vollautomatische Fahren vom Start bis zum Ziel ermöglichen, erscheinen erst in einer entfernten Zukunft als realisierbar.

1.4.2 **Fahrsituationen und Sicherheitsbewertung**

Der öffentliche Straßenverkehr bildet ein komplexes System aus statischen sowie dynamischen Objekten die von HAF-Fahrzeugen hinreichend gemeistert werden müssen. Die Ursachen für Unfälle in einem solchen System sind vielfältig. Auf der einen Seite führen monokausale Fehler in der Fahrzeugführung, wie beispielsweise das müdigkeitsbedingte Abkommen eines menschgeführten Fahrzeugs von der Fahrbahn zu Unfällen. Auf der anderen Seite beruhen jedoch nicht alle Unfälle auf monokausalem Falschverhalten von Menschen. Besonders wenn mehrere Verkehrsteilnehmer in Interaktion miteinander treten, sind Missverständnisse oder Fehlinterpretationen ursächlich für Kollisionen. Dies gilt v.a. beim Abbiegen, Wenden, Rückwärtsfahren, Ein- und Anfahren (Risser, Zuzan, Tamme, Steinbauer, & Kaba, 1991) (Risser, Kommunikation und Kultur des Straßenverkehrs, 1988).

In der Abbildung 2 ist ein Beispiel einer komplexen Konstellation im Straßenverkehr gegeben, wie sie auch ein Autobahn-Chauffeur erleben kann, aus der sich eine Vielzahl an unterschiedlichen, durch Pfeile angedeutete, Verkehrssituationen entwickeln können. Die einzelnen Pfeile stellen nicht die einzigen Möglichkeiten des Ausführens einer Absicht (z.B. Fahrstreifenwechsel nach links) dar, da die Trajektorien in vielen zeitlichen und räumlichen Variationen ausgeführt werden können. Diese werden im vorliegenden Beispiel jedoch zur Vereinfachung vernachlässigt. Die tatsächlichen Absichten der Verkehrsteilnehmer sind als grüne Pfeile dargestellt. Eine Kollision tritt dann auf, wenn sich die Trajektorie der Teilnehmer in zeitlicher und räumlicher Dimension überschneiden. Hieraus wird ersichtlich, dass die Interaktionen der jeweiligen Verkehrsteilnehmer einen großen Einfluss auf die Verkehrssicherheit besitzen.

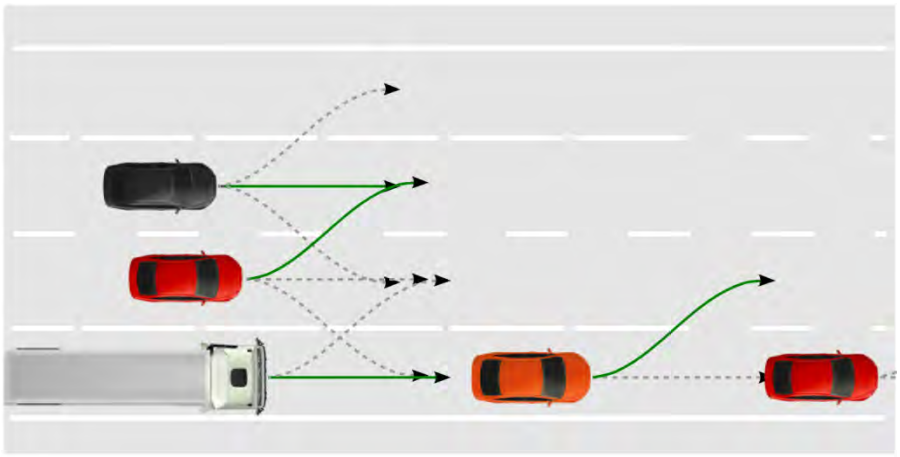


Abbildung 2 Beispiel einer komplexen Verkehrskonstellation auf der Autobahn, aus der unterschiedliche Verkehrssituationen entstehen können.

Die sich aus der oben dargestellten Situation ergebenden Szenarien verdeutlichen, dass eine Vielzahl verschiedener Ausgangssituationen in der Absicherung automatisierter Fahrzeuge zu betrachten ist. Dazu bedarf es sowohl einer systematischen Abbildung und Erfassung möglicher Situationen bzw. Szenarien als auch einer geeigneten Metrik zur situationsübergreifenden Bewertung anhand relevanter Kriterien, im Besonderen der Verkehrssicherheit. Ferner bedarf es einer Methodik, um aus der Vielzahl der möglichen Ausgangssituationen die risikorelevanten Situationen auszuwählen, um die fundierte Absicherung automatisierter Fahrzeuge zu ermöglichen (Wachenfeld & Winner, 2015).

Situationsbeschreibung im Straßenverkehr

In der Literatur und Forschung sind verschiedene Ansätze bekannt, Verkehr und die hierin enthaltenen Situationen zu beschreiben. Es existieren beispielsweise die ebenenbasierte Beschreibung, die den Verkehr auf makroskopischer, mikroskopischer und submikroskopischer Ebene beschreibt die Beschreibung des Verkehrs durch Situationskataloge, sowie die Beschreibung von Situationen anhand von Klassifikationsschemata. Die Betrachtung von komplexen Verkehrskonstellationen über alle diese Ebenen hinweg und den hieraus resultierenden Situationen bedarf jedoch der Entwicklung einer geeigneten Methodik. Nach aktuellem Stand der Forschung existieren bisher keine methodenübergreifenden Darstellungen und Prognosen komplexer Situationen und die Identifikation und Beschreibung der Gesamtheit aller möglichen Verkehrssituationen wurde bisher nicht erforscht.

Sicherheitsbewertung im Straßenverkehr

Die Sicherheitsbewertung wird bisher mit szenariobasierten Ansätzen vorgenommen, indem Kritikalitätsmaße oder -Modelle eingesetzt werden, die eine deterministische oder stochastische Bewertung durchführen. Der Begriff Kritikalität ist als der Aufwand an Reaktionen und Entscheidungen zu sehen, der zur Verhinderung einer Kollision benötigt wird.

Aktuell besteht eine Forschungslücke im Bereich der Bewertung der Kritikalität von Situationen, selbst in einem beschränkten Betrachtungsgebiet wie der Autobahn. Hierdurch ist der Vergleich von menschlicher mit maschineller Leistungsfähigkeit zur Kollisionsvermeidung bisher auf einzelne, bestimmte Szenarien beschränkt, die allerdings zur Absicherung einer automatisierten Fahrfunktion (wie beispielsweise dem Autobahn-Chauffeur) nicht ausreichen. Bei dieser Kritikalitätsbewertung besteht zudem eine Herausforderung in der Herstellung eines Konsenses zwischen Wissenschaft und Wirtschaft für ein gemeinsam abgestimmtes Maß. Zusätzlich besteht die Problemstellung, dass keine situationsübergreifende Kritikalitätsmetrik existiert, die den Vergleich zwischen zwei Situationen ermöglicht, wodurch die Bewertung der Relevanz von Situationen hinsichtlich sicherheitskritischer Aspekte nicht möglich ist.

1.4.3 Aktuelle relevante Testmethoden

Die Erprobung und Absicherung von Fahrzeugen und auf dem Markt verfügbaren Assistenzsystemen erfolgt stets dreigeteilt – im Labor, auf dem Prüfgelände und im Feld. Somit sind für konkrete einzelne Assistenzsysteme bereits meist herstellerabhängig diverse Erprobungsmethoden entwickelt worden, welche die Genauigkeit und Wiederholbarkeit verbessern. Eine Analyse der Anwendbarkeit auf mit hochautomatisiert fahrenden Fahrzeugen zu adressierende Verkehrsszenarien zeigte aber, dass einige Aufgabenstellungen ungelöst blieben.

Alle Fahrzeugfunktionen werden im Verlauf ihrer Entwicklung auf verschiedene Arten erprobt, bevor sie zugelassen werden können. Die Komponentenerprobung in Simulationen, auf Prüfständen, die Systemerprobung in Hardware-in-the-Loop-Prüfumgebungen, die Gesamtfahrzeugtests auf komplexen Fahrzeugprüfständen und die Bedienungsabsicherung in Fahrsimulatoren gehören ebenso dazu wie die Funktions-Erprobungen auf Prüfgeländen und schließlich die finale Absicherung durch Felderprobung.

Im Folgenden wird die Absicherung in den drei Bereichen näher betrachtet:

1.4.3.1 Fahrzeugabsicherung durch Felderprobung

Die finale Absicherung im Feld hat nach Winner (Breuer, von Hugo, Mücke, & Tattersall, 2015) als eine wesentliche Zielsetzung nachzuweisen, dass die Systeme auch unter widrigen Bedingungen im Feld wirksam sind oder zumindest nicht nachteilhaft wirken, aber auch mögliche Fehlfunktionen nur in akzeptabler Häufigkeit auftreten und in allen Fällen beherrschbar sind. Die Aufgabe der Felderprobung ist also das Aufspüren „pathologischer Fälle“ im Sinne der Funktion, die Quantifizierung dieser Fälle und (gemeinsam mit anderen Methoden) der Nachweis der Beherrschbarkeit dieser Fälle.

Die Erprobung von Assistenzsystemen, welche den Fahrer in bestimmten einzelnen Situationen entlasten oder sogar seine Fahrfehler kompensieren sollen, unterscheidet sich aber in einem wesentlichen Aspekt deutlich von der Erprobung hoch- oder vollautomatisierter Fahrfunktionen: Da der Fahrer bei bisherigen Assistenzsystemen immer noch die Fahraufgabe in voller Verantwortung besitzt und als Überwacher mit ständiger und kurzzeitiger Einsatzbereitschaft zur Verfügung steht, müssen die Fahrzeugfunktionen nicht perfekt sein; sie können vielmehr so ausgelegt sein, dass sie dem Fahrer dann helfen, wenn ein eindeutiger Bedarf dazu besteht. Alle Situationen, in denen dieser Bedarf nicht eindeutig festgestellt wird, werden weiterhin dem Fahrer zur Lösung überlassen. Selbst wenn ein so ausgelegtes System damit „nur“ 95% aller kritischen Situationen entschärft, bringt es doch einen erheblichen Nutzen für den Fahrer; eine Untätigkeit des Systems in den anderen 5% der kritischen Situationen macht diese zumindest nicht schlechter für den Fahrer. Bei der Absicherung in der Felderprobung reicht deswegen eine relativ geringe Fahrleistung, um den statistischen Nachweis des System-Nutzens zu erbringen. Nach der Erkennung von typischen pathologischen Fällen kann die Beherrschbarkeit des dabei erkannten Effektes durch den Fahrer in gezielten Prüfgelände- oder Fahrsimulator-Versuchen nachgewiesen werden. Die Bestimmung der relativen Häufigkeit von pathologischen Fällen ist damit der wesentliche bestimmende Faktor für die notwendige Fahrstrecke, die in der Felderprobung zurückgelegt werden muss. Wird gefordert, sehr kleine Häufigkeitswerte pro Fahr-Kilometer mit dieser statistischen Methode nachzuweisen, werden entsprechend große Fahrstrecken bis zur Freigabe (zum „Freifahren“) benötigt.

Bei hoch- und vollautomatisierten Fahrfunktionen müssen sehr geringe Auftretenswahrscheinlichkeiten für nicht mehr beherrschte Situationen nachgewiesen werden, die um etwa den Faktor 10^2 bis 10^3 geringer sind als die bisher mit der Feldabsicherung nachgewiesenen Restrisiken (Wachenfeld & Winner, 2015). Solche Absicherungsstrecken sind in der Praxis nicht leistbar.

Wie in Effiziente Felderprobung von Fahrerassistenzsystemen (Glauner, Blumenstock, & Haueis, 2012) dargelegt wird, kann die Länge der Felderprobungs-Strecke durch geschickte Wahl der Erprobungsroute reduziert werden – hiermit sind aber nur Streckenreduktionen um

maximal eine Zehnerpotenz erreichbar. Weiterhin kann bei bekannten Technologien und erprobten Teilfunktionen auf Feldtests und Praxiserfahrung mit diesen Teilfunktionen zurückgegriffen werden, um ein komplexes neues Gesamtsystem abzusichern. Diese Methoden alleine führen aber immer noch zu unakzeptabel hohen Absicherungsstrecken, wollte man die Feldabsicherung weiterhin allein mit statistischen Methoden durchführen.

In anderen Industriezweigen (z.B. Luft- und Raumfahrt, Kraftwerksbau und Energieversorgung) werden schon länger andere Methoden eingesetzt, um den Nachweis der Sicherheit bei kleinem Restrisiko zu erbringen (Schöner H.-P. , 2014). Diese beruhen auf einer redundanten und diversitären Systemauslegung, auf dem formalen System-Sicherheitsnachweis mit mathematischen und logischen Methoden und basieren auf den Nachweisen für Fehlerauftretensraten in Komponenten und Subsystemen. Letztere werden bei der Systemauslegung auf der Basis von Vorwissen angenommen; bei einem so ausgelegten System ist in der Erprobung nicht die Gesamtsystem-Fehlerrate nachzuweisen, sondern nur die (bei richtiger Systemauslegung deutlich häufiger auftretenden) Komponenten- und Subsystem-Fehlerraten. Neben den Häufigkeiten von Einzelfehlern ist außerdem noch nachzuweisen, dass die Annahme der Diversität der Systemauslegung gültig ist; eine niedrige Korrelation des Auftretens von Einzelfehlern ist demnach ein weiterer durch die Feldabsicherung zu erbringender Nachweis. Bezogen auf den Fahrversuch ergeben sich so in Summe deutlich geringere notwendige Absicherungsstrecken.

Damit die Auslegung eines redundanten, diversitären Systems überprüft werden kann, sind die Belastungen des Systems in allen Varianten zu untersuchen. Bezogen auf das hoch- und vollautomatisierte Fahren bestehen die Systembelastungen aus den Verkehrs- und Umfeldsituationen, denen das Fahrzeug ausgesetzt ist; deren Beherrschbarkeit durch ein automatisiertes Fahrzeug kann mit Hilfe der Simulation überprüft werden. Diese Situationen können auf der Basis von theoretischen Überlegungen und Vorwissen zusammengestellt werden, was in einem einfachen Verkehrsumfeld (wie zum Beispiel auf der Autobahn) noch mit einem hohem Grad an Vollständigkeit gelingen kann. Zumindest bei komplexer werdendem Umfeld ist es eine weitere Aufgabe der Felderprobung, bisher noch nicht erkannte, aber relevante pathologische Situationen aufzuspüren und sie für die Überprüfung in der Simulation oder zur Erprobung auf dem Prüfgelände als weitere Prüffälle bereitzustellen. Dazu ist eine Metrik für Kritikalität nötig, mit der Situationen als relevant klassifiziert werden können.

Eine weitere neue Kategorie für die Felderprobung ist der Nachweis der sicheren und rechtzeitigen Erkennung funktionaler Grenzen für den hochautomatisierten Fahrzeugbetrieb, Bisher wurde diese Überwachungsaufgabe vom Fahrer übernommen. Zukünftige Felderprobungen müssen, in Kombination mit gezielten Prüfgeländeversuchen, nachweisen, dass das Fahrzeug die Annäherung an seine eigenen funktionalen Grenzen sicher und frühzeitig erkennt, um den Fahrer zur Übernahme aufzufordern oder den Funktionsbereich präventiv geeignet einzuschränken.

Diese auf eine andere Grundlage gestellte Methode der Feldabsicherung ist in der Fahrzeugtechnik Neuland und bedarf einer gründlichen Überprüfung, unter welchen Bedingungen sie gemeinsam mit Simulationen und Feldtests den Sicherheitsnachweis für hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge erbringen kann.

1.4.3.2 Erprobung auf dem Prüfgelände

Im Gegensatz zur Feldabsicherung werden auf dem Prüfgelände gezielt Situationen gestellt, um die Funktion in dieser Situation nachzuweisen. Unter anderem können hier die pathologischen Fälle, die im Feldtest oder bei Simulationen als relevant gefunden wurden, untersucht und der Nachweis der Beherrschbarkeit erbracht werden.

Im Vergleich zur Erprobung von fahrdynamischen Regelsystemen – welche auf der Basis von Zustandsgrößen *innerhalb* eines Fahrzeugs reagieren – erfordert die Erprobung von Assistenzsystemen und erst Recht die Erprobung von hochautomatisiert fahrenden Fahrzeugen die zusätzliche Berücksichtigung von Zustandsgrößen *außerhalb* des Fahrzeugs. So spielt die relative Lage des Fahrzeugs zu einer Fahrspur eine bedeutende Rolle z.B. bei der Erpro-

bung von Spurhaltesystemen; die relative Geschwindigkeit und der Abstand von mehreren Fahrzeugen untereinander sind maßgebend für adaptive Abstandsregelsysteme. Warnen die Systeme nicht nur, sondern greifen sie verstärkend oder gar selbständig in das Verhalten des Fahrzeugs ein, sind diese Regelsysteme umfassend bezüglich einer Vielzahl von Fahr- und Umgebungssituationen abzusichern, um spätere Gefährdungen der Fahrzeuginsassen auszuschließen und eine Zertifizierung der Systeme zu erlangen.

Die systematische Erprobung solcher Systeme bedeutet technisch, dass die Fahrzustände eines Versuchsfahrzeugs auf einer vorgegebenen Fahrbahn präzise eingestellt werden müssen: Ein konkreter raumfester Kurs ist mit vorgegebener Geschwindigkeit einzuhalten. Sind mehrere Fahrzeuge involviert, ist die Gleichzeitigkeit ihrer Bewegungen einzuhalten. Menschliche Fahrer können diese Bedingungen in *einem* Fahrzeug noch ausreichend präzise erfüllen, bei der gleichzeitigen, zeitlichen und räumlichen Koordination *mehrerer* Fahrzeuge stößt diese Versuchsmethodik jedoch schnell an ihre Grenzen. Die statistische Streuung von Fahrmanövern menschlicher Fahrer kann zwar für einen Teil der Erprobung durchaus gewollt sein, für die systematische und effiziente Überprüfung der Einhaltung von Spezifikationen, für den objektiven Vergleich verschiedener Systemvarianten oder gar die Durchführung von sicherheitskritischen Manövern ist eine höhere Präzision und eine exakte Reproduzierbarkeit der Versuche notwendig.

Für konkrete einzelne Assistenzsysteme sind diverse Erprobungsmethoden entwickelt worden, welche die Genauigkeit und Wiederholbarkeit verbessern. Eine Analyse der Anwendbarkeit auf mit hochautomatisiert fahrenden Fahrzeugen zu adressierende Verkehrsszenarien zeigte aber, dass einige Aufgabenstellungen ungelöst blieben. Die Aufgabe, ein Erprobungssystem zu konzipieren, mit dem auch potentiell gefährliche Manöver mehrerer Fahrzeuge präzise, koordiniert und sicher durchgeführt werden können, wurde von Daimler mit auf dem Prüfgelände eingesetzten koordinierten automatisierten Fahrzeugen prinzipiell gelöst.

Das Konzept des „koordinierten automatisierten Fahrens“ (Schöner, Hurich, Luther, & Herrtwich, 2011) bietet für die Erprobung von Assistenzsystemen eine bisher nicht gekannte Präzision und Reproduzierbarkeit der Manöver. Dadurch wird die Erprobung der Systeme in sicherheitskritischen Verkehrsszenarien überhaupt erst ermöglicht und die quantitative Absicherung der Systeme wird effizienter. Das „koordinierte automatisierte Fahren“ liefert einen wesentlichen Beitrag für die umfassende und robuste Erprobung und Absicherung von Assistenzsystemen und hochautomatisierten Fahrzeugen.

Zugleich bietet das automatisierte Abwickeln von Testverfahren die Möglichkeit, vorgegebene Standardprüfungen routiniert abzuwickeln, wie sie etwa zum gründlichen Vergleich gleichgerichteter Assistenzsysteme verschiedener Hersteller nötig wären oder für ein etwaiges künftiges Rating aktiver Sicherheitssysteme gebraucht würden. Ähnlich wie die seit Jahren üblichen Crash-Tests der passiven Sicherheit lassen sich auch aktive Sicherheitssysteme einer systematischen Überprüfung und Bewertung unterziehen.

Während bei der Absicherung der bisherigen Assistenzsysteme eine Koordination von zwei Fahrzeugen ausgereicht hat, da es sich bei allen Anwendungsfällen um die Verhinderung von Unfällen in konkreten Kollisionsszenarien zwischen *zwei* Fahrzeugen handelte, erfordert die Absicherung des vollständigen Szenarien-Sets für hochautomatisierte Fahrzeuge den Nachweis der Beherrschung von Situationen mit *mehr als zwei* Fahrzeugen. Die im Rahmen von PEGASUS zu erwartenden Konstellationen von drei oder vier zu koordinieren Fahrzeugen für komplexe Prüfszenarien stellt insofern selbst diese moderne Prüfmethodik vor neue Herausforderungen.

Für die präzise Navigation von koordinierten Fahrzeugen auf dem Prüfgelände ist eine hochgenaue Positionsmesstechnik zwingend notwendig, welche robust und unabhängig von der in den Fahrzeugsystemen enthaltenen Ortungstechnik sein muss. Differential GPS bietet heutzutage die Möglichkeit, auf weniger Zentimeter genau die Position eines schnell fahrenden Fahrzeuges zu bestimmen. Allerdings ist die Verfügbarkeit dieser Positionssignale nicht sichergestellt. Aus diesem Grunde ist es Stand der Technik, die Position zusätzlich mit einer hochgenauen Inertialsensorik zu stützen, um bei Ausfall der GPS-Ortung eine lückenlose Positionsbestimmung bis zum sicheren Stillstand des Fahrzeuges zu gewährleisten. Die heu-

te erforderliche und für diesen Zweck eingebaute (ursprünglich primär in militärischen Bereichen eingesetzte) Inertialsensorik liegt bei Kosten zwischen 50T€ und 80T€, was die Nutzung dieser Technik bisher einschränkt. Konzepte für eine deutlich kostengünstigere Rückfall-Sensorik auf der Basis von Fahrzeugsensorik und einer zusätzlichen Spurkamera liegen vor, müssen aber praxisreif entwickelt werden. Eine solche Technik für den sicheren Einsatz auf dem Prüfgelände ist ein Schlüssel für den verstärkten Einsatz und bietet die Perspektive für eine weltweite Vermarktung solcher Systeme in größeren Stückzahlen.

1.4.3.3 Fahrzeugabsicherung durch Labortests

Um die Sicherheit eines Fahrzeuges nachzuweisen, müssen neben ausgiebigen Komponententests, wie z.B. Hardware-in-the-Loop-Tests, zusätzlich eine große Anzahl Testkilometer auf der Straße zurückgelegt werden.

Für automatische Fahrfunktionen würde ein rein auf Testfahrten basierter Sicherheitsnachweis, bedingt durch die hohe Komplexität der Gesamtsysteme, einen immens hohen Aufwand bedeuten (Wachenfeld & Winner, 2015). Um diesen Aufwand im Vorfeld zu reduzieren, wird aktuell ein modellbasierter Ansatz verfolgt. Er ermöglicht eine durchgehende Verifikation einzelner Komponenten.

Klassische Verifikationsverfahren benötigen eine präzise Definition der Anforderungen sowie eine formale Beschreibung des Systems und ihrer Umwelt. Ist eine solche formale Beschreibung gegeben, existieren zahlreiche Tools, die eine Verifikation automatisieren können (Frehse, Le Guernic, & Donzé, 2011).

Mit der zunehmenden Komplexität der zu analysierenden Systeme und insbesondere zur Charakterisierung der nicht-deterministischen Umgebung, werden immer häufiger auch probabilistische Modelle zur Beschreibung und zur Analyse herangezogen.

Da eine vollständige Analyse des gesamten Zustandsraumes in der Praxis häufig unmöglich ist, werden zunehmend auch unvollständige, auf Simulation basierende, Verfahren verwendet. Unter dem Begriff des „Statistical Model Checkings“ werden in diesem Zusammenhang Methoden zusammengefasst, die nach mehreren Simulationsläufen eines Systems, inklusive dessen Umgebung, eine statistische Aussage über die Anforderungserfüllung generieren können. Hierzu werden im Falle von rein probabilistischen Systemen zufällig Simulationsläufe generiert und nachfolgend ein statistischer Hypothesentest bezüglich der Anforderungserfüllung durchgeführt (David, et al., 2011).

Auch wenn diese Methoden genutzt werden können, um eine Analyse der entwickelten Fahrzeuge im Vorfeld der Fertigung zu erreichen, sind Testfahrten weiterhin notwendig, um die Relevanz solcher Ergebnisse bezüglich der Realität zu bewerten indem die verwendeten Modelle gegen die Realität validiert werden.

Betrachtet man die aktuell vorhandenen Labortests, so wird schnell ersichtlich, dass die Automobilindustrie für einzelne Fragestellungen sich firmenspezifische Schlüssellösungen erarbeitet hat. Im Bereich der Forschung und Vorentwicklung existieren vereinzelte Lösungen für einen offenen Ansatz (z.B. OpenDRIVE). Die bestehenden offenen Lösungen müssen jedoch oft firmenspezifisch angepasst werden um Software-in-the-Loop-, Hardware-in-the-Loop- oder Vehicle-in-the-Loop-Tests mit der Zielumgebung durchführen zu können. Mit steigender Komplexität und steigendem Automatisierungsgrad steigt ebenfalls der Kommunikationsaufwand mit den verkehrlichen Umfeld, der in den aktuellen Testverfahren nur unzureichend abgedeckt ist. Diese vernetzten Betrachtungen in der Simulation erfolgen aktuell nur im Bereich der Forschung (z.B. Fahrsimulatorstudien in UR:BAN MV)

Somit mangelte es zu Projektbeginn an einem einheitlichen Lösungsansätzen, der eine Zulassung von höheren Automatisierungsgraden auf Basis von Labortests erlauben.

Während der Laufzeit von PEGASUS kam es weltweit zu vielfältigen parallelen Aktivitäten, um die Absicherung von automatisierten Fahrzeugen zu ermöglichen. Sowohl im Bereich der Forschung und Entwicklung, als auch Standardisierung gab es Fortschritte. Die Arbeiten wurden jedoch nicht abgeschlossen und in allen relevanten Bereichen werden Ergebnisse aus PEGASUS aufgegriffen und/oder sind PEGASUS-Projektpartner beteiligt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Projekt-Beirat:

Neben dem PEGASUS-Steuerkreis wurde ein Beirat für das Projekt eingerichtet. Dieser hat eine beratende Funktion, gab Empfehlungen und sorgte für eine aktive Vernetzung des Projekts und seiner Inhalte mit relevanten Stakeholdern bzw. Gremien aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft. Dieser Beirat wurde nach Projektstart insbesondere in Abstimmung mit dem BMWi eingesetzt und bestand aus dem Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (BMJV), Deutscher Verkehrssicherheitsrat (DVR), ADAC und dem Verband der Automobilindustrie (VDA).

Zusammenarbeit mit anderen Projekten:

Ausgehend von nationalen sowie internationalen abgeschlossenen und bestehenden Projekten, die sich in Teilen mit analogen Fragestellungen beschäftigten, wurde eine hohe Relevanz beigemessen. So wurde insbesondere mit den parallel laufenden Projekten ein enger Austausch vorgesehen. Dies konnte zumeist leicht dadurch gewährleistet werden, dass stets mindestens ein PEGASUS-Partner auch in den anderen Projekten mitgearbeitet hat. Im nationalen Raum waren insbesondere die Projekte Ko-HAF, aFAS sowie die grundfinanzierten Aktivitäten des DLR von besonderer Bedeutung.

Zusammenarbeit mit anderen Firmen/Einrichtungen:

Neben den PEGASUS-Projektpartnern gab es für das Projekt verschiedene Einrichtungen, Firmen und Forschungseinrichtungen, die als assoziierte Partner oder über Unterbeauftragungen für spezielle Forschungs- und Entwicklungsaufgaben eingebunden wurden:

- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Der BASt kommt eine wichtige Rolle im Zusammenhang mit der Nutzung der PEGASUS-Ergebnisse in der Fahrzeug-Homologation bzw. -Freigabe für den Markt zu. Deshalb erfolgte ein entsprechend enger Austausch mit der BASt. Aktivitäten der BASt, die insbesondere an die TP 1 bis 4 des Projekts PEGASUS angeknüpft werden können, wurden durch die BASt selbst bzw. in einer PEGASUS-unabhängigen Förderung getragen. Die BASt wurde als assoziierter Partner entsprechend in das Projekt eingebunden.
- dSpace: Die Firma dSpace besitzt langjährige Erfahrung im Arbeitsgebiet des Projekts PEGASUS. Hierbei sind insbesondere die Aktivitäten im Bereich Rapid Prototyping und virtuelle Absicherung von besonderer Bedeutung. Für diesen Zweck konnte die Firma dSpace wichtige Beiträge in TP 3 leisten. Auch dSpace wurde als assoziierter Partner eingebunden.
- OFFIS ist ein An-Institut der Universität Oldenburg und war für das Projekt PEGASUS insbesondere aufgrund seiner Expertise im Bereich der formalen Methoden von Bedeutung. Insbesondere konnten diese Methoden zu essentiellen Bausteinen für ein effizientes Testen automatisierter Straßenfahrzeuge genutzt werden. Diese Kompetenzen bringt das OFFIS in den TP 1 bis 3 ein. OFFIS war über Unteraufträge der Industriepartner in das Projekt eingebunden.

- Das Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen ist ebenfalls ein essentieller wissenschaftlicher Partner für das Projekt PEGASUS. Schwerpunkt liegt in TP 3, wo insbesondere Ansätze für die Identifikation von Testszenarien aus Versuchsdaten entwickelt wurden. Das ika war über Unteraufträge der Industriepartner in PEGASUS eingebunden.
- Institut für Regelungstechnik (IFR) der Technischen Universität Braunschweig: Die beiden Kerngebiete der AG Elektronische Fahrzeugsysteme des Instituts für Regelungstechnik sind das automatisierte Fahren und die Fahrzeugsystemtechnik. Über Unteraufträge war das IFR mit diesen Inhalten auch in das Projekt PEGASUS eingebunden und hat Schwerpunkte in den TP 1, 2 und 3.
- Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Der VDA vereinigt unter einem Dach die deutschen Automobilhersteller für Pkw und Nutzfahrzeuge sowie deren Zulieferer. Über 600 Mitglieder gehören dem Verband an. Diese weltweit einzigartige Mitgliederbasis gibt dem VDA ein besonderes Gewicht auf nationaler und internationaler Ebene. Der VDA tritt gemeinsam mit seinen Mitgliedern für eine saubere und sichere Mobilität der Zukunft ein. Zusätzlich ist der VDA der Veranstalter der Internationalen Automobil-Ausstellung (IAA), der weltgrößten Automobilmesse. Der VDA wurde eng mit PEGASUS assoziiert, um einen kontinuierlichen Wissensaustausch zu ermöglichen und wichtige Anforderungen aus Sicht der Industrie aufnehmen zu können. Die Aufwände des VDA wurden durch den VDA selbst getragen.

Darüber hinaus ergab sich zumeist ausgehend von der internationalen Ergebnisdiskussion und -Verbreitung im Rahmen, bzw. ausgehend von den PEGASUS-Expert-Workshops und Symposien ein weiterer Austausch mit internationalen Firmen aus dem Bereich Fahrzeughersteller, Zulieferer sowie Verbänden und politischen Einrichtungen.

2 Eingehende Darstellung

Zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen werden die notwendigen Bausteine in PEGASUS in vier inhaltlichen Teilprojekten sukzessive erarbeitet.

Jedes Teilprojekt ist dabei durch die Anforderungen und Rahmenbedingungen aus der Industrie (Hersteller, Zulieferer und Prüfeinrichtungen) und dem Ziel der Gestaltung innovativer, zukünftiger Produkte geprägt, um die Praxisrelevanz der erzielten Forschungs- bzw. Entwicklungsresultate zu gewährleisten.

Ausgehend von den Fragestellungen der vier Teilprojekten „Szenarienanalyse und Qualitätsmaße“, „Umsetzungsprozesse“, „Testen“ und „Ergebnisreflektion und Einbettung“ (TP 1 bis TP 4) ist eine Methode zur Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen entstanden, die praxisnah erprobt wurde.

Nachfolgend erfolgt eine kurze Darstellung der Ziel- und Fragestellungen der Teilprojekte ergänzend zu Kapitel 1.3.

2.1 Umfänge der Teilprojekte

TP 1 Szenarienanalyse und Qualitätsmaße

Hochautomatisierte Fahrfunktionen erlauben es dem Fahrer, sich in einem spezifischen Anwendungsszenario wie z.B. dem Fahren auf der Autobahn von der Fahraufgabe abzuwenden. Die automatisierte Fahrfunktion übernimmt die Fahrzeuglängs- und Fahrzeugquerführung vollständig, ohne dass der Fahrer das System dauerhaft überwachen muss. Das System muss das Fahrzeugumfeld kontinuierlich hinreichend gut erfassen, verstehen und interpretieren, um Schlussfolgerungen ziehen und beständig adäquate Handlungen ableiten zu können.

Die Leistungsfähigkeit des technischen Systems muss im Anwendungsfall derjenigen eines menschlichen Fahrers mindestens entsprechen und idealerweise diese sogar übertreffen, um positiv auf das Situationsgeschehen einwirken zu können. Um aus diesem Grundsatz konkrete Anforderungen an das technische System ableiten zu können stellt sich die Frage: *Wie gut ist die menschliche Leistungsfähigkeit im Anwendungsfall?* Und *Wie Gut ist gut genug?*

Hochautomatisierte Fahrfunktionen sind in ihrer Leistungsfähigkeit durch technische und physikalische Grenzen beschränkt. Nicht jeder der heutigen Unfälle kann daher zukünftig durch automatische Fahrfunktionen verhindert werden. Ähnlich wie bei der Einführung von Sicherheitsgurt und Airbag wird es durch hochautomatisierte Fahrfunktionen zudem aufgrund des sogenannten Automationsrisikos zu neuen Arten von Unfällen kommen. Welche verkehrlichen Situationen ein automatisiertes Straßenfahrzeug mit einer gewissen Zuverlässigkeit handhaben muss, ist für die Einführung von HAF-Serienprodukten jedoch essentiell, denn eine technische Innovation wird ohne gesellschaftliche Akzeptanz abgelehnt. Somit stellt sich die Frage: *Welche technische Leistungsfähigkeit wird im Anwendungsfall erreicht und wird diese gesellschaftlich akzeptiert?*

Aus der Beantwortung dieser beiden Grundsatzfragen resultierten letztendlich funktionale Anforderungen an das technische System, welche für Test und Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen Grundvoraussetzung sind. Aufgabe des Teilprojektes 1 war es, diese Grundsatzfragen zu beantworten. Durch die Beantwortung dieser Fragen konnten folgenden konkreten Zielsetzungen für das Teilprojekt 1 erreicht werden: Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur Festlegung von Auslegungskriterien für hochautomatisierte Fahrfunktionen sowie die Demonstration diese Methoden und Werkzeuge anhand der konkreten Beispielfunktion Autobahn-Chauffeur.

1. Ableiten funktionaler Anforderungen an die Beispielfunktion
2. Übergabe dieser Anforderungen an die Teilprojekte 2 und 3 als Arbeitsgrundlage.

Zum Erreichen dieser Ziele musste im TP 1 zunächst der beispielhafte Anwendungsfall detailliert beschrieben werden: der Autobahn-Chauffeur. Anschließend wurden kritischer Verkehrs-

situationen in diesem Anwendungsszenario ermittelt, z.B. mit Hilfe von bestehenden Unfalldaten, Realfahrtstudien und bestehenden Ansätzen aus anderen Projekten, welche durch zusätzliche Fahrsimulatorstudien geprüft wurden. Standardsituationen und kritische Szenarien flossen in eine Testspezifikations-Datenbank ein, die es ausgehend von einer Testfallverwaltung ermöglicht, in TP 3 geeignete Testläufe in der Simulation sowie auf dem Prüfgelände systematisch zu durchlaufen. Ausgehend von entsprechenden Metriken wurden die einzelnen Szenarien, bspw. auf Ihre Kritikalität untersucht.

Zur Herleitung einer Bewertungsfunktion automatische Fahrfunktionen wurde im Folgenden angenommen, dass für eine ausreichende gesellschaftliche Akzeptanz sichergestellt werden muss, dass das System in möglichst allen realistisch zu erwartenden Fahrereignissen die Situation mindestens ebenso gut wie ein „durchschnittlicher“ Fahrer beherrschen muss. Dies wird auch bspw. von der durch das BMVI eingesetzten Ethikkommission (Ethics Commission Automated and Connected Driving appointed by the German Federal Minister of Transport and Digital Infrastructure, 2019) gefordert.

Um eine Übertragbarkeit der gewonnen Ergebnisse und Verfahren für weitere Anwendungsfälle sicherstellen zu können und somit die Skalierbarkeit des Ansatzes aufzuzeigen, erfolgte aufbauend auf den Ergebnissen zum Autobahn-Chauffeur die theoretische Betrachtung des erweiterten Anwendungsszenarios im Bereich der Landstraße.

TP 2 Umsetzungsprozesse

Für die erfolgreiche Einführung von automatisierten Fahrfunktionen ist es unabdingbar, dass während der Entwicklung der aktuelle Stand der Technik als „State-of-the-Art“ und eine generell akzeptierte sichere Vorgehensweise eingehalten wird. Das diesbezügliche Vorgehen sollte auch möglichst einheitlich in der Community über alle Bereich hinweg nachvollziehbar sein und dokumentiert werden. Dabei wurde in PEGASUS größter Wert auf die Integrierbarkeit der arbeiteten Lösungsansätze in bestehende Unternehmensprozesse gelegt und diese, sowie bestehende Gesetze, Normen und Vorschriften als Ausgangspunkt für die Arbeiten innerhalb des TP 2 genutzt.

Die Identifizierung und Erstellung von möglichst allgemeingültigen Entwicklungs- sowie Testprozessen stand als Querschnittsvorgang im Fokus des TP 2. Die Grundlage für die Ausarbeitung bildet das TP 1: Szenarienanalyse und Qualitätsmaße sowie die Analyse des Modifikationsbedarfes existierender Metriken und Prozesse (u.a. der funktionalen Sicherheit) wie sie bereits von der Automobilindustrie eingesetzt werden für die Zwecke der Fahrzeugautomatisierung. Ergänzend können in Zusammenarbeit mit TP 1 neuartige Konzepte (zum Beispiel unter anderem das der Dekomposition der Fahraufgabe) genutzt werden, um spezifische Testfälle für die Fahraufgabe abzuleiten.

Anschließend wurde die jeweiligen Funktionen im Hinblick auf Ihre Einstufung gemäß Ihrer System-Klassifikation analysiert: Im Besonderen musste die jeweilige Verantwortlichkeit des Fahrers bzw. des Automatisierungssystems sowie die rechtlichen Anforderungen berücksichtigt werden. Hierzu dient vor allem das SAE J3061-Dokument, welches bezüglich der Stufen als auch inhaltlich mit der Klassifikation des Verbandes der Automobil-Industrie übereinstimmen. Beide genannten Dokumente beruhen auf der unmittelbaren Vorarbeit durch die Bundesanstalt für das Straßenwesen (BASt).

Für die Einbindung von neuen Prozessen, die sich im Rahmen der PEGASUS-Gesamtmethode ergaben, wurden diese so allgemein definiert, dass sie im optimalen Falle von den beteiligten Partnern in bestehende etablierte Prozesse direkt eingebunden und angewendet werden können. Ein Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der vorbereitenden Arbeit, die aus den Leitlinien abgeleiteten Aufgaben auf Umsetzbarkeit im Labor abzuprüfen, bzw. zu definieren, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, um adäquate Testgelände, Prüfstände oder verknüpfte Anlagen bereit zu stellen.

Die Umsetzungsprozesse müssen dabei dem schrittweisen Vorgehen des automobilen Entwicklungsprozess Rechnung im Rahmen des V-Modells genügen und ausreichend flexibel

sein, um auch weiterhin den noch notwendigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei automatisierten Fahrfunktionen zu ermöglichen. Dennoch mussten sie so gestaltet werden, dass sie ausreichend robust für den Einsatz im Rahmen einer Serienentwicklung sind. Dies musste u.a. durch das Einbeziehen von Rückkopplungsschleifen bzw. -ebenen bezüglich von Lern-Effekten im V-Modell geschehen.

Typischerweise werden unterschiedliche Stadien der Fahrzeugnutzungsstufe beim Entwicklungsprozess eingesetzt bevor Serienfahrzeuge an Kunden verkauft werden können. Die Umsetzungsprozesse umfassen also Simulationen auf unterschiedlichen Ebenen (siehe TP 3). Darüber hinaus müssen diese Methoden aber das komplette Spektrum beginnend mit dem Einsatz von Fahrzeugen auf Testgeländen durch zugelassene Fahrer, über die begrenzte Nutzung außerhalb von Testgeländen in Entwicklungsfahrzeugen durch Testingenieure und die Nutzung auf öffentlichen Straßen nach Einweisung in das Fahrzeug bis hin zu einer einschränkungsfreien Nutzung abdecken. Hierzu erfolgten in PEGASUS erste Überlegungen, wie auch aus dem Lebenszyklus Rückschlüsse auf die Weiterentwicklung von automatisierten Systemen geschlossen werden kann.

Die entstanden Methoden konnten im Anschluss in TP 3 für die eigentlichen Tests genutzt werden.

TP 3 Testen

Im Unterschied zu konventionellen Funktionen erfordern hochautomatisierte Fahrfunktionen ein integrales Absicherungskonzept, das aus verschiedenen, aufeinander abgestimmten Werkzeugen besteht. Vor dem Hintergrund einer ausreichenden Testabdeckung stellte das TP 3 das sinnvolle Zusammenspiel zwischen verkehrlichen Szenarien (AP 3.1), Labortests und Simulation (AP 3.2), Prüfgeländetests (AP 3.3) sowie Feldabsicherung (AP 3.4) dar. Das Ziel des TP 3 und seiner Arbeitspakete war die Beantwortung von essentiellen Fragestellungen, wo welches zu prüfende Szenario in welchen Umfängen getestet werden muss, um ein abgesichertes Ergebnis zu erzielen. Hierbei war insbesondere zu prüfen, welche Elemente bereits ausreichend im Labor getestet werden können und wo weitere Tests auf d Prüfgelände, oder dem Realverkehr notwendig sind.

Mit dem Aufbau einer zentralen Datenbank im AP 3.1 zur Testfallverwaltung und zum Testfallmanagement, werden die in TP 1 gesammelten Daten durch die Datenbankmechanik vorverarbeitet und für das Testen bereitgestellt. Dabei wurde in PEGASUS großer Wert auf das Format der Ein- und Ausgangsdaten gelegt, sodass eine elektronische Übertragung in einem für Simulationen und Prüfanlagensteuerung geeigneten automatisiert lesbaren Format möglich wurde. In PEGASUS orientiert man sich an der OpenX-Familie, die sich bei ASAM (ASAM) aktuell in der Standardisierung befindet. Ausgehend von der Testmethodik erfolgt die Zuordnung auf die einzelnen Prüfumgebungen, sowie die Variation der Szenarien. Referenzprüfungen, die einen hohen Neuigkeitsgrad und/oder eine besondere Relevanz für die Überprüfung der Sicherheit von hochautomatisierten Fahrzeugen haben, werden in dem Projekt beispielhaft sowohl in der Simulation als auch in Prüfgeländetests durchgeführt und ausgewertet und so die Simulationsmethodik exemplarisch verifiziert.

Das AP 3.2 Labortests/Simulation stellt einen wesentlichen Baustein für den Sicherheitsnachweis einer hochautomatisierten Fahrfunktion dar. Die theoretisch für den Sicherheitsnachweis nach bisheriger Praxis zu fahrenden Kilometer liegen nach publizierten Schätzungen (Winner, Absicherung automatischen Fahrens, 2013) in einer Größenordnung, die heute im Absicherungsprozess nach Stand der Technik nicht darstellbar sind. Gleichzeitig umfasst eine hochautomatisierte Fahrfunktion wie der Autobahn-Chauffeur eine deutlich höhere Anzahl an möglichen Fahrsituationen als die bisher auf dem Markt befindlichen teilautomatisierten Fahrerassistenzsysteme. Inklusive der möglichen Umgebungsbedingungen für ein hochautomatisiertes Fahrzeug (z.B. Variation des statischen Verkehrsumfelds, der anderer Verkehrsteilnehmer und deren Fahrverhalten, des Wetters usw.) ergibt sich ein extrem großer Testraum. Ziel des AP 3.2 war es, die Absicherung äquivalent zu dieser großen Anzahl an zu fahrenden Kilometern als auch mit der großen Anzahl an möglichen Fahrszenarien und kom-

plexer Situationen mittels neuer, virtueller Testmethoden zu beherrschen. Auch in diesem Bereich wurde großer Wert darauf gelegt, dass Standards im Bereich der Schnittstellen (z.B. Open Simulation Interface OSI (ASAM - OSI)) und Datenformate etabliert werden.

Das AP 3.3 Prüfgeländetests hatte die wesentliche Aufgabe, die im AP 3.2 simulierten Prüfsituationen bezüglich ihrer Ergebnisse und insbesondere bezüglich der Aussagen für die Beherrschbarkeit von Situationen zu verifizieren und damit die Simulationsmethode für diese Anwendung zu validieren. Dazu wurden beispielhaft Situationen auf dem Prüfgelände nachgestellt, welche im Grenzbereich der Beherrschbarkeit liegen, und der Nachweis zu führen, dass diese Situationen ausreichend beherrscht werden. Dabei ging es auch darum solche Situationen nachzustellen, die in der Regel schwierig beherrschbare und komplexe Verkehrssituationen mit mehreren involvierten Fahrzeugen beinhalteten. Ergänzend können die Prüfgeländetests auch dann ergänzend zur Simulation durchgeführt werden, wenn simulationsbasierten Methoden allein nicht sinnvoll umgesetzt werden können.

In AP 3.4 Feldabsicherung wurden Aspekte behandelt, wie eine Feldabsicherung bei hauptsächlichen Einsatz von Simulationsmethoden gemäß AP 3.2 und Prüfgeländetests gemäß AP 3.3 gestaltet werden muss, um weiteres Wissen zu sammeln, welches direkt wieder in der Simulation genutzt werden kann. Beispielsweise galt es hier auf Basis von Flottendaten Vorläufersituationen von Gefahrensituationen mit einer präventiven Sichtweise zu erkennen, bezüglich ihres Risikopotentials zu analysieren und Maßnahmen abzuleiten.

TP 4 Ergebnisreflexion und Einbettung

Die Ergebnisse aus PEGASUS sollen den Grundstock zum Testen sowie zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen für spätere Serienprodukte bilden. Um dies sicherzustellen, müssen die erarbeiteten Ergebnisse allgemeingültig sein und sich idealerweise nahtlos in bestehende Unternehmensstrukturen integrieren lassen. Dies ist eins der essenziellen Ziele von PEGASUS. Das TP 4 Ergebnisreflexion und Einbettung hatte die Aufgabe die erarbeiteten Ergebnisse parallel zur Laufzeit kritisch zu reflektieren und mit den Teilprojekten zu diskutieren. Hiermit wurde sichergestellt, dass eine durch alle Partner tragfähige und umsetzbare Methode entstand.

Mit der Begleitung der Einbettung der Ergebnisse in die Unternehmensstrukturen wurde gewährleistet, dass die in PEGASUS erarbeiteten Ergebnisse auch praktisch genutzt und weiterentwickelt werden können. So wurde auf die Wiederverwendbarkeit der einzelnen Ergebnisse geachtet und nach der erfolgreichen Erprobung die Einbettung der Ergebnisse bei den einzelnen Partnern zum Projektende hin begleitet. Basierend hierauf wurde eine interne Bewertung der Projektergebnisse initiiert und ein Vorgehen mit der Industrie zur weiteren Nutzung entwickelt.

2.2 Fragestellungen der Teilprojekte

In den vergangenen Jahren haben eine Vielzahl von Firmen und Projekten eine Menge Aufmerksamkeit mit Prototypen erzeugt, wenn Sie automatisierte Fahrfunktionen demonstriert haben. Diese ShowCases suggerierten dabei nahezu produktreife Systeme, die jedoch zumeist nur hinreichend funktional entwickelt wurden.

Diese funktionalen Demonstrationen haben sich jedoch zumeist nicht mit einem umfangreichen Test sowie der Verifikation und Validierung beschäftigt. Bei einer genaueren Analyse zeigt sich auch schnell, wie hoch der Testaufwand ist. So haben Winner & Wachenfeld (Wachenfeld & Winner, 2015) aufgezeigt, dass die rechnerisch notwendige Distanz 6.22 Milliarden Kilometer beträgt, um sicherzustellen, dass alle Szenarien einmal von der Operational Design Domain (ODD) Autobahn-Chauffeur durchlebet werden und das Fahrzeug so gut wie ein menschlicher Fahrer ist. Dies zeigt den unverhältnismäßigen Aufwand, der erforderlich ist, um automatisierte Fahrfunktionen durch einen entfernungsbasierten Ansatz abzusichern.

Leider bietet der aktuelle Stand der Technik derzeit keine Methoden, die direkt angewendet werden können, um diesem Dilemma zur Untersuchung von einer unrealistisch hohen Anzahl von Milliarden-Testkilometern zu entgehen. Daher sind neue Methoden erforderlich, um effizient zu testen und automatisierte Fahrfunktionen zu verifizieren und zu validieren. Die Forschung muss hierzu einen neuen allgemeinen Stand der Technik für Testmethoden und Testfallauswahl definieren, der für eine Freigabe von hochautomatisierten Fahrfunktionen verwendet werden kann. Dieser Aufgabe hat sich das Projekt PEGASUS gestellt.

Ein möglicher Ansatz, der auch in anderen Bereichen wie Softwaretests usw. verwendet wird, ist ein szenariobasierter Ansatz zum Testen, zur Verifikation sowie zur Validierung hochautomatisierter Funktionen. Dieser Ansatz bietet den Vorteil eines systematischen und strukturierten Vorgehens anstelle eines entfernungsbasierten Ansatzes mit zufälligen Testfällen. Eine Änderung des Ansatzes wirft jedoch auch neue (Forschungs-)Fragen auf. Zwei Beispiele sind: „Welches Leistungsniveau wird von einem automatischen Fahrsystem erwartet?“ und „Wie können wir überprüfen, ob die gewünschte Leistung konstant erreicht wird?"

Diese und weitere Fragestellungen wurden innerhalb des Projektes in den vier Teilprojekten, mit dem Ziel der Erstellung einer Gesamtmethode, bearbeitet.

Nachfolgend sind die wichtigsten fachlichen Fragestellungen für die Teilprojekte noch einmal formuliert:

Das **Teilprojekt 1 Szenarienanalyse & Qualitätsmaßnahmen** befasst sich innerhalb des Projekts mit den folgenden Fragen und identifizierte die nachfolgend skizzierten Ergebnisse:

- Was ist die menschliche Fahrleistung innerhalb der ODD (Operational Design Domain)?

  Um die Frage zu beantworten, wurde das menschliche Fahrverhalten aus verschiedenen Blickwinkeln analysiert. Zunächst wurde die GIDAS-Unfalldatenbank (GIDAS) verwendet, um nach Unfällen zu suchen, die in den ODD der definierten beispielhaften Autobahn-Chauffeur-Funktion fallen würden. Zudem wurden mehrere Simulatorstudien durchgeführt, um ein Indikatormodell für die menschliche Fahrleistung in ausgewählten Szenarien des Highway ODD abzuleiten.

- Wie ist die Leistungsfähigkeit der hochautomatisierten Fahrfunktion innerhalb derselben ODD?

  Die Messung der Leistungsfähigkeit der hochautomatisierten Fahrfunktion wurde in PEGASUS durch die Ausführung und Auswertung von Szenarien in der Simulation, auf Teststrecken oder im realen Verkehr ermittelt. Während die eigentliche Ausführung der Tests innerhalb von Teilprojekt 3 durchgeführt wurde, konzentrierte sich dieses Teilprojekt auf a.) Definition eines systematischen Prozess zur Szenarioerzeugung sowie die Definition einer Szenariosyntax, b.) Berechnungsvorschriften für Kritikalitätsparameter (KPI) für aufgezeichnete Szenarien und c.) einen auf Experten ba-

sierenden Ansatz zur Definition von Automatisierungsherausforderungen / -risiken für hochautomatisierte Fahrfunktionen.

- Wird die Leistungsfähigkeit der hochautomatisierten Fahrfunktion / des System Under Test (SUT) sozial akzeptiert?

  Kurz gesagt, wir wissen es nicht! Es wurden mehrere Technologieakzeptanzkriterien aus verschiedenen technischen Systemen wie dem Zugverkehr analysiert und ein Niveau (oder einen Bereich) für die Gesamtleistung gefunden, das wahrscheinlich sozial akzeptiert wird. Jedoch muss auch festgestellt werden, dass ein echter Sicherheitsnachweis erst nach Markteinführung erbracht werden kann und dass die Extrapolation von Testergebnissen oder anderen Maßnahmen (z. B. umfangreiche Testfahrten) nur dann als Indikator oder Argument dienen kann, wenn Erfahrungen mit dem endgültigen Produkt vorliegen.

- Welche Kriterien und Maßnahmen können daraus abgeleitet werden?

  Basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Frage wurde eine argumentative Struktur geschaffen, die als „Sicherheitsargument“ bezeichnet wird. Aufgrund dieser Argumentation ist es möglich eine allgemein positive Risikobilanz zu argumentieren, wie es u.a. von der deutschen Ethikkommission gefordert wird. Mögliche Indikatoren wie die Analyse der Unfalldaten, Automatisierungsprobleme oder Vergleiche mit dem menschlichen Fahrer werden hier miteinander verknüpft und bilden eine kombinierte Sicherheitsargumentation.

Den Schwerpunkt des **Teilprojekts 2 Umsetzungsprozesses** kann man mit einer Forschungsfrage zusammenfassen:

- Welche Methoden, Prozesse und Werkzeuge sind erforderlich?

  Das TP 2 analysierte bestehende Prozesse, die bereits in der Automobilindustrie etabliert sind, hinsichtlich der Sicherheitsargumentation und lieferte die Grundlage für Tests mit einem modifizierten Entwicklungsprozess. Dies führt zu einer neu erweiterten Prozessmethodik. Notwendige Änderungen an den Entwicklungsprozessen können vom Grad des Automatisierungsgrades und der entsprechenden ODD abhängen. Die Implementierung muss den schrittweisen Ansatz der Automobilentwicklungsprozesse berücksichtigen und ausreichend flexibel sein, um den erforderlichen zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu decken. Dennoch muss es für die Anwendung von Funktionen im Rahmen einer Serienentwicklung durch die Einbeziehung von Rückkopplungsschleifen bzw. Ebenen und im Hinblick auf Lerneffekte ausreichend robust sein. So wird bspw. die Notwendigkeit von Simulationen auf verschiedenen Ebenen analysiert. Darüber hinaus müssen die Testmethoden das gesamte Spektrum abdecken, angefangen bei der Verwendung von Fahrzeugen auf Teststandorten durch autorisierte Fahrer über die begrenzte Verwendung außerhalb von Teststandorten in Entwicklungsfahrzeugen durch Testingenieure bis hin zu ersten Tests auf einigen öffentlichen Strecken zu den allgemeinen Tests auf öffentlichen Straßen.

Das **Teilprojekt 3 Testen** beschäftigte sich in PEGASUS mit folgenden Forschungsfragen:

- Wie wird die große Auswahl an Szenarien in szenariobasierten Tests modelliert?

  Zu Beginn der PEGASUS-Methode wurde ein Modell zur systematischen Beschreibung von Szenarien mit den folgenden sechs unabhängigen Ebenen definiert:

  1. Straße (Geometrie,…)
  2. Straßenmöbel und Regeln (Verkehrszeichen,…)
  3. Vorübergehende Änderungen und Ereignisse (Straßenbau,…)
  4. Bewegende Objekte (verkehrsrelevante Objekte wie: Fahrzeuge, Fußgänger,… die sich relativ zum zu testenden Fahrzeug bewegen)
  5. Umgebungsbedingungen (Lichtsituation, Straßenwetter,…)
  6. Digitale Informationen (V2X, digitale Daten / Karte,…)

  Das Beschränken dieses großen Parameterraums auf die ODD des Testobjekts bietet einen vollständigen Testraum des Systems. Dieser Raum ist jedoch für die mentale Welt nicht leicht zu erfassen. Um die Herausforderung zu lösen, wurde in PEGASUS ein logisches Szenario definiert, in dem einige Parameter des Szenariomodells festgelegt und einige Parameter variabel sind. Ein Beispiel für die Strukturierung eines logischen Szenarios ist die Verwendung parametrierbarer, disjunktiver Grundkonstellationen von sich bewegenden Objekten auf Ebene 4, die zu einer Kollision des Testobjekts mit den sich bewegenden Objekten führen, wenn das Testobjekt nicht eingreift. Das logische Szenario beschreibt dann den vollständigen Raum der relevanten Szenarioparameter der Schichten 1 bis 3 und 5 bis 6 sowie den Parameterraum der ausgewählten Grundkonstellation der sich bewegenden Objekte. Der gesamte Parameterraum des gesamten Testraums wird also getestet, indem er mit den disjunktiven Grundkonstellationen der Ebene 4 zerlegt wird. Dabei können „alle“ logischen Szenarien innerhalb des Raums aller logischen Testfälle, was dem gesamten Testraum entspricht, in der Simulation getestet werden.

- Testen eines logischen Szenarios: Wie funktioniert es?

  Innerhalb des PEGASUS-Projekts bedeutet das Testen der automatisierten Fahrfunktion in einem logischen Szenario die Absicherung des Testobjekts im Sinne einer Minimierung des Kollisionsrisikos im gesamten Parameterraum eines logischen Szenarios. Das übergeordnete Ziel besteht darin, kollisionsrelevante, konkrete Parametersätze oder Bereiche im zu testenden Parameterraum zu identifizieren. Aufgrund der großen Anzahl von Tests, die durchgeführt werden müssen, erfolgt die Zuordnung auf die einzelnen Testumgebungen durch ein ausgeklügeltes Testkonzept, das sich aus der Simulation der Testinstanzen, dem Nachweis von Gound und dem Feldtest zusammensetzt.

  Die erste Aufgabe besteht darin, das Testen als Optimierungsproblem mit einem Kritikalitätsmaß als Zielfunktion und „Bestanden / Nicht Bestanden-Kriterien“ in seinem Testraum zu formulieren. Der Workflow beim Testen eines logischen Szenarios im Rahmen der PEGASUS-Methode lautet entsprechend: Sensitivitätsanalyse > Optimierung> Varianz- / Wahrscheinlichkeitsbasierte Robustheitsanalyse > Einhaltung des Sicherheitsspielraums.

  Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse werden die Variablen identifiziert, die am meisten zu einer möglichen Verbesserung des Testziels beitragen. Basierend auf dieser Identifikation kann die Anzahl der relevanten Parameter drastisch reduziert werden. Empirische Studien im Projekt haben gezeigt, dass in vielen Fällen die Anzahl der wichtigsten Parameter zwischen 10 und 20 liegt. Aufgrund dessen kann eine effektive Zerlegung und effektive Schätzung der Testfälle angewendet werden. Die PEGASUS-Datenbank bietet für jedes logische Szenario mehrere Auswertungen, die als qualitativ hochwertige Ausgangspunkte für die Optimierung (konkrete Parametersätze für reprä-

sentative Unfälle sowie besonders kritische Konstellationen vor dem Unfall, die in der Realität für das logische Szenario beobachtet wurden) und zur Steuerung der Optimierung (Verteilungen und Korrelationen von Parametern des logischen Szenarios) verwendet werden können.

Basierend auf stochastischen Variationen innerhalb des Parameterraums der logischen Szenarien werden konkrete Parametersätze automatisch erstellt. Jeder konkrete Parametersatz entspricht einem konkreten Testfall und umgekehrt. Für jeden Testfall ermöglicht das Simulationsmodell eine Black-Box-Lösung, und die Modellantworten werden hinsichtlich der Bestanden / Nicht Bestanden-Kriterien bewertet. Das Abtastschema muss hierzu die angegebene Parameterverteilung und ihre Abhängigkeiten mit ausreichender Genauigkeit darstellen. Die Forschungsfrage nach der ausreichenden Genauigkeit ist dabei jedoch noch offen. Um diese Frage zu beantworten, wurde im Rahmen des PEGASUS-Projekts der Ansatz zur Erstellung einer Übertragungsfunktion zwischen Szenarioparametern (Input) und Testergebnis (Ausgabe, z. B. Kollision Ja / Nein, Abstand zwischen Ego-Fahrzeug und relevantem Ziel) bewertet. Der Ansatz wird dabei so auch in anderen Bereichen verwendet.

Die Robustheitsanalyse wird verwendet, um den Einfluss einer Variation der Eingangsvariablen zu untersuchen, z.B. Parameter innerhalb des konkreten Parametersatzes oder Variation (Streuung) der Modellantwort. Dieser Ansatz kann dabei auf Varianz oder Wahrscheinlichkeit basieren.

Ausgehend von dem Suchansatz innerhalb des Parameterraums können basierend auf Pass / Fail-Kriterien konkrete Szenarien mit Kollisionswahrscheinlichkeit für die Simulation bewertet werden. Kritische Fälle, zum Teil nicht erfüllte oder nahe erfüllte Passkriterien, lassen sich unter Realbedingungen auf einem Testgelände erneut testen. Ziel ist es, im Parameterraum eine detaillierte Suche nach kritischen Parametersätzen durchzuführen.

- Wie kann die Vollständigkeit relevanter Testfälle sichergestellt werden? Wie sehen die Kriterien und Maßnahmen für diese Testfälle aus?

  Ausgehend von dem 6-Ebenen-Modell eines Szenarios wurden der Testraum des Systems und der Testraum logischer Szenarien systematisch ermittelt und ermöglichen eine vollständige strukturierte Beschreibung der Szenarien. Vollständig bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Systematisierung, die die Szenarien beschreibt, vollständig ist, da das Modell mit zusätzlichen Ebenen oder Elementen innerhalb der Ebenen erweitert werden kann. Die Sortierung der Elemente innerhalb eines Szenarios nach Ebenen ist dabei eindeutig.

  Die verbleibende Restwahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kollisionen in einem logischen Szenario kann jedoch solange nicht gewährleistet werden, so lange sich kein Parametersatz eines solchen Szenarios im Fehlerbereich befindet. Sie kann jedoch durch Berechnung der Wahrscheinlichkeit von Parametern konkreter Szenarien mit zunehmender Kritikalität, die keine Kollision darstellen, angenähert werden. Während dieses Prozesses ist ein Gradient zu abnehmenden Wahrscheinlichkeiten zu sehen. Somit sind die Kollisionen, die durch Überschreiten der Grenze zu einer wachsenden Kritikalität auftreten, höchstens so wahrscheinlich wie die zuvor berechnete Wahrscheinlichkeit eines zuvor bestimmten Kritikalitätsniveaus, z.B. durch die Berücksichtigung einer abnehmenden Wahrscheinlichkeit innerhalb konkreter Szenarien eines logischen Szenarios für TTC = 1,0, TTC = 0,5, TTC = 0,1, TTC = 0,01, TTC = 0,001, usw. Eine Obergrenze ist beispielsweise die Wahrscheinlichkeit für Szenarien mit TTC = 0,01. Da der Raum aller logischen Szenarien dem gesamten Testraum entspricht, liefert dieser Ansatz auch eine Annäherung an die Restwahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kollisionen. Die Streuung des Schätzers für die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen sollte eine Grenze (~ 20%) nicht unterschreiten.

- Was kann im Labor oder in der Simulationen getestet werden?

  In der Simulation wird der Testraum nach kritischen Fällen oder Bereichen durchsucht. Die Validierung erfolgt durch Prüfgelände- und Feldversuche.

- Was muss auf Prüfgeländen getestet werden, was muss auf einer realen Straße getestet werden?

  Kritische Fälle mit nicht erfüllten oder nahezu erfüllten Bestehenskriterien, die durch Simulation identifiziert wurden, werden aus Beweisgründen in realen Fahrzeugen erneut auf dem Prüfgelände getestet. Darüber hinaus können manuell ausgewählte konkrete Testfälle auf dem Prüfgelände bewertet werden (unter Anderem: kritische Situationen, Unfallszenarien, Bewertungs- oder Zertifizierungstests oder seltene Ereignisse, die in Feldtests kaum erlebbar sind). Die Simulation hat ihre Grenzen, insbesondere in Bereichen mit extremer Fahrdynamik und speziellen Sensorphänomenen, die in den Sensormodellen noch nicht implementiert wurden. Diese Einschränkungen werden ebenfalls durch Tests auf Prüfgeländen und in Feldtest ausgeglichen. Daher sollten Tests mit hoher Relevanz in Bezug auf die Antriebsdynamik und die tatsächliche Sensorleistung auf Prüfgeländen durchgeführt werden. Während der Feldtests ist es nicht möglich bestimmte Testfälle zu testen. Stattdessen wird das Verhalten von Fahrfunktionen im realen Verkehr getestet. Das Hauptziel ist es Überraschungen zu finden (d.h. neue Szenarien, neue Parameter). Diese Überraschungen können durch unterschiedliche Einflüsse entlang der Strecke (z.B. Tunnel) oder Zeit (z.B. niedriger Sonnenstand) auftreten.

Das **Teilprojekt 4 Ergebnisreflexion und Einbettung** analysierte die beiden folgenden Kernfragestellungen:

- Ist das Konzept nachhaltig?

  Der Vorschlag einer Struktur für die Sicherheitsargumentation und die PEGASUS-Gesamtmethode vereinen mehrere Einzelschritte zu einem Gesamtansatz, der während der Projektlaufzeit definiert und verfeinert wurde. Das Gesamtkonzept ermöglicht dabei weitere Diskussionen sowie Erweiterungen und bildet die Grundlage für die Verfeinerung durch Nachfolgetätigkeiten. Im Projekt gesammeltes sowie aufbereitetes Feedback von Internen sowie Externen zeigten die Notwendigkeit eines solchen Konzeptvorschlags zur Absicherung der hochautomatisierten Fahrfunktion. Bis zum Ende des Projektes wurde dem Konsortium kein anderes so umfassendes Konzept als Alternative bekannt oder vorgeschlagen, welches die komplexe Frage der Bewertung hochautomatisierter Fahrfunktionen beantwortet.

- Wie funktioniert der Einbettungsprozess?

  Nachfolgetätigkeiten zur Einbettung des Konzepts umfassen die Arbeit von Projektpartnern, auf PEGASUS aufbauende Forschungs- und Entwicklungsprojekte sowie die weiterführende internationale Vereinheitlichung und Standardisierung der PEGASUS-Ergebnisse. Die Einbettung durch die Projektpartner wurde während der Projektlaufzeit begonnen, es wird jedoch noch einige Zeit dauern, bis diese in den Unternehmen abgeschlossen ist. Ein Nachfolgeprojekt zur Erweiterung des PEGASUS-Konzepts auf andere Anwendungsfälle als städtische Level 4-ODD ist das Projekt V&V Methoden, wo die Ergebnisse aus PEGASUS ebenfalls aufgegriffen werden.

2.3 Erzielte Ergebnisse

Das Forschungsprojekt PEGASUS befasste sich mit der Erforschung neuer Methoden zur Verifizierung und Validierung hochautomatisierter Fahrfunktionen, gemäß dem SAE Level 3. Zur Erzielung praxisnaher Ergebnisse wurde die zukunftsnahe Beispielanwendung Autobahn-Chauffeur ausgewählt. Dabei hatte PEGASUS stets den Anspruch, dass die Ergebnisse auch auf andere Anwendungsfälle übertragbar sind.

Das Testobjekt Autobahn-Chauffeur wird dabei in PEGASUS auf Systemebene beschrieben und wurde innerhalb des gesamten Projekts als Black Box behandelt. Eine detaillierte Ansicht der Architektur des gesamten Fahrzeugs oder anderer Einzelkomponenten und ihrer Architektur stand nicht im Projektfokus und wurde entsprechend nicht explizit behandelt oder getestet. Dies muss durch zusätzliche Systemtests erfolgen.

PEGASUS liefert neben einem Vorgehen für die automatisierte Überprüfung und Validierung der Fahrfunktion zusätzliche und notwendige Argumentationen und entsprechende Beweise für einzelne Bausteine. In PEGASUS erfolgt die Bewertung auf Basis eines „Safety by Testing“-Ansatzes zum Sicherheitsnachweis. Andere Herangehensweisen aus dem Bereich „Safety by Design“ werden dabei nicht berücksichtigt. Eine mögliche Zusammenführung beider Ansätze ist jedoch denkbar und müsste in weiteren Forschungsprojekten überprüft werden.

Um einen neuen Stand der Technik für die Überprüfung und Validierung hochautomatisierter Fahrfunktionen zu definieren, wurden in vier Teilprojekten innerhalb des Projekts verschiedene Testmethoden, Qualitätskriterien, Verkehrsszenarien, Tools und Richtlinien analysiert. Wobei die Ergebnisse der vier Teilprojekte gegenseitige Abhängigkeiten enthalten. Die Ergebnisse und die Abhängigkeiten wurden in einem iterativen Prozess kombiniert, um eine gemeinsame PEGASUS-Gesamtmethode zur Bewertung hochautomatisierter Fahrfunktionen zu definieren.

In den folgenden beiden Kapiteln 2.3.1 und 0 folgen ein Überblick über die PEGASUS-Gesamtmethode und deren Schnittstellen sowie eine Detaildarstellung der einzelnen Schritte der Methode.

2.3.1 Überblick über die PEGASUS-Gesamtmethode

Dieses Kapitel vermittelt einen Überblick über die Architektur der PEGASUS-Methode. Der Fokus liegt auf den Hauptzielen der 20 verschiedenen Schritte der Methode und den Verbindungen zwischen diesen Elementen.

Zur Erläuterung der Methode wird diese hier zunächst mithilfe der fünf Grundelemente erläutert und weiteren Verlauf auf die 20 Schritte eingegangen.

Der Prozessablauf der Gesamtmethode wird von links unten nach links oben gegen den Uhrzeigersinn gelesen und besteht aus fünf Grundelementen (s. Abbildung 3):

1. Szenarienermittlung
2. Anforderungsermittlung
3. Speicherung und Verarbeitung von Informationen in einer Datenbank
4. Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion
5. Argumentation

Innerhalb dieser Grundelemente sind alle relevanten Methoden zur Überprüfung und Validierung der hochautomatisierten Fahrfunktion in fünf nacheinander ausgeführten Prozessschritten zusammengefasst. Bei jeder Verwendung der PEGASUS-Methode werden diese Prozessschritte nacheinander einzeln verwendet und können dabei auch jeweils einen Input für einen weiteren Durchlauf der Methode bereitstellten.

Das erste Element ist die Szenarienermittlung. Die Eingabeinformationen bestehen insbesondere aus dem gegebenen Anwendungsfall (der Definition des Testobjekts) und vorhande-

nen Ergebnissen zuvor ausgeführter Schleifen der PEGASUS-Methode. Das primäre Ziel dieses Prozessschritts besteht darin, systematisch logische Szenarien in Bezug auf das Testobjekt basierend auf abstraktem Wissen zu identifizieren, welches direkt in die Datenbank übertragen wird. Das zweite Ziel besteht darin, vorhandene aufgezeichnete Szenarien in ein gemeinsames Format zu konvertieren. Dieser Schritt ist erforderlich, um die verschiedenen Arten von Informationsquellen in der Datenbank einheitlich verarbeiten zu können. Die Methoden der Datenverarbeitung werden später noch einmal ausführlich beschrieben. Ausgegeben werden nach der Verarbeitung logische Szenarien und die Informationen aus zuvor ausgeführten Szenarien in einem gemeinsamen Format.

Das zweite Element Anforderungsermittlung wird parallel zu dem ersten Element ausgeführt. Die Eingangsinformationen sind dabei abhängig vom Anwendungsfall und beinhalten auch Ergebnisse / Wissen aus vorherigen Schleifen der PEGASUS-Methode. Innerhalb des zweiten Elements wird abstraktes Wissen verwendet, um Anforderungen an die hochautomatisierte Fahrfunktion oder allgemeine Verhaltensanforderungen für das Testobjekt zu definieren. Diese Anforderungen werden in der Datenbank verwendet, um Bewertungskriterien für die Szenarien hinzuzufügen und sie zu Testfällen zu kombinieren. Zusätzlich werden die identifizierten Anforderungen verwendet, um Prozessspezifikationen für das vierte Element zur Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion zu definieren.

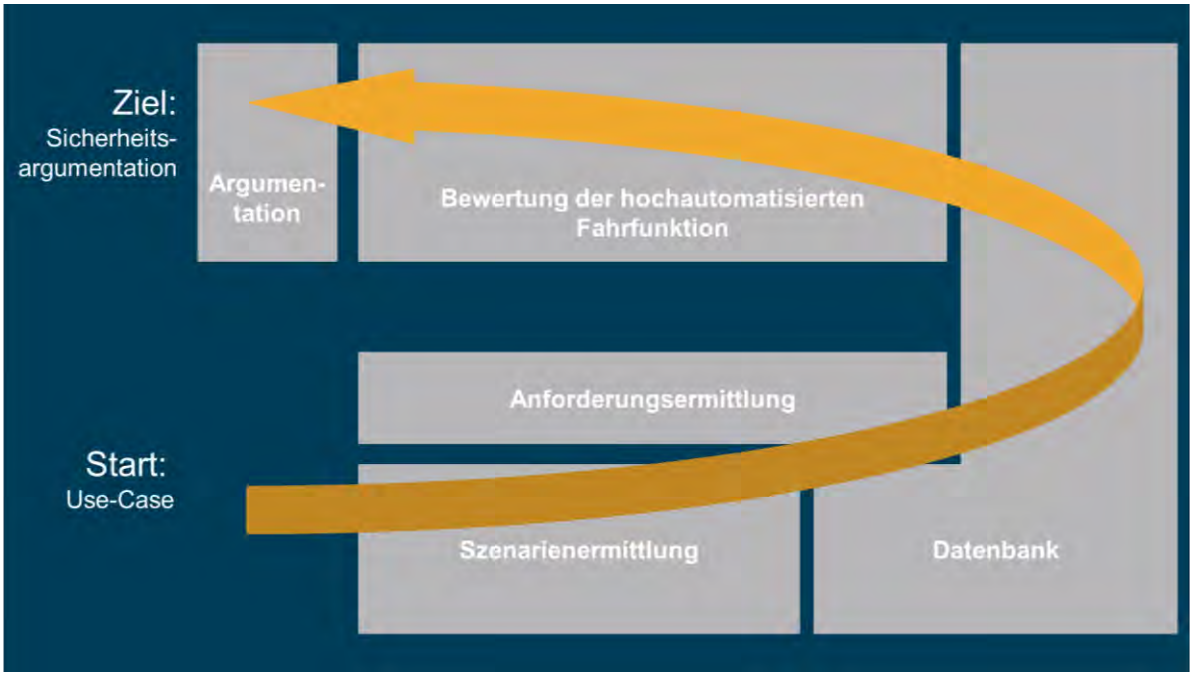


Abbildung 3 Grundelemente der PEGASUS-Gesamtmethode

Das dritte Element ist die Datenbank. Innerhalb dieses Elements werden die vorbereiteten Datensätze in einem gemeinsamen Format aus dem ersten Element verwendet, um die eingespielten Informationen zu vordefinierten logischen Szenarien zuzuweisen. Darüber hinaus werden die vorbereiteten Datensätze verwendet, um Parameterräume für verschiedene Szenarioparameter zu definieren. Mit diesen Informationen erstellt die Datenbank einen Bereich logischer Testfälle mit integrierten Bestanden- und Nichtbestanden-Kriterien aus dem zweiten Element für die verschiedenen logischen Szenarien.

Im vierten Element wird die Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion durchgeführt. Die logischen Szenarien aus der Datenbank werden in der Simulation ausgeführt und später zu Beweisgründen auf dem Prüfgelände validiert. Systematische Feldtests werden ebenfalls zusätzliche Ergebnisse liefern. Zur Bewertung der Ergebnisse der Testdurchführungen werden diese mit den Bestanden- und Nichtbestanden-Kriterien verglichen und für eine Risiko-

bewertung verwendet. Aufbauend auf den vorher durchlaufenden Schritten erfolgt die Abschließende Sicherheitsbewertung.

Innerhalb des letzten Elements werden die generierten Beweise mit der vordefinierten Sicherheitsargumentation verglichen. Der Vergleich wird dabei in einem ausgelagerten Prozess durchgeführt.

Die zuvor genannten fünf Grundelemente bestehen aus verschiedenen Arten von Inhalten (Daten), die in Abbildung 4 als Datencontainer (Tonne) dargestellt sind, und Prozessschritten (Prozeduren), die in Abbildung 4 als Raute dargestellt sind. Die Datencontainer enthalten verschiedene Arten von Informationen, die durch die verschiedenen Prozessschritte erstellt werden. Sie enthalten jeweils die Ergebnisse des vorherigen Prozessschritts und sind daher die Hauptgrundlage für den darauf folgenden Schritt. Diese Behälter umfassen z.B. Messdaten, Szenarien, Testdaten, usw. Innerhalb der Prozessschritte werden verschiedene Methoden verwendet, um neue Ausgabeinformationen basierend auf der Eingabe zu erstellen, z.B. eine Rekonstruktion von Unfallinformationen.

Betrachtet man nun die vertiefte Darstellung der 20 Schritte in Abbildung 4, so beschreibt die rechte Seite der PEGASUS-Methode den Prozess zur Erstellung der Evidenz für die Verifikation und Validierung mit den Schritten und Schnittstellen zwischen (1) - (19). Auf der linken Seite befindet sich die Sicherheitsargumentation (20). Diese Argumentation (linke Seite) wird mit dem Ergebnis des Evidenzprozesses (rechte Seite) am Ende der PEGASUS-Methode verglichen, um einen Beitrag für die Sicherheitsargumentation in Bezug auf die Fahrfunktion zu erstellen. Dieses Ergebnis kann schlussendlich für die allgemeine Freigabe-Empfehlung verwendet werden.

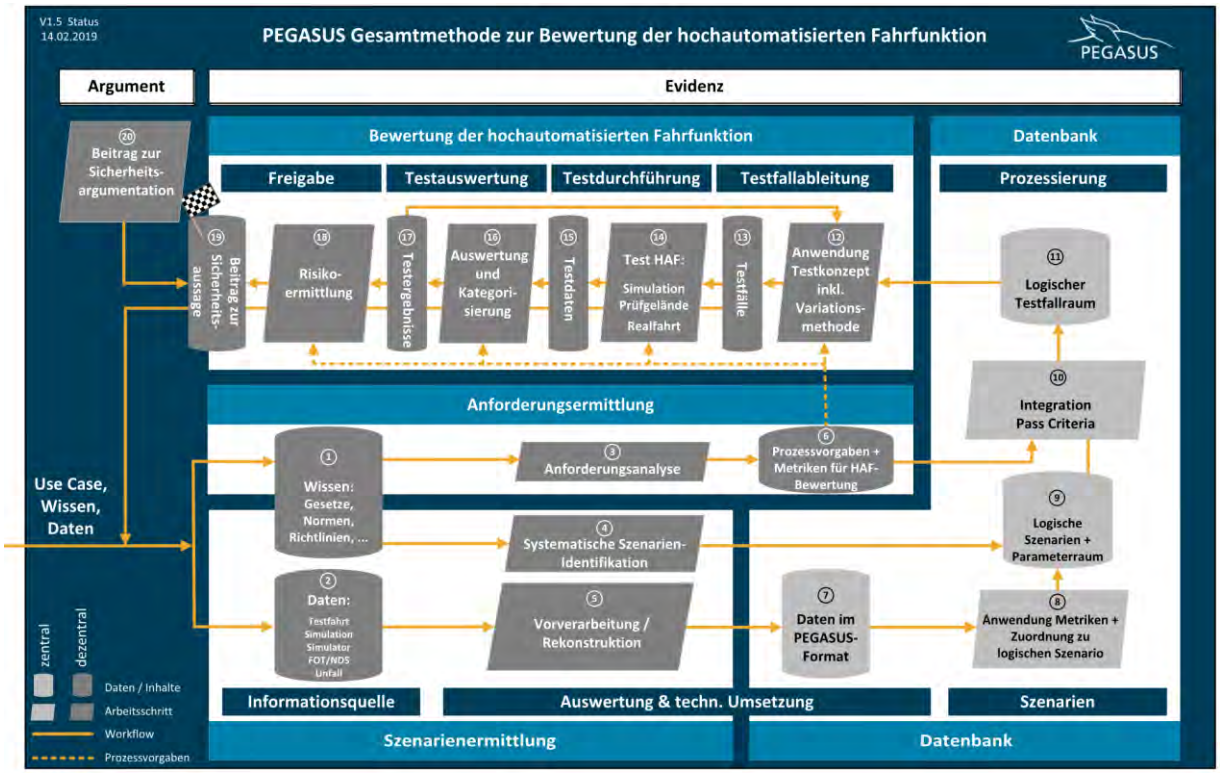


Abbildung 4 PEGASUS-Gesamtmethode

Bei jeder Verwendung der PEGASUS-Methode werden die Prozessschritte einzeln verwendet. Im Folgenden werden alle Schritte des Verfahrens kurz beschrieben.

1. Szenarienermittlung (1,2,4,5)

Die PEGASUS-Methode beginnt mit dem Prozessschritt der Datenverarbeitung für einen bestimmten Anwendungsfall. Dazu werden vorhandene Daten sowie abstrakte Kenntnisse, die für den Anwendungsfall vorliegen genutzt. Der Prozessschritt der Szenarienermittlung wird auf zwei Arten ausgeführt. Auf der einen Seite wird abstraktes *Wissen* (1) zur systematischen *Identifikation von Szenarien* (4) verwendet, um *logische Szenarien* (9) zu definieren. Auf der anderen Seite werden *Messdaten* (2) durch den Prozessschritt Vorverarbeitung / Rekonstruktion (5) so vorbereitet, dass *Daten in einem einheitlichen PEGASUS-Format* (7) für die Datenbank bereitstehen.

In den meisten Fällen wird das Wissen in einer abstrakten Form wie Text dargestellt, das so nicht direkt in einem technischen Prozess verwendet werden kann. Daher sind Überprüfungen oder technische Vorbereitungen des abstrakten Wissens erforderlich, um diese Informationen in technischen Prozessen anwenden zu können. Innerhalb des PEGASUS-Projekts wurden Gesetze, Standards und Richtlinien analysiert, um im Datenverarbeitungsschritt Szenarien für das Testobjekt zu definieren. So wurden Standards und Richtlinien verwendet, um z.B. Minimal- und Maximalwerte für verschiedene Szenarioparameter zu definieren. Darüber hinaus wurden diese Informationsquellen verwendet, um ein gemeinsames Verständnis der ODD zu schaffen. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn das Testobjekt in verschiedenen Ländern freigegeben werden soll. Das abstrakte Wissen ist daher eine wertvolle Quelle für die Beschreibung und Definition von Szenarien mit einem wissensbasierten systematischen Ansatz. Dies erfolgt im folgenden Prozessschritt zur Systematischen *Identifikation von Szenarien* (4).

Der Prozessschritt zur systematischen *Identifikation von Szenarien* (4) verwendet das abstrakte *Wissen* (1) aus dem zuvor erwähnten Datencontainer als Eingabequelle, um systematisch Szenarien für die Datenbank zu generieren. Innerhalb des Projekts werden für diese Prozessschritte verschiedene Methoden angewendet. Ein Beispiel ist die die ontologiebasierte Szenariogenerierung, bei der das Wissen über Richtlinien verwendet wird, um alle möglichen Szenarien kombinatorisch zu bestimmen. Ein weiteres Beispiel ist die Identifizierung von Automatisierungsrisiken. Dadurch können neue Szenarien gefunden werden, die eine potentielle Herausforderung für automatisierte Fahrfunktionen sind. Beide genannten Methoden generieren direkt logische Szenarien. Eine andere in PEGASUS erarbeitete Methode zur Identifizierung logischer Szenarien, ist ein auf Experten basierender Ansatz, der Szenarien um das Testobjekt herum identifiziert, die Unfälle verursachen könnten. Mit der systematischen wissensbasierten Identifizierung von Szenarien hat die PEGASUS-Methode die Möglichkeit, eine Vielzahl möglicher zusätzlicher Szenarien zu identifizieren, die real aktuell noch nicht existieren und erst im Zuge der Einführung von automatisierten Fahrzeugen auftreten können. Ergeben sich Änderungen im Bereich „Wissen“, z.B. ausgehend von neuen oder aktualisierten Gesetzen, so muss ein aktualisierter Satz möglicher Szenarien erstellt werden. Um dies effizient umzusetzen, muss die Szenariengenerierung für den Serieneinsatz automatisiert erfolgen. Der Bereich Wissen und Anforderungen stellt eine notwendige und wertvolle Erweiterung des datengesteuerten Bereichs der PEGASUS-Methode da, der im Folgenden erläutert wird.

Eine weitere Informationsquelle sind neben dem abstrakten Wissen vorhandene Messdaten, die für einen datengesteuerten Ansatz innerhalb der PEGASUS-Methode verwendet werden. Im Projekt basieren die Daten auf realen Testfahrten, Simulationen, Simulatorstudien, Feldbetriebstests (FOT), naturalistischen Fahrstudien (NDS) und Unfalldaten. Diese Quellen enthalten verschiedene Arten von Informationen und werden in der PEGASUS-Methode auf unterschiedliche Weise verwendet. Beispielsweise werden Unfalldaten verwendet, um einen Wert für die Leistungsfähigkeit für die automatisierte Fahrfunktion in Bezug auf menschliche Fahrer innerhalb der ODD zu generieren. Mit naturalistischen Fahrstudien (NDS) ist ein Vergleich zwischen der automatisierten Fahrfunktion und menschlichen Fahrern in verschiedenen Szenarien möglich. Testfahrten, FOT- oder Zufallssimulationen sind zuvor ausgeführte Szenarien mit aufgezeichneten Daten. Die Verwendung dieser Informationsquellen beschreibt daher einen datengesteuerten Ansatz zur Definition von Szenarien für die Verifizierung und Validierung. Die Herausforderung bei den verschiedenen Arten von Daten ist insbe-

sondere der Umgang mit den verschiedenen Datenformaten und den unterschiedlichen Inhalten. Es ist daher erforderlich, die Daten innerhalb eines folgenden Prozessschritts in ein gemeinsames einheitliches Format zu konvertieren, um die Daten in der Datenbank zu verwenden. Bei der PEGASUS-Methode erfolgt dies im folgenden Prozessschritt *Vorverarbeitung / Rekonstruktion* (5).

Der Prozessschritt *Vorverarbeitung / Rekonstruktion* (5) wird verwendet, um zuvor aufgezeichnete Daten in ein einheitliches Format für die Datenbank umzuwandeln. Hierzu musste ein einheitliches Format definiert werden, das es ermöglicht alle für alle Eingangsdaten alle relevanten Daten für die Datenbank zu transformieren, bzw. zu rekonstruieren, sofern diese nicht direkt vorliegen. Das Format wird später im Unterabschnitt zur Datenbank erläutert. Nach dem Definieren des Eingabeformats für die Datenbank werden die Daten aus den verschiedenen Quellen, z.B. aufgezeichnete Daten von verschiedenen OEMs in das gemeinsame Eingabeformat konvertiert. Dies kann auch eine modellbasierte Rekonstruktion umfassen, wenn eine direkte Konvertierung nicht möglich ist. Nach diesem Schritt können die Daten aus jeder verfügbaren Datenquelle mit aufgezeichneten Daten konvertiert und in der Datenbank verarbeitet werden.

Zusammenfassend hat die Prozessschritt Szenarienermittlung bei der PEGASUS-Methode zwei Hauptziele. Das erste Ziel ist die systematische Generierung logischer Szenarien, die direkt in die Datenbank integriert werden. Das zweite Ziel ist die Vorverarbeitung und Rekonstruktion aufgezeichneter Daten oder zuvor ausgeführter Szenarien unter Nutzung eines einheitlichen Datenformats zur Einspielung dieser Daten in die Datenbank.

2. Anforderungsermittlung (1,3,6)

Das Element Anforderungsdefinition innerhalb der PEGASUS-Methode ist in drei Schritte unterteilt: einen Datencontainer, der *Wissen* enthält (1), einen Prozessschritt zur *Anforderungsanalyse* (3) und einen Datencontainer mit *Prozessvorgaben + Metriken für die HAF-Bewertung* (6).

Der Datencontainer mit dem abstrakten *Wissen* (1) ist derselbe Container wie im vorherigen Abschnitt erläutert. Zusätzlich zu den bereits erwähnten Informationsquellen, wie Gesetze und Vorschriften der Länder, wo die Fahrfunktion freigegeben werden soll, sind relevante Standards und Normen (z.B. ISO 26262 (ISO), SOTIF (ISO)) oder Ergebnisse bspw. einer Ethikkommission als Informationsquelle zu beachten, um Anforderungen für das Testobjekt zu definieren. Ähnlich wie im zuvor erläuterten Schritt der Datenverarbeitung kann das abstrakte Wissen nicht direkt in einem technischen Prozess verwendet werden. Die Vorbereitung des abstrakten Wissens auf ein technisch verwendbares Format erfolgt in dem nächsten Prozessschritt *Anforderungsanalyse* (3).

Die *Anforderungsanalyse* (3) verwendet das abstrakte Wissen, um technisch verwendbare Anforderungen für die automatisierte Fahrfunktion oder das allgemeine Testobjekt zu definieren. Daher werden bei der PEGASUS-Methode derzeit zwei Methoden angewendet. Zum einen wurde ein Ansatz erarbeitet, der auf sozialen Akzeptanzkriterien basiert. Hierbei wird die gesellschaftliche Akzeptanz aus anderen Bereichen wie Eisenbahn- oder Kernkraftwerken untersucht und eine möglicher Vergleich mit diesen Bereichen bewerten. Ziel ist es ähnliche Anforderungen an die automatisierte Fahrfunktion aus etablierten Technologien zu ermitteln oder zu definieren. Auf der anderen Seite wird eine Bewertung mit einem risikobasierten Ansatz durchgeführt. Hierzu werden unterschiedliche Ansätze zur Berechnung des Risikos angewendet. Ein Beispiel ist ein Ansatz, der die Fahranforderungen jeder Szene schätzt, um diese Szenen zu bewerten. Das Ergebnis dieses Prozessschritts ist die Definition unterschiedlicher Anforderungen und Nachweisrichtlinien, die in den folgenden technischen Prozessschritten verwendet werden können.

Die Ergebnisse in Form von bewerteten Anforderungen für das Testobjekt werden im folgenden Datencontainer *Prozessvorgaben + Metriken für die HAF-Bewertung* (6) gespeichert. Dieser Container enthält die auf dem analysierten abstrakten Wissen basierenden Metriken für die Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion sowie die Prozessrichtlinien für die

folgenden Prozessschritte. Einerseits werden die Ergebnisse im nächsten Schritt innerhalb der Datenbank verwendet, um Pass- und Fail-Kriterien in die verschiedenen Szenarien zu integrieren. Andererseits werden die Ergebnisse als Richtlinien für die Durchführung weiterer Prozessschritte verwendet, beispielsweise für die Bewertung der Fahrfunktion.

Zusammenfassend hat die Anforderungsermittlung der PEGASUS-Methode das übergeordnete Ziel, die Anforderungen an die hochautomatisierte Fahrfunktion auf der Grundlage von abstraktem Wissen aus verschiedenen Quellen zu definieren und Prozessrichtlinien und Metriken für die Bewertung bereitzustellen.

3. Datenbank (7,8,9,10,11)

Das Element Datenbank besteht aus drei Datencontainern und zwei Verarbeitungsschritten zwischen diesen Datencontainern. Eingangsdaten für die Datenbank sind die Ergebnisse der zuvor ausgeführten Anforderungsermittlung und Szenarienermittlung. Ein Ziel der Datenbank ist es, alle gesammelten Messdaten aus verschiedenen Informationsquellen zu verarbeiten. Ein weiteres Ziel besteht darin, auf Grundlage der logischen Szenarien einen Testfallraum für die Testausführung zu schaffen. Dies ist der wesentliche Output für das nachfolgende Element zur Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion.

Die Datenbank verwendet als Input die vorverarbeiteten und rekonstruierten Messdaten, die im zuvor ausgeführten Prozessschritt (5), bei dem die vorliegenden Daten in das PEGASUS-Datenformat konvertiert wurden. Das Format enthält Informationen, die unter anderem den Zustand des Ego-Fahrzeugs, umgebende Objekte und Fahrspurinformationen wie Krümmung, Fahrspurbreite, usw. beinhalten. Um Metriken und Statistiken auf diese Messdaten in der Datenbank anzuwenden, müssen für das PEGASUS-Datenformat eine Reihe von Signalen und Koordinatensystemen definiert werden, um die verarbeiteten Messdaten einheitlich zu verarbeiten. Für eine weitere Verwendung der Daten in der Datenbank ist es entsprechend erforderlich, dass alle Signale Mindestanforderung, beispielsweise eine synchronisierte Abtastrate, erfüllen.

In der Datenbank werden verschiedene Metriken angewendet, um die Messdaten im PEGASUS-Format vordefinierten logischen Szenarien zuzuordnen, z.B. dem sogenannten „Challenger“. Hierzu teilen die Mapping-Metriken die Messdaten in verschiedene Zeitausschnitte und sortieren sie in die logischen Szenarien. Die Zeitausschnitte werden auch verwendet, um minimale und maximale Parameterwerte zu extrahieren und Parameterbereiche innerhalb der logischen Szenarien basierend auf realen Messdaten zu beschreiben. Zusätzlich werden Parameter zur Beschreibung stochastischer Verteilungen von Szenarioparametern extrahiert. Damit ist es möglich, das vordefinierte Szenarien und das Szenario aus der systematischen Identifikation mit der tatsächlich vorhandenen Parameterverteilung und den Bereichen basierend auf den verschiedenen *Daten*quellen (2) für die folgenden Prozessschritte in der PEGASUS-Methode zu parametrisieren. Darüber hinaus werden Metriken zur Berechnung der Kritikalität für einzelne Szenen angewendet und in den jeweiligen logischen Szenarien gespeichert. Zusätzlich wird hier die oben erwähnte Metrik zur Berechnung der Anforderungen für die Szene angewendet, um die Informationen zu den logischen Szenarien hinzuzufügen.

Die Ergebnisse des zuvor ausgeführten Prozessschritts (8) werden als *logische Szenarien* (9) im Datencontainer gespeichert. Quellen für die logischen Szenarien sind zum einen die Ergebnisse der systematischen Identifizierung von Szenarien und zum anderen vordefinierte Szenarien auf der Grundlage von Expertenwissen. Ein logisches Szenario stellt ein Modell zur Beschreibung der Umgebung des Testobjekts mit Parameterbereichen und einer Verteilung für die beschreibenden Parameter dar. Diese logischen Szenarien werden anhand des 6-Ebenen-Modells beschrieben (Straße, Infrastruktur, temporäre Einflüsse, bewegliche Objekte, Umgebungsbedingungen, digitale Informationen). Außerdem werden die Möglichkeiten zur Beschreibung des Verhaltens der beweglichen Objekte, der Interaktion zwischen anderen Objekten und der technischen Konvertierung in die Formate OpenDRIVE und OpenSCENARIO beschrieben. Die Konvertierung des Szenarios in diese Formate ist erforderlich, um die

Szenarien, z.B. in der Simulation und in weiteren Prozessschritten, einheitlich ausführen zu können.

Im nächsten Schritt innerhalb der Datenbank wird ein Bereich logischer Testfälle generiert, Bestehenskriterien und zusätzliche Vorbereitungen zur Ausspielung der vorhandenen Daten im Rahmen einer Testfallableitung enthalten. Ein logischer Testfall enthält daher das logische Szenario plus Bewertungskriterien. Die Bewertungskriterien werden zu den logischen Szenarien bei der Prozessschrittintegration der *Bestehenskriterien* hinzugefügt (10). Diese Kriterien werden durch Metriken wie TTC (Time To Collision), THW (Time HeadWay), usw. sowie Schwellwerte für die jeweiligen Metriken dargestellt. Die Informationen für diesen Prozessschritt sind die Ergebnisse der Anforderungsdefinition, in der verschiedene *Metriken für die HAF-Bewertung* (6) definiert wurden. Zusätzlich werden die Schwellwerte für die verschiedenen Metriken innerhalb der Testfälle festgelegt, die auf den Ergebnissen der Anforderungsermittlung basieren.

Die Ergebnisse der Prozessschritte *Integration Bestehenskriterien* (10) werden im Datencontainer der logischen Testfälle (11) gespeichert. Dieser Container enthält die Testfälle, die für die hochautomatisierte Fahrfunktion oder das allgemeine Testobjekt relevant sind, basierend auf allen verfügbaren Informationsquellen (1,2). Die Testfälle werden in den technischen Formaten OpenDRIVE (ASAM - OpenDRIVE), OpenSCENARIO (ASAM - OpenSCENARIO) und einem Format zur Parametrisierung des logischen Szenarios gespeichert. Die Metriken zur Auswertung der logischen Szenarien werden in den folgenden Prozessschritten in externen Skripten für die Anwendung gespeichert. Mit diesen Informationen ist es möglich, das folgende Grundelement zur Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion auszuführen.

Zusammenfassend ist die Datenbank ein Schlüsselelement in der PEGASUS-Methode, da sie den Vorbereitungselemente, die Anforderungsermittlung und die Datenverarbeitung der PEGASUS-Methode mit dem Ausführungsteil, der Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion, verbindet. Ein Hauptziel der Datenbank ist die Zuordnung von Messdaten zu logischen Szenarien. Infolgedessen werden diese logischen Szenarien in der Datenbank verwaltet und mit Hilfe von Filter- und Sortierfunktionen charakterisiert. Eine weitere Aufgabe der Datenbank ist die Generierung logischer Testfälle basierend auf logischen Szenarien und Metriken als Input für das eigentliche Testen.

4. Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion (12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19)

Das Element zur Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion besteht aus vier Datencontainern und vier verbindenden Prozessschritten zwischen diesen Datencontainern. Input für die Bewertung sind die Ergebnisse der zuvor ausgeführten Elemente Anforderungsermittlung und der Datenbank. Die Hauptziele dieses Elements sind die Testfallableitung (basierend auf dem logischen Testfallraum), die Testausführung, die Testbewertung und schließlich die Freigabe auf Basis der generierten Evidenz. Der Prozessschritt wird durch die Ergebnisse der Anforderungsermittlung anhand von Prozessrichtlinien unterstützt. Das Gesamtergebnis ist ein Beitrag zur Sicherheitsaussage zum Vergleich zwischen den geführten Nachweisen und der Sicherheitsargumentation.

Der erste Prozessschritt der Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion ist die Anwendung des *Testkonzepts mit verschiedenen Variationsmethoden* (12). Der Input für diesen Prozessschritt sind zum einen *logische Testfälle* (11) und zum anderen die Prozessanweisungen aus den Datencontainer *Prozessvorgaben* (6). Innerhalb des Prozessschritts werden verschiedene Variationsmethoden angewendet, um die logischen Testfälle in konkrete ausführbare Testfälle zu konvertieren. Dies bedeutet, dass die Variationsmethoden beispielsweise stochastische Algorithmen verwenden, um konkrete Werte aus der Parameterverteilung / den Wertebereichen auszuwählen, um konkrete Testfälle mit konkreten Werten für jeden Szenarioparameter zu erstellen. Dies ermöglicht die Ausführung der einzelnen Testfälle mit verschiedenen Testwerkzeugen, z. B. Simulation, Prüfgelände oder Tests in der realen Welt. Darüber hinaus verteilt das Testkonzept die einzelnen Testfälle auf die verschiedenen oben genannten Testumgebungen.

Das Ergebnis des vorherigen Prozessschritts sind die erstellten konkreten Testfälle. Bei der PEGASUS-Methode werden diese konkreten *Testfälle* im Datencontainer (13) durch die technischen Formate OpenDRIVE, OpenSCENARIO und Skripte für die Metriken zur Auswertung der Testdaten dargestellt. Die Parameterbereiche und Verteilungen werden für jeden einzelnen Testfall durch konkrete Werte ersetzt. Die Testfälle werden im nächsten Prozessschritt zur *Testausführung* (14) ausgeführt.

Im nächsten Prozessschritt werden die konkreten Testfälle in der Simulation und auf Prüfgeländen (14) ausgeführt und durch Erprobungen während der Realfahrt ergänzt. Zu diesem Zweck werden Anforderungen an die Testdurchführung, entsprechend den notwendigen Randbedingungen identifiziert. Ausgehend von diesen Anforderungen werden verschiedene Simulationsumgebungen in PEGASUS erarbeitet sowie verschiedene Arten von Simulationsmodellen, wie Sensor- oder Verkehrsmodelle entwickelt und in die Testausführung integriert, um möglichst realistische Testergebnisse aus der Simulation zu erhalten. Für einen einfachen Austausch von Simulationswerkzeugen und -modellen wurden neue Schnittstellen wie die Open Simulation Interface (ASAM - OSI) verwendet. In ähnlicher Weise wurden neue Werkzeuge für den Test auf Prüfgeländen entwickelt, um eine deterministischere Testausführung zu erhalten. Beispiele sind die direkte Verbindung von der Simulation zur Prüfgeländeinfrastruktur, um beide Ergebnisse oder eine neue Generation von Verkehrssimulationsfahrzeugen zu vergleichen. Auf dem Prüfgelände handelt es sich dabei um reale Fahrzeuge, die automatisch, basierend auf vordefinierten Trajektorien, fahren und sich an die jeweilige Situation anpassen können. Somit ist es möglich, verschiedene Szenarien deterministisch zu testen. Eine andere Art der Testausführung sind reale Tests, bei denen das Testobjekt im realen Verkehr getestet wird. In diesem Fall ist die Ausführung des konkreten Szenarios nicht direkt möglich. Daher liefert die PEGASUS-Methode Hinweise für die Testbedingungen, um den Test nahezu im konkreten Szenario auszuführen.

Die Ergebnisse der *Testfallausführung* (14) werden in den Datencontainer *Testdaten* (15) gespeichert. Die Testdaten beschreiben die Informationen zur Testdurchführung in Form von Signalspuren. Diese Signale haben das gleiche Format wie die *Daten im PEGASUS-Format* (7). Daher ist es möglich, die Testdaten in späteren Durchläufen als zusätzliche Eingabe für die PEGASUS-Methode zu verwenden.

Im nächsten Prozessschritt (15) werden die Testdaten mit verschiedenen Metriken wie TTC oder Entfernungsprüfung ausgewertet und in verschiedene Gruppen wie Kollision eingeteilt. Basierend auf den Testergebnissen erfolgt eine iterative Bewertung mit zwei Zielen. Einerseits werden die Testergebnisse an die stochastische Variation (13) zurückgegeben, um anhand der letzten Testergebnisse kritischere Szenarien im Parameterraum des logischen Szenarios zu finden. Auf der anderen Seite werden die Testergebnisse verwendet, um konkrete Szenarien zu identifizieren, die für eine Gegenüberstellung bei anderen Testinstanzen verwendet werden, z. B. Prüfgelände. Wenn die Ergebnisse bestimmte Kriterien erfüllen, wird der iterative Bewertungsprozess abgeschlossen und die ausgewerteten Testergebnisse werden im folgenden Datencontainer für die *Testergebnisse* (17) gespeichert.

Der Datencontainer *Testergebnisse* (17) enthält die ausgewerteten Ergebnisse der verschiedenen Testläufe. Die Testergebnisse werden dabei als Traces der aufgezeichneten Signale des Prozesses der Testdurchführung (15) beschrieben. Zusätzlich werden die Ergebnisse der Auswertung auf Basis von vordefinierten Metriken (16) zu den Traces hinzugefügt. Darüber hinaus ist es möglich, Zeitstempel mit Maximal- und / oder Minimalwerten der verschiedenen Metriken zu kennzeichnen. Die Testergebnisse werden im folgenden Prozessschritt für eine Risikoermittlung verwendet.

Im Prozessschritt der *Risikoermittlung* (18) erfolgt eine zusätzliche Bewertung der einzelnen durchgeführten Testfälle. Der Unterschied zwischen der zuvor ausgeführten Testbewertung im Prozessschritt (16) und diesem Prozessschritt ist, dass die Bewertung der Testergebnisse in Summe im Mittelpunkt steht. Im Gegensatz zur letzten Bewertung besteht der Zweck der Bewertung darin, die Übereinstimmung des Testobjekts mit vordefinierten Verhaltenskriterien zu bestätigen. Daher werden die einzelnen Testfälle wie im Prozessschritt (16) mit anderen Metriken bewertet. In dem spezifischen PEGASUS-Kontext bestehen die vordefinierten Krite-

rien beispielsweise darin Sicherheitsabstände einzuhalten, keine Kollisionen zu verursachen und sofern möglich Kollisionen zu mildern. Während der *Risikoermittlung* wird für jedes dieser Kriterien eine Bewertung vorgenommen, ob die hochautomatisierte Fahrfunktion diese eingehalten hat oder nicht. Basierend auf dem Ergebnis für jedes Kriterium wird eine in PEGASUS erarbeitete Methode genutzt, um zu entscheiden, ob ein einzelner Testfall in Bezug auf die vordefinierten Verhaltenskriterien bestanden oder nicht bestanden wurde. Bei der PEGASUS-Methode werden die Ergebnisse der Risikobewertung im Datencontainer 19 gespeichert.

5. Argumentation (20)

Der letzte Schritt in der PEGASUS-Methode ist die Anwendung der Sicherheitsargumentation zusammen im Zusammenspiel mit der generierten Sicherheitsaussage für die Fahrfunktion. Die PEGASUS-Sicherheitsargumentation ist dabei als konzeptioneller Rahmen zu verstehen, der die Sicherung und Genehmigung höherer Automatisierungsgrade durch Struktur, Formalisierung, Kohärenz, Integrität und Relevanz unterstützt. Es ist durch die Einführung von fünf Ebenen strukturiert. Etablierte Formalisierungen wie die Zielstrukturnotation werden dabei nach Möglichkeit verwendet, um die Elemente der einzelnen Ebenen zu beschreiben. Diese Elemente werden über die Ebenen hinweg verknüpft, um eine kohärente Argumentation zu bilden. Die Bewertung der Integrität der einzelnen Elemente zur Festlegung einer zuverlässigen Sicherheitsargumentation wird ebenfalls in diesem Schritt vorgeschlagen. Die zentrale Annahme der PEGASUS-Sicherheitsargumentation lautet: Wenn eine Argumentationskette, die unter Berücksichtigung des vorgeschlagenen Rahmens der PEGASUS-Sicherheitsargumentation erstellt wurde, einer kritischen Prüfung standhält, wird diese die Freigabe und Zulassung eines höheren Automatisierungsgrades unterstützen.

Zusammenfassung

Zusammenfassend beschreibt die PEGASUS-Methode ein systematisches Konzept für einen szenarienbasierten Verifizierungs- und Validierungsansatz für hochautomatisierte Fahrfunktionen. Mit den zentralen Elementen der Methode zur Anforderungsermittlung, der vorbereitenden Datenverarbeitung zur Szenarienermittlung, der Speicherung und Verarbeitung von Informationen in einer Datenbank, der Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion und schließlich der Sicherheitsargumentation, erarbeitete PEGASUS einen methodischen, systematischen szenariobasierten Ansatz zur Verifikation und Validierung der sich stark von einem entfernungsbasierten Ansatz mit zufälligem Testcharakter abgrenzt.

2.3.2 Die Gesamtmethode

Ausgehend von dem Überblick über die PEGASUS-Methode in Kapitel 2.3.1 erfolgt in diesem Abschnitt eine Detailbeschreibung der einzelnen 20 Schritte. Die Beschreibungen der einzelnen Schritte orientieren sich dabei an dem Anwendungsszenario Autobahn-Chauffeur und beginnen mit einer kurzen Einführung für diesen Anwendungsfall.

Beschreibung des Testobjekts (Beispielanwendung)

Der Autobahn-Chauffeur

Seitens der Projektpartner wurde der Autobahn-Chauffeur als beispielhaftes Testobjekt ausgewählt. Das System wurde als hochautomatisiertes System der SAE-Automatisierungsstufe Level 3 konzipiert. Dabei wurde ein Systemdesign gewählt, welches einerseits einfach genug ist, damit alle Partner ein solches entweder bereits implementiert haben oder dies tun könnten und andererseits komplex genug ist, um es dem Konsortium zu ermöglichen, ein breites Spektrum an Szenarien, einschließlich kritischer Szenarien und Automationsrisiken, aus ihm abzuleiten Die folgende Abbildung 5 zeigt die Fähigkeiten (dunkelblau) und Beschränkungen (hellblau) des Systems.

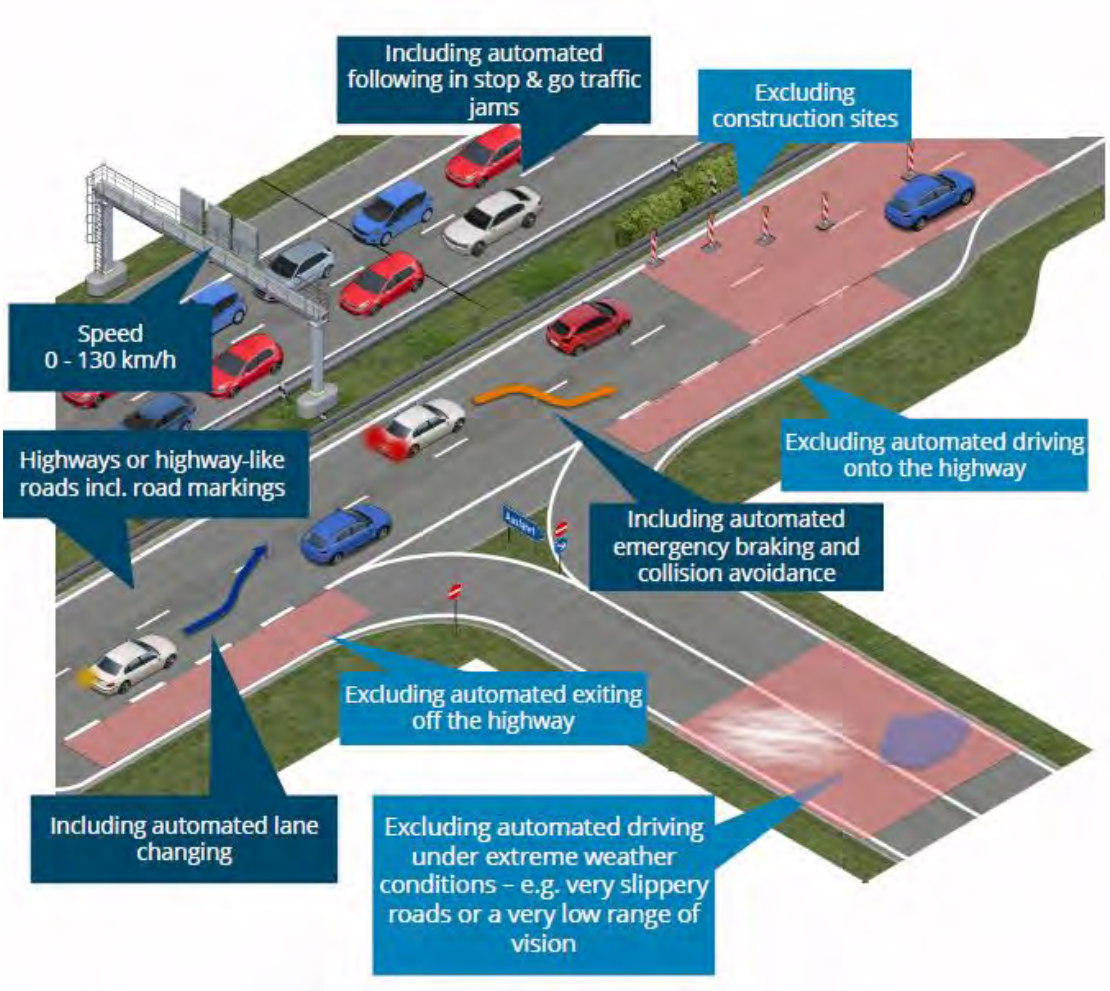


Abbildung 5 Fähigkeiten des Autobahn-Chauffeurs

Die folgende
Tabelle 2 fasst die Fähigkeiten der automatisierten Fahrfunktion im Bereich Spurführung und Stabilisierung zusammen.

Tabelle 2 Fähigkeiten des Autobahn-Chauffeurs

Fähigkeiten	
Spurführung • Geschwindigkeits- und Abstandsanpassung • Spurwechsel • Überholen • Stockender Verkehr (Staus) • Notbremsung	Stabilisierungsebene • Geschwindigkeit halten • Abstand halten • Spur halten

Die Beschränkungen des Systems sind hauptsächlich durch sein beispielhaftes und einfaches Design begründet und haben zu den folgenden Restriktionen für die ODD geführt (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3 Beschränkungen des Autobahn-Chauffeurs

Beschränkungen	
ODD auf normale Autobahnszenarien beschränkt, was die Bereiche der Geschwindigkeits- und Abstandsanpassung ausschließt: • Autobahnkreuze • Auffahrten • Baustellen • Mautstationen	Aktivierung nur bei Nichterfüllung folgender Bedingungen • unsicherer Fahrzeugzustand • schlechte Straßenverhältnisse • schlechtes Wetter • Falschfahren • offene Türen • kein menschlicher Fahrer anwesend • Verschlechterung der Sensorleistung • keine Verkehrs-, Karten- oder GNSS-Daten verfügbar

Erweitertes Anwendungsszenario

Eines der Ziele des PEGASUS-Projekts war auch sicherzustellen, dass die Werkzeuge und Methoden für unterschiedliche Anwendungsbereiche angepasst werden können. Um keine Zeit und Mühen auf die Definition eines vollständig neuen Systems verwenden zu müssen, wurden die Schlüsselfähigkeiten des Autobahn-Chauffeurs analysiert und 5 beispielhafte, funktionale Szenarien definiert, welche sich auf unterschiedlichen Ebenen vom Ursprungssystem unterscheiden. Das neue System in Szenarien zu beschreiben, hilft nicht nur die gewünschte Funktionalität und Leistung effizient zu beschreiben, sondern erlaubte auch die systematische Generierung ausführbarer und daher überprüfbarer konkreter Szenarien, die dann ohne zusätzlichen Aufwand in Simulationen genutzt werden konnten.

Letztlich wurden funktionale Szenarien ausgewählt, welche die ODD auf Autobahnen und Landstraßen ausdehnen würden und es wurden fünf spezifische Situationen gewählt, in die die Fahrfunktion geraten könnte.

Tabelle 4 enthält eine Beschreibung dieser Szenarien.

Tabelle 4 Funktionale Szenarien für erweiterte Anwendungsszenarien

		Name des funktionalen Szenarios				
		Landstraße mit Gegenverkehr	Wildwechsel	Kreuzung – geradeaus fahrend (un- / geschützt)	Kreuzung – links abbiegen (un- / geschützt)	Überholen mit Gegenverkehr
Beschreibung der Szenario-Ebene	E1: Straßengeometrie	1 Spur pro Richtung, gestrichelte Linie (EKL2)	1 Spur pro Richtung, gestrichelte Linie (EKL2)	1 Spur pro Richtung, gestrichelte Linie (EKL2)	1 Spur pro Richtung, gestrichelte Linie (EKL2)	1 Spur pro Richtung, gestrichelte Linie (EKL2)
	E2: Verkehrsleitsystem	Keines (100 km/h, Leitpfosten)	Keines (100km/h, Leitpfosten)	Ampeln, Schilder, Haltelinie	Ampeln, Schilder, Haltelinie	Keines (100 km/h, Leitpfosten)
	E3: Temporäre Einschränkungen	keine	keine	keine	keine	keine
	E4: Dynamische Objekte	Auto, Lastwagen, Motorrad, Fahrrad	Auto, Lastwagen, Motorrad, Fahrrad, Tiere	Auto, Lastwagen, Motorrad, Fahrrad	Auto, Lastwagen, Motorrad, Fahrrad	Auto, Lastwagen, Motorrad, Fahrrad
	E4: Grundlegende dynamische Fahrmanöver	Spur halten	Spur halten, sicheres Anhalten	Annähern, beschleunigen, überholen	Annähern, beschleunigen, abbiegen, überholen	Spur halten, beschleunigen, Spur wechseln, überholen
	E5: Wetter	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

(1) Wissen

Als Grundlage für die Definition von Anforderungen oder die Ableitung von Testfällen müssen die Anwendungsszenarien für das zu entwickelnde Objekt spezifiziert werden. Zu diesem Zweck können verschiedene Wissensquellen genutzt werden, wie etwa Normen, Vorschriften oder Expertenwissen. Bewährte Normen & Standards wie SAE J3061 (Society of Automotive Engineers, 2014) zur Nomenklatur sowie sicherheitsbezogene Dokumente wie ISO 26262 (International Organization for Standardization, 2009) sind die Grundlage für jede Entwicklung von hochautomatisierten Fahrsystemen. Darüber hinaus müssen die jeweiligen gesetzlichen Anforderungen, wie etwa das landesspezifische Straßenverkehrsgesetz, internationale Verträge sowie verwandte Vorschriften befolgt werden. Zudem gibt es nicht-bindende Dokumente mit spezifischen Empfehlungen, die von Regierungsinstitutionen oder mit dem Thema befassten Ausschüssen veröffentlicht wurden. Ein prominentes Beispiel hierfür ist das von der Ethik-Kommission des Bundesverkehrsministeriums veröffentlichte Dokument (Ethics Commission Automated and Connected Driving appointed by the German Federal Minister of Transport and Digital Infrastructure, 2019). Auch Expertenwissen zu einem spezifischen Anwendungsbeispiel und dessen Anforderungen wurden im Rahmen eines strukturierten Peer-Review-Prozesses gesammelt werden.

Richtlinien

Im Rahmen von PEGASUS wurden die deutschen Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA) (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2008) als Wissensquelle zur Spezifizierung der Operational Design Domain des Autobahn-Chauffeurs genutzt. Die Richtlinien stellen ein Regelwerk für den Autobahnbau dar und definieren Entwurfsmuster.

Im ersten Schritt des Autobahnbaus wird auf der Grundlage von Kriterien wie dem Autobahntyp eine Entwurfsklasse gewählt (zum Beispiel Stadtautobahn oder Fernautobahn). Diese Entwurfsklasse spezifiziert den Regelquerschnitt, die Grenz- und Standardwerte der Entwurfselemente, die Grundform von Knotenpunkten und die Abstände zwischen diesen sowie Geschwindigkeitsbegrenzungen.

Querschnitte

Der Querschnitt wird anhand der Entwurfsklasse und des erwarteten Verkehrsaufkommens gewählt. Der Querschnitt definiert die Anordnung und die Abmessungen von Autobahnkomponenten wie den Spuren, wie in Abbildung 6 Regelquerschnitt (RQ 36) Abbildung 6 gezeigt wird. Jeder Querschnitt kann unterschiedliche viele Spuren und Spurtypen enthalten, wie etwa Fahrstreifen, Randstreifen oder Mittelstreifen.

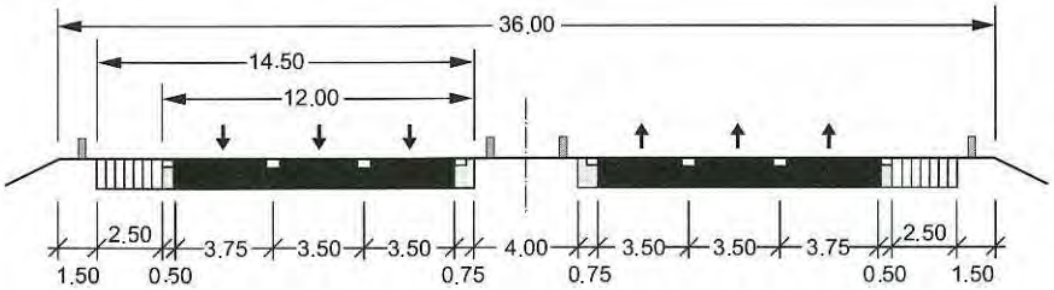


Abbildung 6 Regelquerschnitt (RQ 36) (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2008)

Linienführung

Jede Autobahn besteht aus mehreren Abschnitten. Neben dem Regelquerschnitt gehört zu jedem Abschnitt ein Lageplan und ein Höhenplan, wie in Abbildung 7 zu sehen ist.

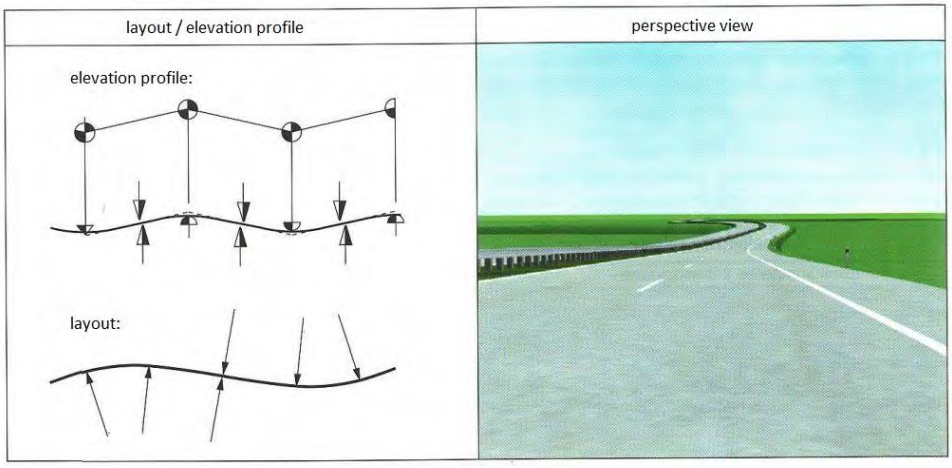


Abbildung 7 Höhenplan und Lageplan eines Straßenabschnitts (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2008)

Der Lageplan beschreibt die laterale Linienführung der Fahrbahn. Zu diesem Zweck definieren die RAA mehrere Entwurfselemente, wie Gerade, Kreisbogen oder Klothoide, und spezifizieren einzuhaltende Parameterbereiche.

Um die vertikale Linienführung der Fahrbahn zu beschreiben, werden in der RAA mehrere Elemente des Höhenplans definiert, wie die Längsneigung und die Kuppen- und Wannenausrundung. Zudem werden Leitlinien zur Berechnung der Parameter dieser Elemente formuliert.

Knotenpunkte

Für die Verbindung mehrerer Straßen durch Knotenpunkte definieren die RAA verschiedene Muster, wie etwa Kleeblatt oder Windmühle. Welches Muster verwendet wird, hängt vom Verkehrsaufkommen, dem baulichen Aufwand, der zur Verfügung stehenden Fläche und dem Höhenplan ab.

Diese in den RAA spezifizierten Entwurfsmuster können genutzt werden, um die ODD des Autobahn-Chauffeurs zu definieren. Zudem bilden diese Muster die Basis für die wissensbasierte Generierung von Szenarien mithilfe einer Ontologie.

Normen & Standards

Als notwendige Grundvoraussetzung müssen allgemein anerkannte Industrienormen sowie nationale und internationale Bestimmungen befolgt werden. Für die Entwicklung von hochautomatisierten Fahrfunktionen sind Standards, wie die ISO 26262 (International Organization for Standardization, 2009) und ISO/PAS 21448 (International Organization for Standardization, 2019) von wesentlicher Bedeutung.

ISO 26262

Die ISO 26262 beschreibt funktionale Sicherheitsprozesse in der Automobilindustrie. Es handelt sich um eine Anpassung des Standards IEC 61508 zur funktionalen Sicherheit mit Fokus auf elektrischen/elektronischen Systemen in Kraftfahrzeugen. Die Norm ISO 26262 hat zum Ziel Prozessschritte bereitzustellen, mit welchen die funktionale Sicherheit eines entwickelten E/E-Systems (elektrisch/elektronisch) sichergestellt werden kann, womit die „Abwesenheit unangemessener Risiken [...] aufgrund von Gefahren [...], die durch fehlerhaftes Verhalten [...] von E/E-Systemen verursacht werden“ gemeint ist (International Organization for Standardization, 2009). Die jüngste Aktualisierung dieser Norm wurde im Dezember 2018 als ISO 26262:2018 veröffentlicht.

Nach Definition der funktionalen Spezifikation des Systems wird eine Gefahrenanalyse und Risikobewertung durchgeführt. Die Gefahren- und Risikoanalyse bestimmt die „Automotive Safety Integrity Levels“ (ASIL), welche auf einer Matrix mit den Eingabegrößen „Schweregrad“ (von S1 „leichte Verletzungen“ bis S3 „lebensbedrohliche Verletzungen), Exposition (E1 „sehr niedrige Wahrscheinlichkeit“ bis E4 „hohe Wahrscheinlichkeit“, d.h. 10 %) und Beherrschbarkeit (C1 „einfach“, d.h. > 99 %, bis C4 „schwierig“, d.h. < 90 %) basieren. Ein ASIL-Level stellt daher eine risikobasierte Klassifizierung eines Sicherheitsziels dar.

Auf Grundlage dieser Resultate wird das System entworfen und ein Sicherheitskonzept entwickelt. Die Hardware- und Softwareentwicklung findet dann in weiteren parallelen Durchläufen des V-Modells statt. Auf der rechten Seite des V werden Integrationstests der entwickelten Komponenten durchgeführt und es findet eine Validierung der Sicherheitsziele sowie eine Überprüfung der funktionalen Sicherheit des Gesamtfahrzeugs anhand der funktionalen Spezifikation statt. Da sowohl das V-Modell selbst sowie ISO 26262 und IEC 61508 bewährt und bekannt sind, werden im Rahmen dieses Dokuments keine weiteren Details dazu genannt. Stattdessen wird der interessierte Leser auf die vollständigen Dokumente verwiesen. Es wird empfohlen, ISO 26262 (International Organization for Standardization, 2009) grundsätzlich immer zu befolgen.

SOTIF

Im Hinblick auf die PEGASUS-Analyse müssen für das hochautomatisierte Fahren auch die Sicherheitsprinzipien für das vorgesehene normative Verhalten des automatisierten Fahrsystems betrachtet werden, das über Fehlfunktionen von E/E-Systemen hinaus geht. Zu diesem Zweck sind in Standardisierungsgremien derzeit Aktivitäten im Gange, um die sogenannte Sicherheit der Sollfunktion zu thematisieren. Ursprünglich waren diese Aktivitäten auf Fahrerunterstützung und teilautomatisierte Systeme fokussiert. Jetzt wurden sie aber auch für höhere Automationsstufen erweitert (SAE-Stufe >= 3). Laut ISO wird „die Abwesenheit eines unangemessenen Risikos aufgrund von Gefahren, die aus Funktionsmängeln der vorgesehenen Funktionalität oder aus vernünftigerweise vorhersehbarer Fehlanwendung durch Personen entstehen, als Sicherheit der Sollfunktion bezeichnet (SOTIF)“. Um diese Aspekte abzudecken, werden Leitlinien zum geeigneten Design, zur Verifizierung und Validierung benötigt. Im Januar 2019 wurde von der ISO ein Dokument als „öffentlich verfügbarer Standard“ ISO/PAS 21448:2019 veröffentlicht (International Organization for Standardization, 2019).

Der Unterschied zwischen ISO 26262 und ISO/PAS 21488 wird in Abbildung 8 gezeigt. Im Hinblick auf Aspekte der Cybersicherheit von Straßenfahrzeugen laufen derzeit ebenfalls Aktivitäten: Hier hat die ISO/SAE 21434 im September 2018 den Status eines Komiteeentwurfs erreicht.

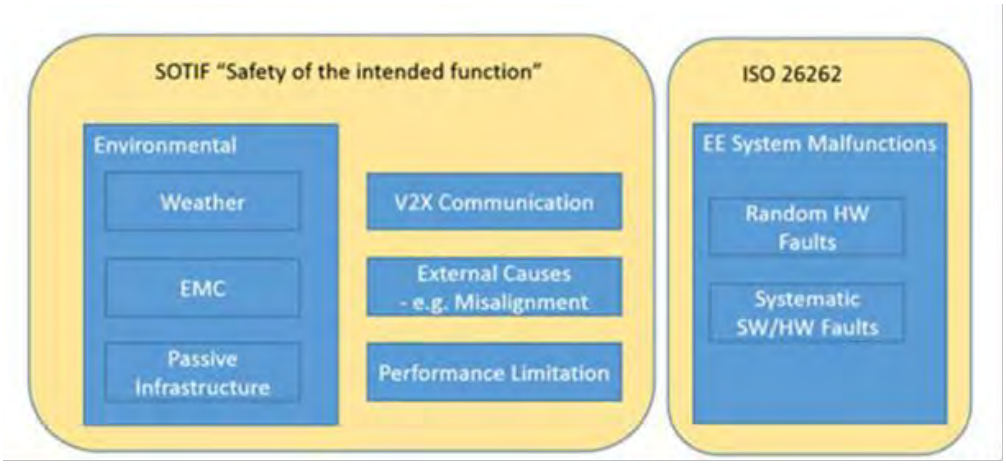


Abbildung 8 Struktur von SOTIF und ISO26262

Empfehlung

Ein prominentes Beispiel für eine Regierungsempfehlung in Bezug auf automatisiertes Fahren ist das Dokument, welches am 20. Juni 2017 durch die Ethik-Kommission des Bundesverkehrsministeriums veröffentlicht wurde (Ethics Commission Automated and Connected Driving appointed by the German Federal Minister of Transport and Digital Infrastructure, 2019). Diese Kommission wurde vom ehemaligen Bundesverfassungsrichter Udo di Fabio geleitet. Die Ethik-Kommission für automatisiertes und vernetztes Fahren wurde 2016 als interdisziplinäres Expertengremium durch den Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur eingesetzt. Ihr Ziel ist „die Entwicklung der notwendigen ethischen Leitlinien für das automatisierte und vernetzte Fahren“. Die Ergebnisse der fünf Arbeitsgruppen (Unvermeidbare Schadenssituationen, Datenverfügbarkeit, Datensicherheit, Datenökonomie, Interaktionsbedingungen für Mensch und Maschine, Ethische Kontextbetrachtungen über den Straßenverkehr hinaus, Verantwortungsreichweite für Software und Infrastruktur) wurden 2017 als öffentlich zugänglicher Bericht vorgestellt (Ethics Commission Automated and Connected Driving appointed by the German Federal Minister of Transport and Digital Infrastructure, 2019). Dieser Bericht enthält unter anderem 20 ethische Regeln für den automatisierten und

vernetzten Fahrzeugverkehr. Von besonderer Bedeutung für das PEGASUS-Projekt ist die zweite Regel: „Der Schutz von Menschen hat Vorrang vor allen anderen Nützlichkeitserwägungen. Ziel ist die Verringerung von Schäden bis hin zur vollständigen Vermeidung. Die Zulassung von automatisierten Systemen ist nur vertretbar, wenn sie im Vergleich zu menschlichen Fahrleistungen zumindest eine Verminderung von Schäden im Sinne einer positiven Risikobilanz verspricht.“ Im Rahmen der PEGASUS-Sicherheitsargumentation wird diese Regel als primäres zu erreichendes Sicherheitsziel gesetzt.

(2) Daten

In PEGASUS wird ein szenariobasierter Ansatz gewählt, um die Funktion des Autobahn-Chauffeurs zu bewerten. Diese Szenarien können auf zwei Arten abgeleitet werden, entweder systematisch (4) oder datengestützt (dieser Absatz). Beim datengestützten Ansatz zielte das Projekt darauf ab, verfügbare, nicht strikt vertrauliche Daten zu nutzen, um die Methodologie zu entwickeln und Szenariomerkmale abzuleiten. Deshalb wurden im Rahmen von (2) relevante Daten aus mehreren Quellen gesammelt, wie etwa Fahrverhaltensstudien (Naturalistic Driving Studies, NDS), Feldversuche (Field Operational Tests, FOT), Simulationsdaten aus Nutzerstudien, Unfalldaten (GIDAS) sowie bei Testfahrten aufgezeichnete Daten. Dies ist die Ausgangsbasis für alle daran anschließenden Metriken und Werkzeuge für die Suche nach relevanten Szenarien, die Ableitung der charakteristischen Szenarioparameter und Statistiken und die letztliche Bewertung der Fahrfunktion.

NDS / FOT / Testfahrten

Der PEGASUS-Ansatz mit szenariobasierten, kombinierten Tests erfordert Erkenntnisse aus dem Realverkehr, um zu verstehen, welche Situationen für hochautomatisierte Fahrfunktionen relevant sind und wie oft sie eintreten. Bei der Analyse der Daten aus Feldversuchen (FOT) und Fahrverhaltensstudien (NDS) im Rahmen von PEGASUS wurden daher Verkehrsmerkmale aus realen Fahrdaten abgeleitet. Die naturalistischen Methoden NDS und FOT repräsentieren Feldstudien im Realverkehr, bei welchen die Fahrer während eines längeren Zeitraums beim alltäglichen Fahren beobachtet wurden. Die auf diese Weise gesammelten Daten zeichnen sich durch eine hohe externe Validität aus. Des Weiteren ermöglichen die Daten einen Leistungsvergleich zwischen einer automatisierten Fahrfunktion in einem Testszenario und dem menschlichen Fahrvermögen in ähnlichen Situationen des Realverkehrs. Evaluierungskriterien für diesen Vergleich konnten bis zu einem gewissen Grad daraus abgeleitet werden.

Fahrsimulatordaten

Fahrsimulatordaten erlauben die Analyse der zugrundeliegenden kausalen Zusammenhänge von Unfällen und die systematische Annäherung und Ermittlung des menschlichen Fahrvermögens.

So hilft der Einsatz des Fahrsimulators dabei, die Lücke zwischen der Ermittlung und der Beschreibung der menschlichen Fahrleistung in kritischen und nicht-kritischen Szenarien bis hin zu Unfällen zu schließen. Weiterhin kann der Fahrsimulator auch zur Ermittlung des menschlichen Leistungsvermögens in Szenarien genutzt werden, welche aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens weder in Unfalldatenbanken noch in NDS/FOT enthalten sind.

In PEGASUS wurde das menschliche Fahrvermögen mithilfe von Fahrsimulatorstudien ermittelt, z.B. durch die wiederholte Generierung kritischer Szenarien mit variablen Reizintensitäten. Die variablen Reize wurden durch unterschiedliche Kritikalitäten operationalisiert, z.B. die Zeit bis zum Aufprall (time to collision, TTC) auf ein vorausfahrendes, die Spur wechselndes Fahrzeug. Das menschliche Fahrvermögen wurde

dann als die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Kritikalitätsstufen ausgedrückt. Zudem wurden weitere Leistungsparameter, wie z.B. das Brems- oder Reaktionsverhalten analysiert, ebenso wie die Unfallschwere. Unter Verwendung der Simulatordaten wurde die metrische Beherrschbarkeit des menschlichen Fahrers mittels einer logistischen Regression beschrieben, sie kann daher direkt mit der Leistung der automatisierten Fahrfunktion verglichen werden.

In einer ersten Simulatorstudie fuhren 52 Teilnehmer mit einer konstanten Geschwindigkeit von 130 km/h auf der linken Spur einer zweispurigen Autobahn. Ein in einer Fahrzeugkolonne vorausfahrendes Auto wechselte 63 Mal mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h von der rechten in die linke Spur. Dabei wurde die Kritikalität systematisch variiert, indem die Zeit bis zum Aufprall (TTC) verändert wurde (0,5, 0,7, 0,9, 1,1, 1,3, 1,5 s). Während des Versuchs wurde die TTC berechnet, wenn das spurwechselnde Fahrzeug auf die Mittellinie fuhr (s. Abbildung 9, angestrebte TTC). Die gemeldete TTC der folgenden Ergebnisse basiert jedoch auf dem tatsächlichen Beginn des Spurwechselmanövers, um eine realistische Einschätzung der Kritikalität zu erreichen.[2]

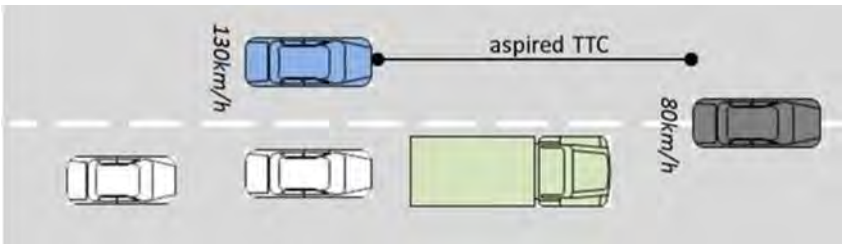


Abbildung 9 Spurwechselndes Fahrzeug mit Ego-Auto / Teilnehmer (blau) und spurwechselndem Auto (schwarz)

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Ermittlung des Fahrvermögens innerhalb dieses Versuchs auf die Stabilisierung eines Fahrzeugs fokussiert war. Die Fahraufgabe, die insbesondere fähigkeitsbasiert ist, z.B. Reaktionsfähigkeit, wurde aufgrund des direkten Einflusses auf die Kritikalität der Fahrsituation ausgewählt (Preuk, 2017).

In dieser Studie sind Unfälle in kritischen Situationen mit TTC < 1,3 s kaum vermeidbar gewesen, andererseits ereigneten sich sehr selten Unfälle mit einer TTC > 1,7 s; der Grenzwert des menschlichen Fahrvermögens sollte sich daher dazwischen befinden.

Wie oben beschrieben wurde die metrische Beherrschbarkeit des menschlichen Fahrers mittels einer logistischen Regression beschrieben und kann daher direkt mit der Leistung der automatisierten Fahrfunktion verglichen werden. Für diesen Zweck wurde die Unfallwahrscheinlichkeit mit der Beherrschbarkeit abgeglichen und auf Grundlage der gemessenen TTC vorhergesagt. Vier verschiedene logistische Regressionen wurden berechnet, um die Leistung verschiedener Fahrergruppen zu zeigen (siehe Abbildung 10):

- Gesamtprobe ohne Ausreißer (orange, n = 48),
- die mittleren 50 % der Gesamtprobe (mittelblau, n = 26),
- die besten 10 % der Gesamtprobe (hellblau, n = 7),
- die schlechtesten 10 % der Gesamtprobe (dunkelblau, n = 4).

[2] Falls das spurwechselnde Fahrzeug noch nicht sichtbar war, wurde der Punkt der frühesten Sichtbarkeit zur Berechnung der TTC verwendet.

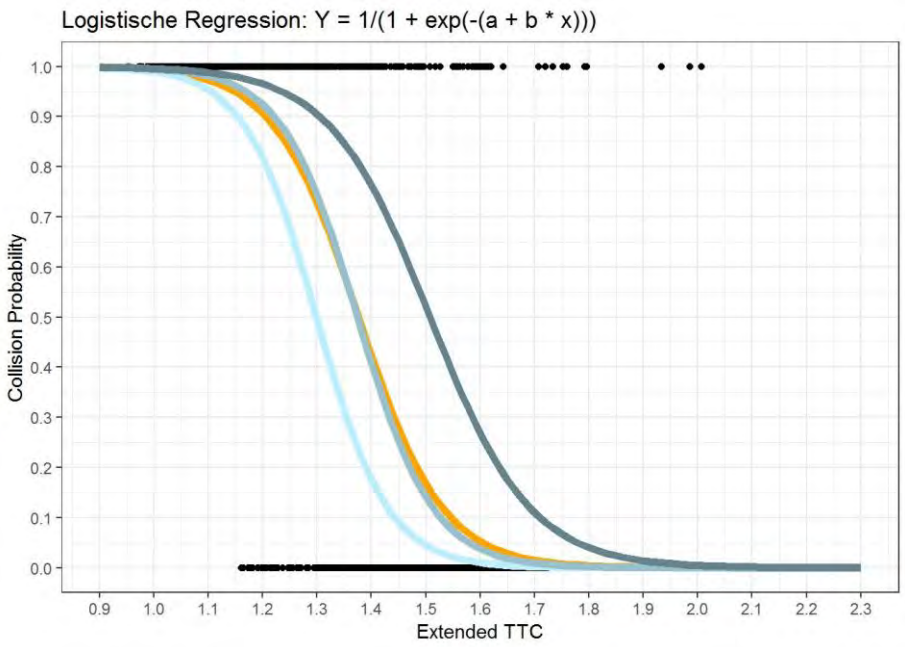


Abbildung 10 Vorhersage der Unfallwahrscheinlichkeit auf Grundlage von TTC als logistische Regression

Der Grenzwert des menschlichen Fahrvermögens wurde durch eine Unfallwahrscheinlichkeit von 50 % definiert, welche für die Gesamtprobe innerhalb der Studie mit einer TTC von 1,38 s verknüpft ist.

GIDAS- und PCM-Daten

Die deutsche Unfallforschungsstudie GIDAS (German In-Depth Accident Study) ist eine Datenbank mit realen Unfällen, welche von der MHH (Medizinische Hochschule Hannover (MHH), 2019) und der VUFO (Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH, 2019) untersucht werden. Das Projekt wird seit 1999 von der *Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)* und der *Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V.* (FAT) finanziert.

Damit ein Unfall in GIDAS dokumentiert wird, muss er Stichprobenkriterien erfüllen, damit die Daten als repräsentative Stichprobe des deutschen Unfallgeschehens gelten können. Als Kriterium gilt, dass mindestens eine Person mindestens leicht verletzt worden sein muss. GIDAS enthält Informationen zu den beteiligten Verkehrsteilnehmern (z.B. Fahrzeug, Radfahrer, Fußgänger, etc.) und den Personen, ihren erlittenen Verletzungen und der Infrastruktur. Jeder Unfall wird rekonstruiert und die Befunde werden ebenfalls in der Datenbank gespeichert.

Die Pre-Crash-Matrix (PCM) ist ein Ableger der GIDAS-Daten. Sie ist nicht repräsentativ für das deutsche Unfallgeschehen, sondern beschreibt Informationen in Bezug auf die Phase vor dem Unfall zweier Verkehrsteilnehmer. Die Datenbank enthält detaillierte Informationen zur vorhergesagten Trajektorie des Fahrzeugs fünf Sekunden vor dem ersten Aufprall.

Die GIDAS-Datenbank mit der PCM-Erweiterung sammelt ausführliche Daten zu realen Verkehrsunfällen in den Regionen Hannover und Dresden. Jedes Jahr werden bis zu 2000 Unfälle untersucht, wobei über 3000 unfallrelevante Einzelmerkmale dokumentiert werden. Zu diesen Informationen gehören

- Umweltbedingungen
- Straßengestaltung und Verkehrsregelung
- Fahrzeugdeformationen

- Aufprallstellen von Insassen bzw. anderen Verkehrsteilnehmern
- Technische Kenndaten wie Fahrzeugart und technische Ausstattung
- Unfallinformationen und Kennwerte, u. a. Kollisions- und Fahrgeschwindigkeit, Δ v und EES
- Unfallursachen und Details zum Unfallhergang
- Personenspezifische Informationen wie Gewicht, Größe, Alter
- Verletzungsmuster, präklinische und klinische Versorgung

Die PCM-Daten erweitern die existierenden Daten um detaillierte Informationen zur Fahrzeugdynamik in der Vorunfallphase bis fünf Sekunden vor dem Aufprall der ersten beiden Unfallbeteiligten. Die Kriterien für einen Anwendungsfall mit PCM sind:

- Mindestens ein PKW ist beteiligt
- Kein Beteiligter gerät ins Schleudern
- Kein Beteiligter fährt rückwärts
- Kein Beteiligter mit Anhänger
- Kein Beteiligter mit technischem Defekt

In der berücksichtigten GIDAS-Version (31.12.2016) sind 29.514 Unfälle erfasst, von denen für 8.651 Unfälle eine PCM vorliegt. Insgesamt umfassen die GIDAS-Fälle 24.359 Kollisionen mit Autobeteiligung, in Verbindung mit welchen 47.983 Unfallbeteiligte (33.920 Autos) erfasst wurden. An den Fällen mit Autobeteiligung waren insgesamt 64.263 Personen beteiligt, wovon 5.303 mindestens eine Verletzung der Kategorie AIS 2 (oder höher) erlitten. Weitere Informationen zur Verletzungsskala AIS findet sich in (AAAM, 1998) und (AAAM, 2005).

(3) Anforderungsanalyse

Im Allgemeinen existieren verschiedene Methodiken für die Anforderungsermittlung in Bezug auf das tolerierbare Risiko neuer Technologien. So legt die CEN/CENELEC in der EN 50126 (Global Spec) die Konzepte der Risikobewertung dar und verweist auf die etablierten Prinzipien GAMAB „mindestens so gut wie“, ALARP „so niedrig wie vernünftigerweise praktikabel“ und die minimale endogene Mortalität. Für die Spezifikation und Entwicklung von sicherheitsrelevanten Bahnsystemen ist der RAMS-Ansatz etabliert.

Dieser Ansatz schließt eine Systemdefinition sowie die Implementierung von Risikoanalysen, Gefahrenbestimmung und Sicherheitszulassungen ein. Details dazu und mögliche Folgerungen für den Einsatz von hochautomatisierten Fahrzeugen finden sich in den folgenden Absätzen.

Methode zur Definition von Akzeptanzkriterien

Im Allgemeinen wird erwartet, dass die Einführung von HAF-Fahrzeugen zu einer gesteigerten Verkehrssicherheit und einer Reduzierung der Unfalltoten führen wird. Die quantitativen Sicherheitsanforderungen werden jedoch immer noch diskutiert. Dieser Abschnitt analysiert die Risikoakzeptanz anhand mehrerer Akzeptanzprinzipen und wendet das Sicherheitsniveau auf den heutigen Straßenverkehr an, um Referenzwerte für akzeptable Risiken abzuleiten. Der Fokus liegt auf makroskopischen Sicherheitsanforderungen, d.h. auf den Unfallzahlen im Verhältnis zur gefahrenen Strecke, nicht auf dem Verhalten in individuellen Fahrsituationen. Die Schlussfolgerung lautet, dass das akzeptable Risiko je nach beteiligter Fokusgruppe und je nach Marktdurchdringung automatisierter Fahrzeuge variiert. Eine gesteigerte Sicherheit des konventionellen Fahrens könnte in Zukunft ebenfalls zu höheren Anforderungen führen. Es wird auch darauf hingewiesen, dass die Akzeptanz der jeweiligen akzeptablen Risikoniveaus durch den Kunden nicht garantiert ist, da neben den Unfallstatistiken auch andere Faktoren eine Rolle spielen. Es wird für einen Sicherheitsnachweis argumentiert und da keines dieser Risikoniveaus vor Einführung der Technologie belegt wer-

den kann, wird eine Überwachung der Fahrzeuge im echten Straßenverkehr vorgeschlagen. Verschiedene Einführungs- und Risikomanagementstrategien werden kurz beschrieben. Schließlich wird das bei der Einführung neuer Generationen von Flugzeugen bestehende Risiko diskutiert.

Detaillierte Inhaltsangabe (Methoden und Ziele):

Die Inhaltsangabe ist eine Kurzfassung einer Arbeit von Philipp Junietz, Udo Steiniger und Hermann Winner, vgl. (Philipp Junietz, 2019).

Der Fokus der folgenden Inhaltsangabe liegt auf den Resultaten und ihrer Einbettung in das Gesamtkonzept, insbesondere auf der Synchronisation mit Arbeitspaketen zur Definition eines Sicherheitsniveaus für HAF-Funktionen und die Ableitung von Anforderungen für eine HAF-Funktion.

Quantitative Risikobewertung

Die übliche quantitative Risikodefinition „Risiko gleich Eintrittswahrscheinlichkeit mal Schadensschwere“ wird in Abbildung 11 illustriert. Betrachten wir die Häufigkeit unbeabsichtigter Ereignisse (Eintrittswahrscheinlichkeit) und das Ausmaß des Schadens (Schadensschwere), so erkennen wir zwei typische Bereiche. Im grünen Bereich befindet sich das System in einem sicheren Zustand; das zugehörige Risiko wird akzeptiert. Im roten Bereich befindet sich das System in einem unsicheren Zustand; das zugehörige Risiko wird nicht akzeptiert. Die Grenze zwischen diesen beiden Bereichen ist wahrscheinlich keine scharfe Linie; es kann eine Art Übergangsbereich geben. Obwohl diese einfache Definition für viele Fragen der Technologie- und Versicherungsbranche sehr nützlich ist, vernachlässigt sie Aspekte wie die Aversion gegen hohe Schweregrade, die mangelnde Beherrschbarkeit sowie persönlicher Nutzen, die für die Risikowahrnehmung und -akzeptanz durch Individuen und die Gesellschaft eine Rolle spielen.

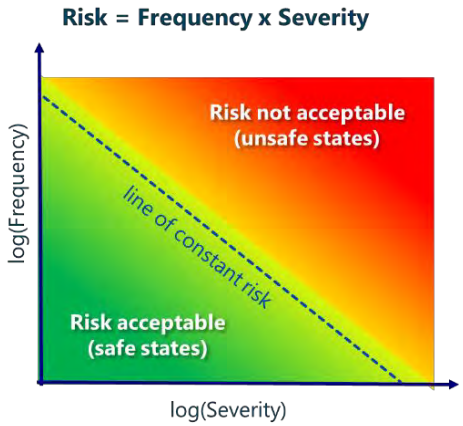


Abbildung 11 Allgemeine Risikodefinition
(*Fritzsche, A. F. Wie sicher leben wir? Verlag TÜV Rheinland, 1986*)

Fritzsche diskutierte 1986 die Risikoakzeptanz in Verbindung mit der Freiwilligkeit der Exposition. Die Ergebnisse werden in Abbildung 12 zusammengefasst. Die Zahlen sind bis heute gültig. Grund dafür könnte sein, dass Studien zur Risikowahrnehmung in den 70ern ihren Höhepunkt erreichten, im Zuge der Verbreitung von Atomkraftwerken. Spätere Studien ergaben keine relevanten Veränderungen der Risikowahrnehmung.

Für freiwillige Aktivitäten stellte Fritzsche fest, dass die Bereitschaft Risiken zu akzeptieren abhängig vom erlebten persönlichen Nutzen beinahe unbegrenzt ist. Wir sehen dies beispielsweise bei risikoreichen Sportarten oder anderen Freizeitaktivitäten, wie z.B. Freiklettern, Motorradfahren etc. Für ein tieferes Verständnis des Themas spielen berufsbezogene Aktivitäten eine wichtige Rolle. In diesem Bereich ist die Akzeptanz relativ gut erforscht: Zum einen besteht allgemeine Einigkeit über ein akzeptiertes individuelles Sterberisiko der Größenordnung 10^{-5} pro Person und Jahr, zum Beispiel

bei Berufsverbänden und Versicherungsgesellschaften. Zum anderen sind berufsbezogene Risiken nützlich, um die Lücke zwischen freiwilligen und unfreiwilligen Risiken zu überbrücken.

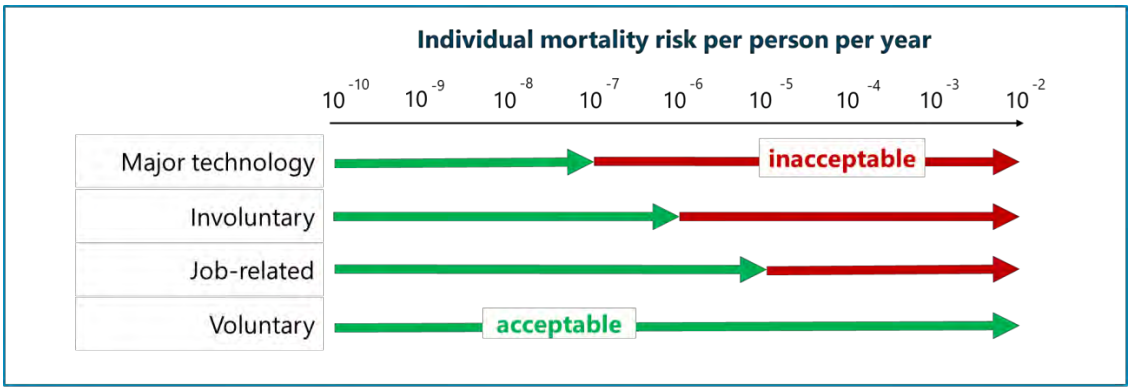


Abbildung 12 Risikoakzeptanz versus Freiwilligkeit der Risikoexposition

[siehe (Philipp Junietz, 2019)*, basierend auf Steininger, U., und L. Wech: Wie sicher ist sicher genug? Sicherheit und Risiko zwischen Wunsch und 29 Wirklichkeit. VDI-Berichte, Nr. 2204, 2013 und Fritzsche, A. F. Wie sicher leben wir? Verlag TÜV Rheinland, 1986]*

Fritzsche stellte fest, dass das Akzeptanzniveau bei unfreiwilligen Risiken, z.B. dem Tod von Passagieren durch Zugunglück oder Flugzeugabsturz, um eine Größenordnung niedriger ist als bei berufsbezogenen Risiken. Des Weiteren sinkt die Akzeptanz um eine weitere Größenordnung, wenn das Risiko durch Großtechnologie verursacht wird, z.B. die Chemieindustrie oder nukleare Stromerzeugung. Neben der Tatsache, dass der wahrgenommene persönliche Nutzen dieser Technologien gering ist (zumindest aus subjektiver Perspektive), spielt auch der niedrige Grad der Selbstbestimmtheit beziehungsweise der Beherrschbarkeit durch Individuen eine wichtige Rolle für das niedrige Akzeptanzniveau, ebenso wie die potenziell hohe Anzahl von Todesfällen (Schadensschwere). Nichtsdestotrotz zeigt Abbildung 12, dass es generell möglich ist, auf quantitative Weise mit Risiken, Risikowahrnehmung und Risikoakzeptanz umzugehen.

Um Sicherheitsanforderungen auf Grundlage der Risikoakzeptanz umzusetzen, wurden in verschiedenen Anwendungsgebieten mehrere Grundsätze entwickelt. Aufgrund der Beziehung zwischen Bahn- und Straßenverkehr ist es nützlich, hier auf die CENELEC-Sicherheitsnorm EN 50126 zu verweisen. Mit der Entwicklung dieser Norm wurde in den 1990er Jahren begonnen. Es wurden auf quantitative Risikoanalyse gestützte Sicherheitsanforderungen implementiert und ALARP, MEM und GAMAB wurden als Prinzipien der Risikoakzeptanz eingeführt.

Das Prinzip *„so niedrig wie vernünftigerweise praktikabel“* (as low as reasonably practicable, ALARP) zielt darauf ab zu ermitteln, was unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Sinnhaftigkeit und gesellschaftlichen Akzeptanz technisch machbar ist. Zwischen den beiden Bereichen des allgemein nicht akzeptierten und des weithin akzeptierten Risikos liegt ein Toleranzbereich, in welchem ein Risiko nur dann eingegangen wird, wenn dadurch ein Nutzen erwartet wird, und in dem jedes Risiko so niedrig wie vernünftigerweise praktikabel gehalten werden muss. Die beiden Schlüsselwerte liegen jeweils auf dem Niveau der Wahrscheinlichkeit, im Straßenverkehr zu Tode zu kommen (etwa 10^{-4} pro Person und Jahr) beziehungsweise vom Blitz getroffen zu werden (etwa 10^{-7} pro Person und Jahr). Ist etwas riskanter als Autofahren, so ist das Risiko inakzeptabel. Ist etwas weniger riskant als vom Blitz getroffen zu werden, dann erwarten wir nicht, dass irgendjemand etwas dagegen unternimmt. Im Bereich zwischen diesen beiden Werten sind Kosten-Nutzen-Untersuchungen angemes-

sen, um das Risiko so weit zu senken, wie es vernünftigerweise praktikabel ist EN 50126.

Minimale endogene Mortalität (MEM) basiert auf alters- und geschlechtsspezifischen Mortalitätsraten. Obgleich die absoluten Werte der Mortalitätsraten je nach Geburtsjahrgang variieren, zeigen sie eine typische Entwicklung mit zunehmendem Alter sowie ein signifikantes Minimum bei einem Alter von etwa 10 Jahren. Die auf einen Zeitraum von 10 Jahren zuzuordnende Mortalität ist als „minimale endogene Mortalität" definiert. Das MEM-Prinzip verlangt, dass ein neu einzuführendes System nicht signifikant zur existierenden minimalen endogenen Mortalität beiträgt. EN 50126 spezifiziert, dass das individuelle Risiko eines bestimmten technischen Systems nicht 1/20 der minimalen endogenen Mortalität überschreiten darf, wobei zu berücksichtigen ist, dass Menschen normalerweise dem Risiko mehrerer technischer Systeme zugleich ausgesetzt sind. Das bedeutet, dass das akzeptierte individuelle Risiko eines bestimmten technischen Systems etwa $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ pro Person und Jahr betragen sollte (Bundesamt, 2017).

Globalement au moins aussi bon (GAMAB) – auf Deutsch: generell mindestens so gut wie - erfordert, anders als MEM, die Existenz eines Referenzsystems mit gegenwärtig akzeptierten Restrisiken. Nach GAMAB dürfen durch ein neues System verursachte Restrisiken jene des Referenzsystems nicht überschreiten. In anderen Worten: Ein neues System muss ein Risikoniveau bieten, welches generell mindestens so gut ist wie jenes, das durch jedes äquivalente, bereits existierende System geboten wird. Dies macht es erforderlich, das Risiko des existierenden äquivalenten Systems zu identifizieren. Zur Ermittlung des akzeptablen Risikos einer HAF-Funktion in einem bestimmten Anwendungsbereich nach GAMAB müssen wir das gegenwärtige Risiko des existierenden äquivalenten Systems im gleichen Anwendungsbereich identifizieren. Um Akzeptanzanforderungen an einen zugangsbeschränkten Autobahn-Piloten abzuleiten, analysieren wir das gegenwärtig beim manuellen Fahren auf zugangsbeschränkten deutschen Autobahnen bestehende Risiko. Auf diesem Wege erhalten wir einen Durchschnittswert für tödliche Unfälle von $1{,}52 \cdot 10^{-9}$/km (Schöner H.-P. , 2014). Dies kann mithilfe bekannter Fahrprofile in eine Unfallrate von $6 \cdot 10^{-6}$ pro Person und Jahr übersetzt werden (VDA, 2015).

In Abbildung 13 werden die unterschiedlichen Ansätze für das Mortalitätsrisiko zusammengefasst. Einerseits wird gezeigt, dass die Anwendung unterschiedlicher Risikoakzeptanzprinzipien kohärente und vergleichbare Ergebnisse liefert. Andererseits demonstriert dies, dass wir es mit einem relativ breiten Spektrum anwendbarer Akzeptanzkriterien zu tun haben.

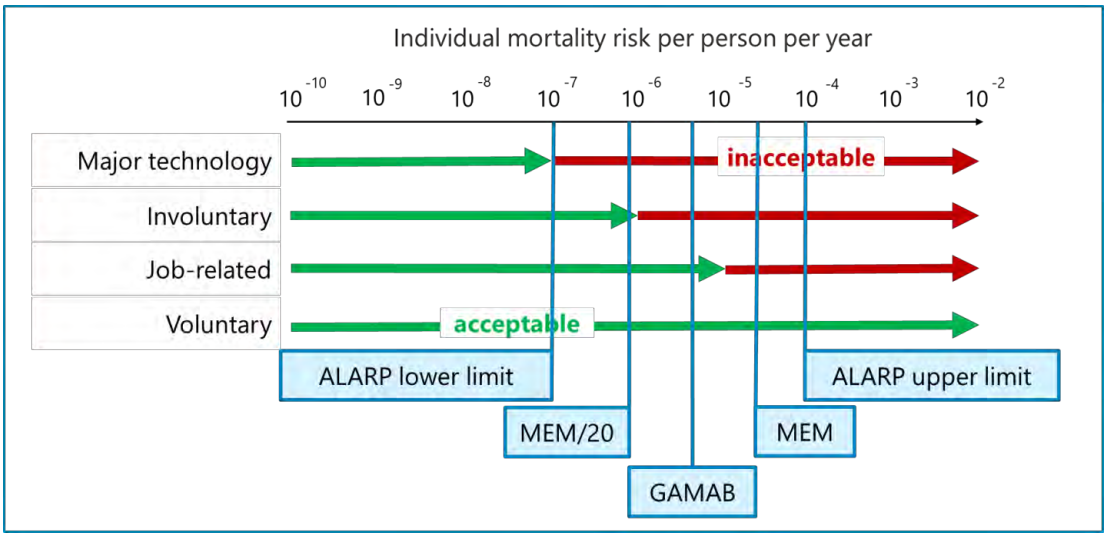


Abbildung 13 Umsetzung mehrerer Risikoakzeptanzgrundsätze für einen Autobahn-Piloten (siehe (Philipp Junietz, 2019))

In einem ersten Schritt erscheint der Vergleich mit anderen Technologien nützlich – insbesondere mit anderen Verkehrssystemen und Technologien, die einen hohen persönlichen Nutzen bieten. Dann müssen verschiedene Fokusgruppen unterschieden werden, zum Beispiel Nutzer hochautomatisierter Fahrsysteme und andere Verkehrsteilnehmer, wobei die Auswirkungen der freiwilligen Exposition zu berücksichtigen sind. In Zukunft wird zudem eine Senkung des allgemeinen Sterberisikos erwartet, entsprechend dem Trend der letzten Jahrzehnte und Jahrhunderte. Daher kann sich die Risikoakzeptanz im Laufe der Zeit ändern.

Einführung neuer Technologien in der Luftfahrt

In der Luftfahrt sind Passagiere einem technischen System ausgesetzt, ohne persönliche Kontrolle darüber zu haben. Obwohl schwere Unfälle geschehen, wird dessen Sicherheit vom Großteil der Bevölkerung akzeptiert. Aufgrund der langen Reisestrecken und der Tatsache, dass Unfälle vor allem bei Start und Landung geschehen, werden die Unfallquoten in der Regel auf den Flug und nicht auf die Reisestrecke bezogen. Unfälle und kritische Situationen werden genau protokolliert und in Datenbanken gesammelt, so dass hier noch detailliertere Daten zur Verfügung stehen als für den Straßenverkehr. Abhängig von der Anzahl der Flüge pro Jahr können wir hier ein jährliches Risiko beobachten, das dem des Autofahrens auf einer Autobahn ähnelt. Es geschieht etwa ein tödlicher Unfall pro zehn Millionen Flügen (Airbus, 2017). Bei einer typischen Exposition von zwei Flügen pro Jahr läge das Risiko eines tödlichen Unfalls niedriger als das Risiko unfreiwilliger Exposition f_{inv} und um etwa eine Größenordnung höher als das Risiko des Fahrens auf einer Autobahn. Bei 20 Flügen pro Jahr wäre man allerdings einem Risiko ausgesetzt, das in der gleichen Größenordnung liegt. Daher sind die Risikoniveaus tatsächlich vergleichbar, wenn nur das Fahren auf zugangsbeschränkten Autobahnen berücksichtigt wird. Typische Nutzer fahren jedoch auf Straßen aller Art. Das Risiko des Autoverkehrs liegt insgesamt mindestens um eine Größenordnung höher, der bessere Ruf der Luftfahrt ist daher gerechtfertigt.

Die Luftfahrt ist in den vergangenen Jahrzehnten immer stärker automatisiert worden (obwohl die heutigen Systeme immer noch auf SAE-Stufe 2 liegen, da sie durch die Crew überwacht werden). Die detaillierte Datenerfassung in der Luftfahrt ermöglicht eine Analyse im Hinblick auf Flugzeug-Generationen, welche von Airbus Industries zusammengefasst (Airbus, 2017). Wie in Abbildung 14dargestellt, war bei jeder Einführung einer neuen Generation die Quote tödlicher Unfälle mit den Flugzeugen dieser Generation höher als beim bisherigen Stand der Technik. Aufgrund der niedrigen Zahl neuer Flugzeuge bei deren Markteinführung zeichnet sich dieser Trend in der Gesamtunfallquote nicht ab. Nichtsdestotrotz war die Einführung eindeutig von Nutzen für die Gesellschaft insgesamt, denn nach einer Einführungsphase von fünf bis zehn Jahren wies die neue Generation die niedrigste Unfallquote von allen auf.

Diesen Daten nach zu urteilen werden neue Flugzeug-Generationen keinen Tests unterzogen, die statistisch belegen würden, dass das neue System seinem Vorgänger überlegen ist. In der Tat ist dies unmöglich, da das Wissen über das Verhalten des neuen Systems unvollständig ist und Unwägbarkeiten nur mithilfe praktischer Erfahrungen reduziert werden können. Ähnlich wie bei HAF sind statistische Tests weder wirtschaftlich machbar noch notwendig, weil die strenge Überwachung der Luftfahrt eine wirksame Verbesserung im Falle von kritischen Situationen oder Unfällen erlaubt. Allerdings ist die höchste Automationsstufe in der kommerziellen Luftfahrt nach wie vor mit SAE-Stufe 2 vergleichbar, womit menschliches Versagen immer noch ein Faktor ist. Nichtsdestotrotz hat mit der Einführung von Technologie ein sprunghafter Anstieg der Unfallquote stattgefunden, sei es aufgrund von Mängeln in der Interaktion zwischen Mensch und Maschine oder wegen Mängeln an der Technologie selbst. Man könnte argumentieren, dass es unethisch ist, ein System freizugeben, welches vorher nicht auf bestmögliche Weise getestet worden ist. Aber erstens ist es unmöglich, ein in einer unkontrollierten Umgebung arbeitendes System vollständig zu testen, da Situ-

ationen eintreten können, die dem Prüfer nicht bewusst waren. Diese unbekannten Unwägbarkeiten können nicht getestet werden. Zweitens würde ein strengeres Zulassungsverfahren technischen Fortschritt verhindern, da eine ökonomisch orientierte Entwicklung unmöglich würde. Es erscheint möglich, wenn nicht gar wahrscheinlich, dass sich die Unfallquote automatisierter Fahrzeuge ähnlich verhalten wird. Dabei sollte man sich dieser Möglichkeit bewusst sein und sich im Falle einer aufgetretenen kritischen Situation oder eines Unfalls auf die Verbesserung des Systems konzentrieren. Die verzögerte Einführung von HAF könnte tatsächlich zahlreiche Menschenleben aufs Spiel setzen, weil angenommen wird, das System würde mit der Zeit die Sicherheit steigern.

Selbst mit einer kombinierten Prüfstrategie mit Simulationen sowie Testfahrten auf dem Prüfgelände und im Realverkehr ist es immer noch unwahrscheinlich, dass ein logischer Sicherheitsnachweis vollständig erbracht werden kann, da jedem Validierungstest bestimmte Annahmen zugrunde liegen. Um mit dieser ungewissen Sicherheit umzugehen, müssen Unfälle, unerwartete kritische Situationen und Beinaheunfälle ähnlich wie in der Luftfahrt überwacht werden, um Schwachstellen im System zu finden (einschließlich in der Infrastruktur und der menschlichen Interaktion) und eine Chance zu deren Behebung zu haben. Dies wird später im Detail besprochen.

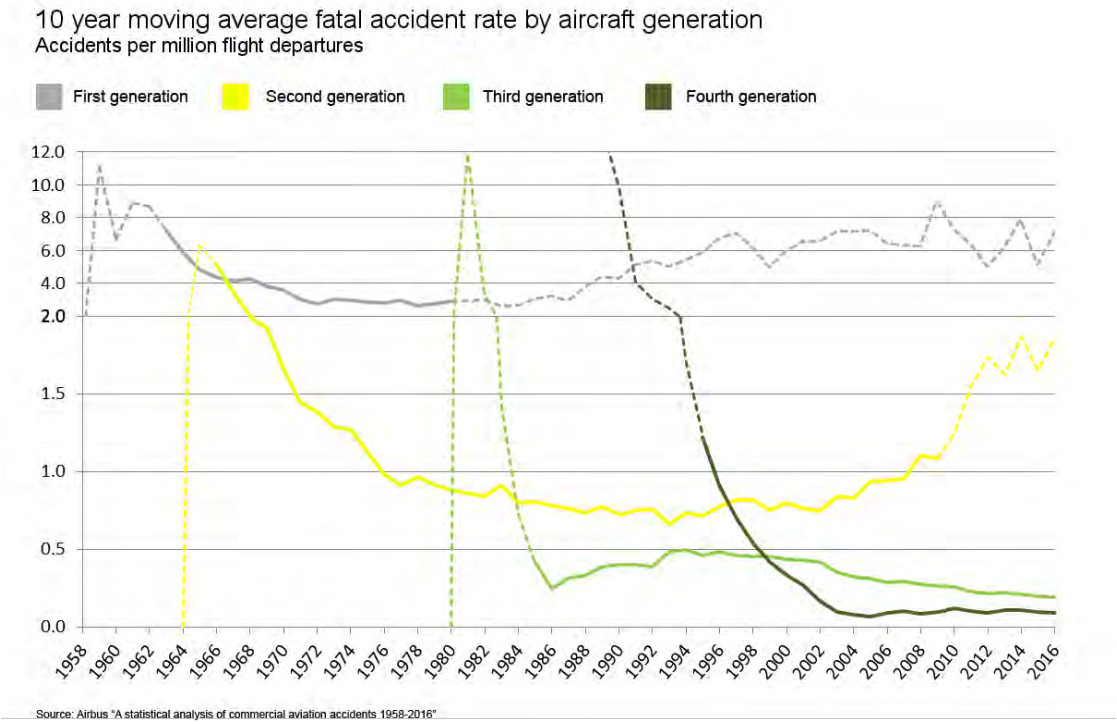


Abbildung 14 Tödliche Unfälle mit Flugzeugen unterschiedlicher Generationen in der kommerziellen Luftfahrt Gestrichelte Linie bedeutet weniger als eine Million Flüge pro Jahr. Erste Generation: frühe kommerzielle Düsenflugzeuge; zweite Generation: stärker integriert (Airbus, 2017)

(4) Systematische Szenarienidentifikation

Wissensbasierte Herangehensweisen an die Generierung von Szenarien ergänzen datenbasierte Ansätze. Da die jeweiligen Stärken und Schwächen der beiden Ansätze - Abdeckung seltener Ereignisse vs. frequentistisch adäquate Darstellung üblicher Situationen - zueinander komplementär sind, können der datenbasierte und der wissensbasierte Ansatz sich gegenseitig unterstützen und ihre jeweiligen Nachteile gegenseitig ausgleichen.

In PEGASUS wurden mehrere Herangehensweisen an die auf Systemwissen basierende Identifizierung von Szenarien angewandt. Ein Ansatz besteht in der Beschreibung „normaler“ Szenarien auf den Autobahnen unter Verwendung von Ontologien. Um diesen Ansatz zu er-

weitern und zu vervollständigen sowie mögliche kritische Szenarien zu einem frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess zu identifizieren und eine ausreichende Testfallabdeckung zu garantieren, werden für den Autobahn-Chauffeur Methoden entwickelt und angewandt, die es ermöglichen Automationsrisiken systematisch zu identifizieren. Des Weiteren wurde ein expertengestützter Ansatz für die Identifizierung von Szenarien auf Ebene 4 des 6-Ebenen-Modells entwickelt, welche für die Parametrierung mit Messdaten geeignet ist.

Anwendung von Ontologien für die Szenariogenerierung

Wie in Abbildung 15 zu sehen ist, wird der Prozess zur wissensbasierten Szenariogenerierung unter Verwendung einer in PEGASUS implementierten Ontologie in zwei Schritten umgesetzt.

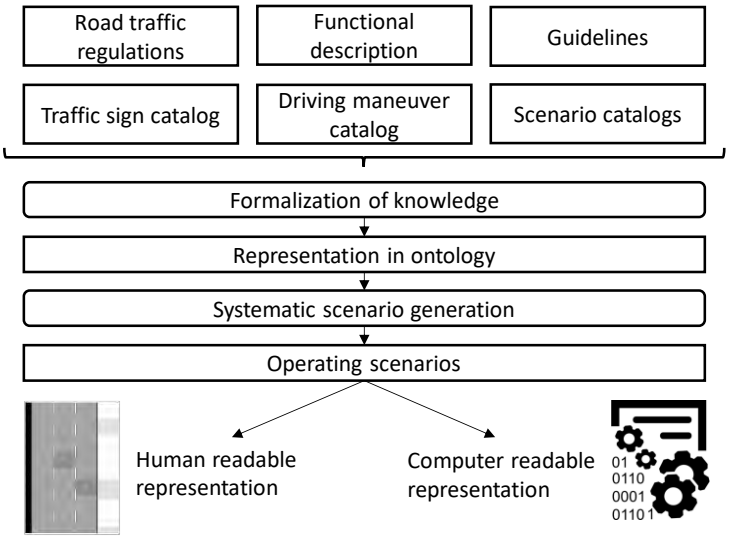


Abbildung 15 Ontologiegestützter Prozess für die Szenarienerzeugung auf Grundlage von (Bagschik, Mezel, & Maurer, 2018)
Rechtecke repräsentieren Arbeitsprodukte, abgerundete Ecken stehen für Prozessschritte.

Im ersten Schritt wird sprachlich beschriebenes Wissen über Straßenverkehrsmuster auf deutschen Autobahnen identifiziert, konzeptualisiert und formalisiert. Zur Formalisierung des Wissens wird eine Ontologie in der Web Ontology Language (OWL) implementiert. Deshalb wird das Wissen durch hierarchische Klassen sowie durch semantische Beziehungen und Einschränkungen zwischen diesen Klassen repräsentiert. Das in der Wissensbasis modellierte Wissen wird nach einem 6-Ebenen-Modell strukturiert (siehe Abbildung 16). Auf Grundlage früherer Arbeiten von (Schuldt, 2017) wurde das Modell für die Repräsentation in einer Ontologie und die automatisierte Erstellung funktionaler Szenarien angepasst. Auf der ersten und zweiten Ebene wird das Straßennetz gemäß der deutschen Richtlinien für die Anlage von Autobahnen beschrieben. Im Entwurf beschreibt die dritte Ebene temporäre Manipulationen der Ebenen Eins und Zwei (etwa Straßenbaustellen). Im Rahmen von PEGASUS wurde diese Schicht jedoch nicht implementiert. Auf der vierten Ebene werden die Interaktionen der Verkehrsteilnehmer durch Manöver dargestellt. Auf der fünften Ebene werden Wetterbedingungen modelliert. Die sechste Ebene beschreibt digitale Informationen, wie etwa V2X und digitale Daten. Ähnlich wie die dritte Ebene wurde die sechste Ebene in PEGASUS nicht ausgearbeitet.

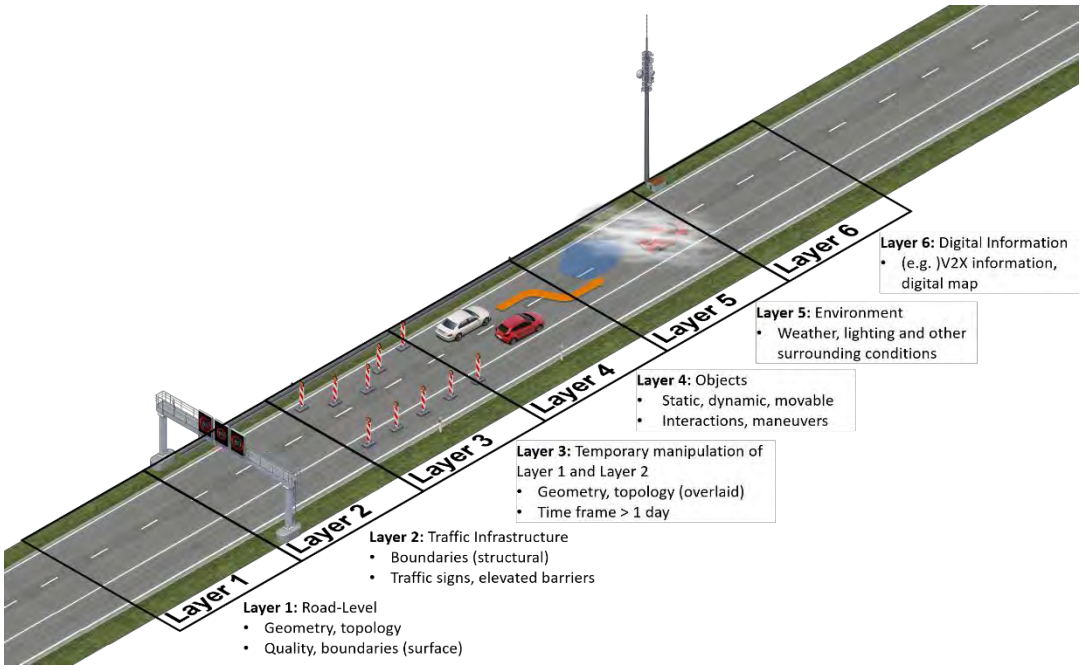


Abbildung 16 6-Ebenen-Modell für die Strukturierung von Szenarien nach (Bock, Krajewski, Eckstein, & Klimke, Data Basis for Scenario-Based Validation of HAD on Highways, 2017), (Bagschik, Mezel, & Maurer, 2018), (Schuldt, 2017)

Im zweiten Schritt werden Szenarien automatisch und systematisch mithilfe von variierenden, in der Ontologie definierten Klassen und Instanzen abgeleitet. Im Sinne der Variation werden mögliche Kombinationen und Restriktionen berücksichtigt, die in der Wissensbasis spezifiziert sind. Daher werden Szenarien schrittweise erzeugt.

Zu Beginn werden mögliche Szenerien einschließlich der Beziehungen der jeweiligen Elemente (wie etwa Anordnungsbeziehungen) erzeugt. Die für die Variation zu berücksichtigenden Elemente können vom Nutzer durch Eigenschaften spezifiziert werden. Danach werden für jede Szenerie alle Kombinationen von Verkehrsteilnehmern generiert, basierend auf einem definierten Positionsraster, und jedem Verkehrsteilnehmer werden alle möglichen Manöver zugeordnet. Zu diesem Zeitpunkt sind multiple Kombinationen von Szenerien und Verkehrsteilnehmern generiert worden, einschließlich ihrer Anordnung und aller möglichen Manöver.

Im nächsten Schritt wird ein einzelnes durchzuführendes Manöver für jeden Verkehrsteilnehmer gewählt, um eine Startszene zu konstruieren. In der Folge wird auf Grundlage der sich aus den einzelnen Manövern ergebenden Beschränkungen (wie etwa relative Geschwindigkeiten) für jede Startszene eine Endszene abgeleitet. Außerdem werden die Fahrwege im Hinblick auf Kollisionen geprüft und falls welche entstehen, wird die entsprechende Endszene verworfen. Die Kombination aus einer Startszene und einer Endszene definiert ein Szenario. Wie in Abbildung 17 zu sehen ist, wird jedes Szenario als abstrahierte, HTML-basierte Visualisierung und als Szenario-Graph mit detaillierter sprachlicher Beschreibung exportiert. Zusätzlich erlaubt der Export des aus Startszene und Endszene bestehenden Szenarios in die technischen Formate OpenDRIVE und OpenSCENARIO die Ausführung des Szenarios in der Simulation.

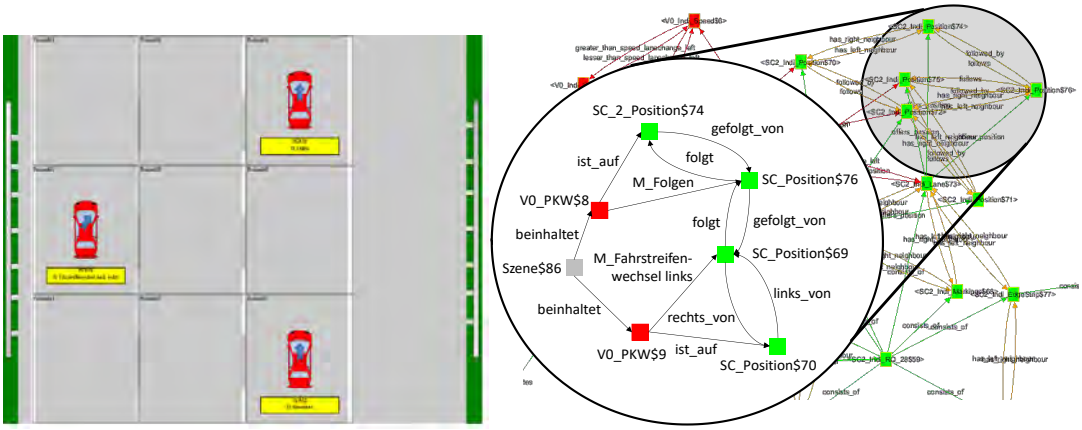


Abbildung 17 Links: HTML-basierte Visualisierung als abstrahierte Draufsicht; Rechts: Szenario-Graph als detaillierte sprachliche Beschreibung

Identifizierung von Automationsrisiken

Die Methoden zur Identifizierung von Automationsrisiken nutzen bewährte Techniken zur Gefahren- und Risikobewertung sowie eine gründliche Sicherheitsanalyse. Ihr Zweck ist es, die Ursachen von Risiken frühzeitig zu identifizieren, insbesondere jene, die sich aus der Einführung hochautomatisierter Fahrfunktionen (HAF-Funktionen) ergeben. Im Rahmen der Analyse werden mögliche Gefährdungsszenarien identifiziert und in Form von Parameterbereichen logischer Szenarien dargestellt. Dies ermöglicht später im Testprozess eine gezielte Prüfung sowie eine ausreichende Testfallabdeckung potenziell kritischer Szenarien.

Für jede Klasse von Automationsrisiken wurde eine andere Methode entwickelt, um den spezifischen Herausforderungen der jeweiligen Klassen zu begegnen. Die Methoden zur Identifizierung von Automationsrisiken der Klassen 1 und 2 ähneln sich jedoch strukturell.

Für Automationsrisiken der Klasse 1 wurde eine iterative Methode entwickelt, die auf traditionellen Sicherheitsanalysemethoden wie HAZOP und der Fehlerbaumanalyse basiert (vgl. (Ericson, 2005)).

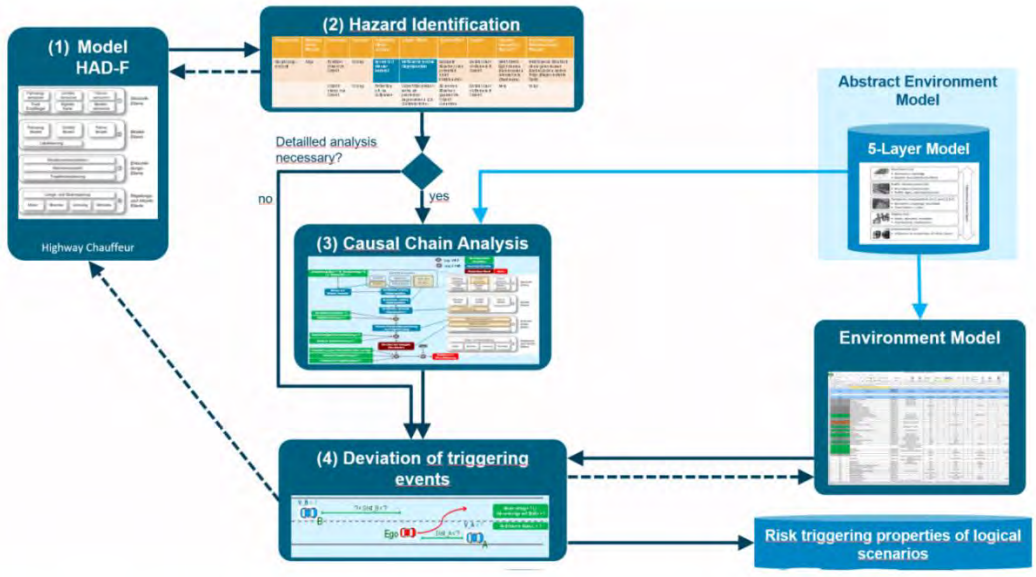


Abbildung 18 Übersicht über die Methode zur Identifizierung von Automationsrisiken der Klasse 1.

Die Methoden der Sicherheitsanalyse wurden den Erfordernissen entsprechend angepasst, um die spezifischen Herausforderungen angehen zu können, die sich aus der Einführung von HAF-Funktionen ergeben. Automationsrisiken der Klasse 1 sind jene, die sich aus externen Einflüssen auf die Automation ergeben. Sie entsprechen Situationen, in welchen die HAF-Funktion Schwierigkeiten mit den Umweltbedingungen oder dem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer hat. Dies schließt die Nichterkennung oder Fehlklassifizierung von Umgebungsobjekten, die erratische Erkennung von in der Realität nicht existenten Objekten sowie die Fehlprognose hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung einer Situation ein. Diese Probleme rühren nicht notwendigerweise von einer Störung der E/E-Systeme her, können aber systeminhärent sein (z.B. Wahrnehmungseinschränkungen aufgrund einer spezifischen Sensoranordnung) und sind im Allgemeinen nur in einem bestimmten Szenario oder in einer kleinen Gruppe von Szenarien sichtbar.

Der erste Schritt zur Identifizierung dieser Szenarien ist die Modellierung der Fahrfunktion. Aus verhaltensorientierter Perspektive gehört hierzu die Modellierung der Inputs, der Berechnungen und der Outputs der verschiedenen Teilfunktionen/Recheneinheiten. Dieser Schritt wird im Allgemeinen während späterer Phasen iterativ verfeinert. Als nächstes werden die möglichen Gefährdungen identifiziert, die aus Abweichungen von der intendierten Funktionalität oder aus der Auslösung von Aktionen im falschen Kontext herrühren. Zur Identifizierung wird ein schlüsselwortbasierter Ansatz auf Ebene des Fahrzeugverhaltens verwendet, der verschiedene Basisszenarien abdeckt. Die daraus resultierende Tabelle wird für einen zweiten schlüsselwortbasierten Ansatz genutzt, bei welchem die Ursachen innerhalb des Systems, die möglicherweise zu den vorher identifizierten Abweichungen geführt haben, beobachtet und in einer anderen Tabelle aufgezeichnet werden (siehe Abbildung 19).

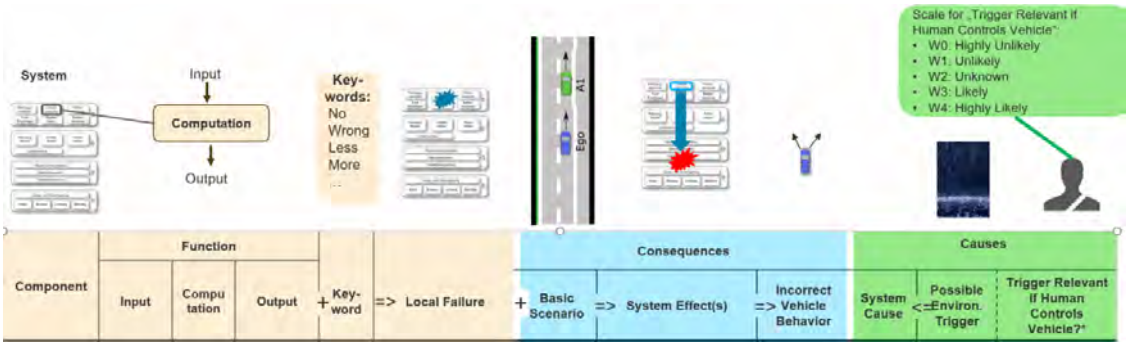


Abbildung 19 Identifizierung von Gefährdungen mit einem schlüsselwortbasierten Ansatz

Der nächste Schritt ist die Identifizierung möglicher Ursachen für gefährliches Verhalten (mit Fokus auf Umweltauslösern) mithilfe einer modifizierten Fehlerbaumanalyse. Hier wird den identifizierten Outputs jeder Funktion aus Schritt 1 gefolgt und es werden mögliche Ursachen für nicht intendierten Output identifiziert. Diese Ursachen werden wie folgt klassifiziert:

- Zufällige Hardwarefehler (abgedeckt durch ISO 26262 (International Organization for Standardization, 2009)): z.B. Hardwarefehler im Steuergerät für die Trajektorienberechnung
- Designfehler in HW oder SW (Abweichungen der Implementierung von der Spezifikation): z.B. Fehler im Algorithmus zur Trajektorienberechnung
- Spezifikationsfehler: z.B. Prognose der Trajektorien anderer Verkehrsteilnehmer ohne zugehöriges Dynamikmodell

- Propagierte Fehler (der Input, den die Komponente bekommt, ist bereits fehlerhaft): z.B. wurde im Vorfeld durch einen Planer ein ungeeignetes Manöver gewählt

Einerseits können bestimmte Umgebungsbedingungen notwendig sein, damit Fehler tatsächlich sichtbar oder relevant werden (z.B. kann die HAF-Funktion die Trajektorie eines anderen Verkehrsteilnehmers nur dann fehlprognostizieren, wenn ein anderer Verkehrsteilnehmer anwesend ist). Andererseits können diese Umgebungsbedingungen Ursache einer nicht intendierten Funktion der Komponente sein (z.B. kann ein kleines Metallobjekt für eine Fehlklassifizierung durch einen RADAR-Sensor ursächlich sein). Um diese Umgebungsbedingungen zu identifizieren und zu modellieren, wurde die Fehlerbaumanalyse um ein weiteres Logikgatter erweitert (eine Variation des Inhibit-Gatters), welches die Spezifikation von Umgebungsbedingungen ermöglicht, die für die Fehlerpropagation notwendig sind.

Im letzten Schritt werden die Umgebungsauslöser von gefährlichem Verhalten abgeleitet und in die benötigte Spezifikationssprache für Szenarien übersetzt. Automationsrisiken der Klasse 2 entsprechen Szenarien, in denen das Fahrverhalten der HAF-Funktion vom erwarteten Verhalten menschlicher Fahrer abweicht und in der Folge eine kritische Situation auslöst. Bei der systematischen Identifizierung dieser Szenarien wird angenommen, dass in diesen Situationen keine Fehlfunktion innerhalb der Fahrfunktion vorliegt. Der Fehler oder das Risiko ergibt sich also aus der Interaktion verschiedener Systeme miteinander, nicht aus lokalen Ursachen. Ein typischer Fall ist hier die Interaktion zwischen dem HAF-System und dem menschlichen Fahrer. Eine Risikoanalysemethode, die besonders gut für die Identifizierung von Risiken geeignet ist, die sich aus der Interaktion mehrerer komplexer Einzelsysteme ergeben, ist die Systemtheoretische Prozessanalyse (STPA) (Leveson, 2012). Um die STPA-Methode leichter anwenden zu können, wurde sie an das vorliegende Problem angepasst und die Analyse wurde für unser Anwendungsbeispiel durchgeführt. Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung der Herangehensweise gegeben.

Der erste Schritt ist die Definition der Grundlagen. Dies umfasst das Kontrollstrukturdiagramm inklusive der Kontrollaktionen, der Szenarien und der Erwartungen des menschlichen Fahrers in diesen Szenarien. Bei der Definition des Kontrollstrukturdiagramms wird der betrachtete Prozess und die während dieses Prozesses stattfindenden Kontrollaktionen beschrieben. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel besteht der betrachtete Prozess aus der HAF-Funktion, dem menschlichem Fahrer und ihrer Interaktion. Innerhalb dieses Prozesses kann die HAF-Funktion die folgenden taktischen Kontrollaktionen durchführen: 1) Geschwindigkeit und Spur halten, 2) Geschwindigkeit halten und Spur wechseln, 3) Geschwindigkeit ändern und Spur halten, 4) Geschwindigkeit ändern und Spur wechseln, 5) Spurwechsel abbrechen, 6) Notbremsung und 7) Nothalt. Um die Szenarien zu bestimmen, wird eine auf dem Sechs-Ebenen-Modell basierende Klassifizierung verwendet und die wichtigsten Szenarien werden auf Grundlage eines Expertenurteils ausgewählt, damit die Menge der Szenarien auf eine überschaubare Größe reduziert wird. Schließlich wird das vom menschlichen Fahrer erwartete Verhalten der HAF-Funktion in den identifizierten Szenarien bestimmt.

Im zweiten Schritt wird die eigentliche STPA-Methode angewandt. Dazu gehören die Identifizierung von unsicheren Kontrollaktionen (UKAs) und Gefährdungen sowie eine Ursachenanalyse. Bei der Identifizierung der UKAs wird der Einfluss ungeeigneter Kontrollaktionen untersucht, insbesondere im Hinblick darauf, was geschieht, wenn Kontrollaktionen

a) nicht bereitgestellt werden,

b) bereitgestellt werden,

c) zum falschen Zeitpunkt bereitgestellt werden, oder

d) zu früh abgebrochen oder zu lange angewandt werden.

Zum Beispiel wird eine andernfalls vernünftige Kontrollaktion zu einer unsicheren Kontrollaktion, wenn der menschliche Fahrer die Bereitstellung dieser Kontrollaktion in dieser Situation nicht erwartet. Dann werden im Rahmen der Gefährdungsidentifizierung die Folgen der UKAs in den zu analysierenden Szenarien systematisch analysiert. In diesem Schritt werden die Automationsrisiken der Klasse 2 identifiziert. Die abschließende Analyse der ursächlichen Faktoren liefert Informationen zu den Auslösern des identifizierten Risikos.

Für die Automationsrisiken der Klasse 3 wurden gemäß der Definition dieser Klasse die möglichen Probleme zwischen der Automation und dem Fahrer identifiziert (z.B. Mode Confusion oder Missbrauch). Diese resultieren jedoch nicht in Szenarien, sondern in Anforderungen an das HMI-Konzept.

Für die Automationsrisiken der Klassen 1 und 2 werden die resultierenden Umgebungsauslöser in eine JSON-Datei übersetzt und können in der PEGASUS-Datenbank verwendet werden, um potenziell kritische Kombinationen von Parameterbereichen zu markieren.

Definition logischer Szenarien auf Ebene 4

Um aus Felddaten konkrete Szenarien ableiten zu können, ist es notwendig, ein Framework für die Ableitung eines Szenarienkatalogs auszuarbeiten. Darin sollten alle relevanten Elemente des Szenarios im Hinblick auf Ebene 4 des 6-Ebenen-Modells gespeichert werden können. Da für die Gewährleistung der Sicherheit der Fokus auf sicherheitsrelevanten Situationen liegt, fokussieren sich die zugrundeliegenden Systematiken auf die Vermeidung von Kollisionen zwischen einem Ego-Fahrzeug und einem anderen Objekt. Für das Anwendungsbeispiel Autobahn-Chauffeur in PEGASUS gilt, dass das Objekt, mit welchem eine solche Kollision geschehen würde, typischerweise ein anderes Fahrzeug ist.

Dem Framework liegt die zentrale Annahme zugrunde, dass eine sicherheitsrelevante Situation dadurch gekennzeichnet ist, dass eine Reaktion durch das Ego-Fahrzeug zur Vermeidung einer Kollision erforderlich ist. Das andere Objekt wird als *herausforderndes Objekt* oder *Herausforderer* bezeichnet. Das herausfordernde Objekt muss nicht der Unfallverursacher sein, es ist jedoch das Objekt, mit welchem das Ego-Fahrzeug kollidieren würde, falls keine Aktion zur Vermeidung der Kollision durchgeführt würde. Von dieser Annahme ausgehend kann eine begrenzte Zahl von sicherheitsrelevanten logischen Szenarien definiert werden.

Ein erstes Kriterium zur Definition dieser logischen Szenarien ist der Bereich des Ego-Fahrzeugs, mit welchem das herausfordernde Objekt kollidieren würde. Es kann zwischen Front-, Heck- und Seitenaufprall unterschieden werden. Das zweite Kriterium ist die anfängliche Position des herausfordernden Objekts. Abhängig von der Aufprallfläche können unterschiedliche Anfangspositionen des Herausforderers im Hinblick darauf unterschieden werden, ob die Kontur des Herausforderers sich in Längsrichtung oder lateraler Richtung mit der Kontur des Ego-Fahrzeugs überschneidet. Für Frontaufpralle kann eine Position identifiziert werden, die sich lateral mit dem Ego-Fahrzeug überschneidet. Zweitens kann eine Position vor dem Ego-Fahrzeug identifiziert werden, die sich nicht mit dem Herausforderer überschneidet. Daher würde ein Frontaufprall aus dieser Anfangsposition eine zusätzliche laterale Bewegung des Herausforderers erfordern, verglichen mit einem aus einer Position mit lateraler Überschneidung kommenden Herausforderer. Eine dritte Option ist ein Herausforderer, der aus einer anfänglichen Position ohne laterale Überschneidung kommt und sich entweder in Längsrichtung mit dem Herausforderer überschneidet oder einen Übergang durch einen Zustand der längsgerichteten Überschneidung erfordert. Dazu ist es notwendig, dass der Herausforderer eine im Vergleich zum Ego-Fahrzeug höhere Anfangsgeschwindigkeit hat, dann aber in Kombination mit einer lateralen Bewegung auf eine niedrigere Längsgeschwindigkeit abbremst. Die verschiedenen Positionen und

der Pfad, der zu den unterschiedlichen Aufpralltypen führt, sind in Abbildung 20abgebildet.

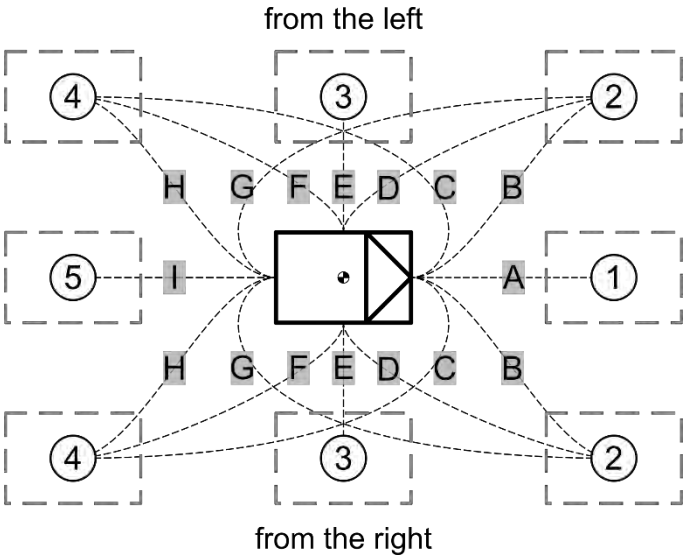


Abbildung 20 Resultierende Kollisionspfade definieren sicherheitsrelevante logische Szenarien

Positionen für Heckaufpralle können analog zu den Positionen für Frontaufpralle definiert werden. Für seitliche Aufpralle kann eine Position mit lateraler Überschneidung identifiziert werden. Des Weiteren wird zwischen Positionen unterschieden, die in Längsrichtung keine Überschneidung aufweisen oder sich vor oder hinter dem Ego-Fahrzeug befinden. Die Entscheidungen zur Ableitung der resultierenden Szenarien werden in Abbildung 21 dargestellt; die dazugehörigen Elemente, die zu einer Kollision führen, werden ebenfalls in Abbildung 21 dargestellt.

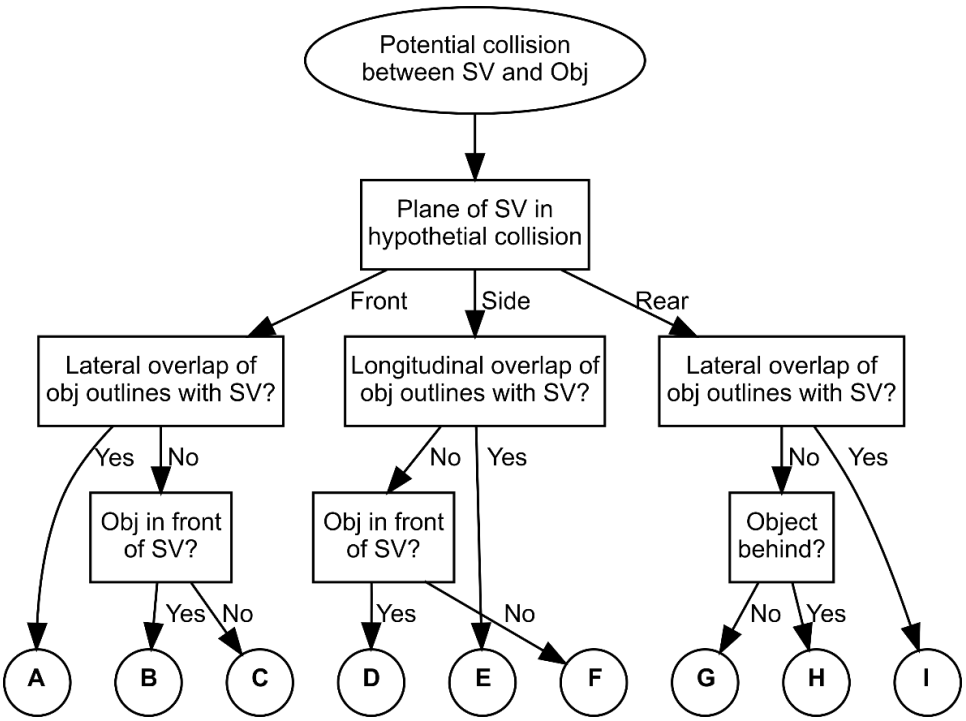


Abbildung 21 Notwendige Entscheidungen für die Identifizierung sicherheitsrelevanter logischer Szenarien

Es wurde eine Nomenklatur für die sicherheitsrelevanten logischen Szenarien gewählt, die in Tabelle 5 zu sehen ist.

Tabelle 5 Nomenklatur für sicherheitsrelevante logische Szenarien

Aufprallort	Ausgangsposition	Pfad	Ausdruck
Front	**1**	**A**	Langsamer Vorausfahrer (Herausforderer)
	2	**B**	Langsamer Einscherer (Herausforderer)
	4	**C**	Überholender Einscherer (Herausforderer)
Seite	**2**	**D**	Langsamer Abdränger (Herausforderer)
	3	**E**	Abdränger (Herausforderer)
	4	**F**	Überholender Abdränger (Herausforderer)
Heck	**2**	**G**	Zurückfallender Auffahrer (Herausforderer)
	4	**H**	Einscherender Auffahrer (Herausforderer)
	5	**I**	Auffahrer (Herausforderer)

Abgesehen vom Herausforderer, der sicherheitsrelevante logische Szenarien definiert, können auch andere Objekte in einem Szenario von Relevanz sein. Um nur Objekte zu repräsentieren, die für die sicherheitsrelevanten Szenarien relevant sind, wurden für die zusätzlich in einem Szenario enthaltenen Objekte verschiedene Rollen identifiziert. Diese zusätzlichen Objekte können es dem Ego-Fahrzeug entweder zusätzlich erschweren, die Situation auf sichere Weise zu bewältigen, oder spielen in der Ereignissequenz eines Szenarios eine wichtige Rolle, sodass das Ego-Fahrzeug auf eine entstehende Situation reagieren könnte, obwohl noch keine Kollision mit einem herausfordernden Objekt kurz bevorsteht.

Aktionsbeschränkungen

Die erste Gruppe von Objekten, die eine zusätzliche Herausforderung für das Ego-Fahrzeug bedeuten, sind *Aktionsbeschränkungen*. Diese Objekte begrenzen den Raum, der dem Ego-Fahrzeug für Manöver zur Kollisionsvermeidung zur Verfügung steht. Eine Aktionsbeschränkung allein würde keine Kollisionsvermeidungsaktion des Ego-Fahrzeugs erfordern, doch in Kombination mit einem Herausforderer kann ein inadäquates Ausweichmanöver zu einer Kollision mit der Aktionsbeschränkung führen. Zu Beginn können Aktionsbeschränkungen identifiziert werden, die durch ein einzelnes Objekt verkörpert werden. Dieses Objekt kann sich entweder vor, hinter oder neben dem Ego-Fahrzeug befinden. Im Vergleich mit der Ausgangsposition des herausfordernden Fahrzeugs wird in Tabelle 5 nicht zwischen Position 2, 3 und 4 unterschieden. Stattdessen werden die Positionen neben dem Objekt als kontinuierlicher Raum behandelt.

Es können weitere Aktionsbeschränkungen identifiziert werden, die durch mehrere Objekte verkörpert werden. Eine Konfiguration besteht in der vollständigen Blockade einer Seite des Ego-Fahrzeugs. Eine solche Blockade kann durch eine langsam fah-

rende Fahrzeugschlange entstehen, die dem Ego-Fahrzeug in der Praxis kein Ausweichmanöver in diese Richtung erlauben. Alternativ kann die Blockade der Seite eine Lücke aufweisen, die groß genug ist, dass das Ego-Fahrzeug sich dort hinein bewegen kann, wobei eine bestimmte Trajektorie in Längsrichtung erforderlich ist. Um die Zahl der Dimensionen jedes Szenarios so gering wie möglich zu halten, sollte es möglich sein, die Position und Größe dieser Lücke als Parameter des Szenarios zu beschreiben, statt für alle zur Existenz dieser Lücke beitragenden Fahrzeuge jeweils Trajektorien zu beschreiben.

Die beschriebene Aktionsbeschränkung kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Objekt vor Ego-Fahrzeug
- Objekt hinter Ego-Fahrzeug
- Objekt neben Ego-Fahrzeug
- Vollständige Blockade einer Seite des Ego-Fahrzeugs
- Blockade auf einer Seite des Ego-Fahrzeugs mit einer Lücke, die groß genug für ein Kollisionsvermeidungsmanöver ist

Dynamische Verdeckungen

Die zusätzlichen Objekte in einem Szenario, die es dem Ego-Fahrzeug erschweren, die Situation auf sichere Weise zu bewältigen, spielen noch eine weitere Rolle, nämlich als dynamische Verdeckungen. Ähnlich wie Aktionsbeschränkungen erfordert eine dynamische Verdeckung allein kein Ausweichmanöver des Ego-Fahrzeugs. Objekte werden als dynamische Verdeckungen dargestellt, wenn das Objekt von einem theoretischen Blickwinkel des Ego-Fahrzeugs aus die Sicht auf das herausfordernde Objekt verdeckt. Dies erlaubt die Speicherung von Szenarien, die oft als „Schablonen“ (Abbildung 22) bezeichnet werden: Ein dem Ego-Fahrzeug vorausfahrendes Fahrzeug führt einen Spurwechsel auf einen angrenzenden Fahrstreifen durch, weil ein weiter vorn fahrendes Fahrzeug abbremst. Dieses abbremsende Fahrzeug generiert dann das sicherheitsrelevante logische Szenario A für das Ego-Fahrzeug. Falls das verdeckende Objekt nicht vorhanden wäre, hätte das Ego-Fahrzeug das herausfordernde Objekt bereits zu einem früheren Zeitpunkt wahrnehmen können und hätte bereits ein Manöver zur Kollisionsvermeidung durchführen können.

Das Vorhandensein einer dynamischen Verdeckung hat nicht notwendigerweise zur Folge, dass das Ego-Fahrzeug das herausfordernde Objekt nicht wahrnimmt. Stattdessen beschreibt es das kinematische Verhalten des als Sichtbehinderung fungierenden Objekts. Abhängig von der Sensorkonfiguration kann es dem Ego-Fahrzeug nach wie vor möglich sein, den Herausforderer wahrzunehmen, obwohl dieser in einer ebenen Darstellung vollständig verdeckt ist. Zum Beispiel könnte ein Radarsensor den verdeckten Herausforderer durch Bodenreflektionen wahrnehmen. Bei der Verwirklichung der Szenarien in einer Simulation oder auf einem Prüfgelände wird die Rolle der dynamischen Verdeckung durch ein Fahrzeug gespielt, so dass je nach Fahrzeugtyp mögliche sensorische Vorteile für das Ego-Fahrzeug immer noch dargestellt werden können.

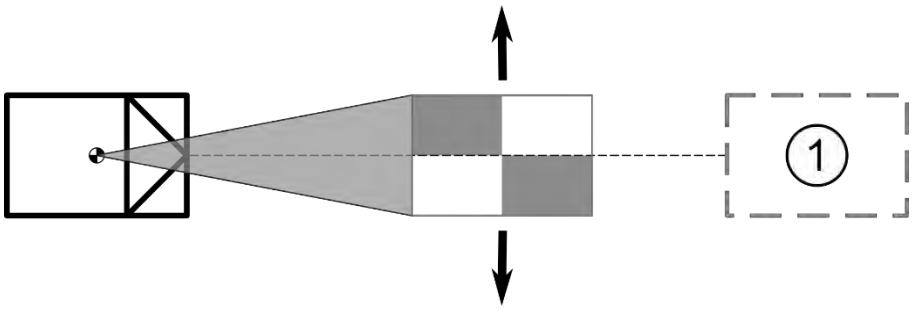


Abbildung 22 Beispiel für dynamische Verdeckung

Multiple Herausforderer

Es ist auch möglich, dass zwei Objekte eine Aktion zur Kollisionsvermeidung durch das Ego-Fahrzeug verlangen. Zum Beispiel könnte das Ego-Fahrzeug gleichzeitig von einem seitlichen Abdränger und von einem Auffahrer herausgefordert werden. Dennoch ist es unwahrscheinlich, dass die hypothetischen Kollisionen zum genau gleichen Zeitpunkt geschehen würden. Daher ist es notwendig, die zeitliche Relation zwischen den beiden Herausforderern zu speichern. Die Identifizierung von Szenarien, in denen multiple Herausfordererobjekte vorhanden sind, ist bei Fahrtdaten extrem selten, weshalb es noch nicht möglich ist, die zugrundeliegenden Mechanismen zu untersuchen. Die Anwendung der Metriken zur Identifizierung eines einzelnen Herausforderers auf multiple Objekte innerhalb eines eingeschränkten Zeitfensters wird innerhalb der Datenbankmechanik implementiert. Daher ist es möglich, Szenario-Kandidaten mit Beteiligung multipler Herausforderer zu speichern, die dann Gegenstand weiterer Analysen sein können.

Wirkketten

Abgesehen von Objekten, die es dem Ego-Fahrzeug erschweren, das Szenario sicher zu bewältigen, können bestimmte Objekte ein taktisches Verhalten des Ego-Fahrzeugs herbeiführen, welches zu einer früheren Reaktion auf das herausfordernde Objekt führen kann. Im Vergleich mit einem menschlichen Fahrer könnte das Ego-Fahrzeug weiter nach vorne sehen als nur bis zum nächsten Fahrzeug und dabei relevantes Verhalten wahrnehmen. Ein Beispiel ist ein zwei Fahrzeuge weiter vorn fahrendes Fahrzeug, das ein abruptes Bremsmanöver durchführt, welches das dem Ego-Fahrzeug direkt vorausfahrende Fahrzeug zu einem abrupten Bremsmanöver zwingt und daher aus der Perspektive des Ego-Fahrzeugs zum Herausforderer wird. Diese Wirkketten können in die logischen Szenarien integriert werden, indem man das herausfordernde Fahrzeug als ein Fahrzeug behandelt, welches ursprünglich selbst durch ein anderes Fahrzeug herausgefordert wurde, und die Systematiken der sicherheitsrelevanten logischen Szenarien anwendet.

(6) Vorverarbeitung / Rekonstruktion

In diesem Block werden alle relevanten Daten aus (2) konvertiert und in einem gemeinsamen Format rekonstruiert, welches in der Messwerte-Datenbank (7) gespeichert und verarbeitet werden kann.

Unfalldaten

Die Berechnung eines Effektivfelds für Fahrerassistenzsysteme (FAS) ist eine gängige Methode, einen positiven Nutzen dieser Systeme zu zeigen. Des Weiteren ist dieses Verfahren auch für hochautomatisierte Fahrfunktionen (HAF-Funktionen) wie den Autobahn-Chauffeur verwendbar.

Auf Grundlage der GIDAS-Daten und unter Verwendung der Beschreibung des Autobahn-Chauffeurs kann das Effektivfeld evaluiert werden. Dazu müssen für jede Einschränkung im Hinblick auf die Umgebung (z.B. Wetter), den umgebenden Verkehr (z.B. Verkehrsdichte), die Infrastruktur (z.B. Anzahl der Fahrstreifen) oder die Fahrzeugeigenschaften (z.B. Geschwindigkeit) die entsprechenden GIDAS-Variablen identifiziert und genutzt werden, um jene Unfälle zu extrahieren, die von der HAF-Funktion adressiert werden. Das Verhältnis von adressierten Unfällen und allen relevanten Unfällen gibt einen Hinweis auf den Nutzen des Systems.

Im Falle des Autobahn-Chauffeurs werden fünf wesentliche Filtervariablen/Kategorien identifiziert. Diese sind

- Geschwindigkeit (kleiner oder gleich 130 km/h)
- Intakte Fahrstreifenmarkierungen
- Keine Schlaglöcher
- Nicht auf Auffahrten
- Systembeschränkungen (hauptsächlich Wetterbedingungen)

Ein Venn-Diagramm zeigt die Abhängigkeiten dieser Filterkategorien auf (siehe Abbildung 23). Dieses Diagramm illustriert auf einfache Weise, wie der größte Nutzen einer Ausweitung der untersuchten Funktion erzielt werden kann. In diesem Fall kann der größte Nutzen erzielt werden, wenn der Autobahn-Chauffeur mit beschädigten Fahrstreifenmarkierungen umgehen könnte oder keine Markierungen bräuchte.

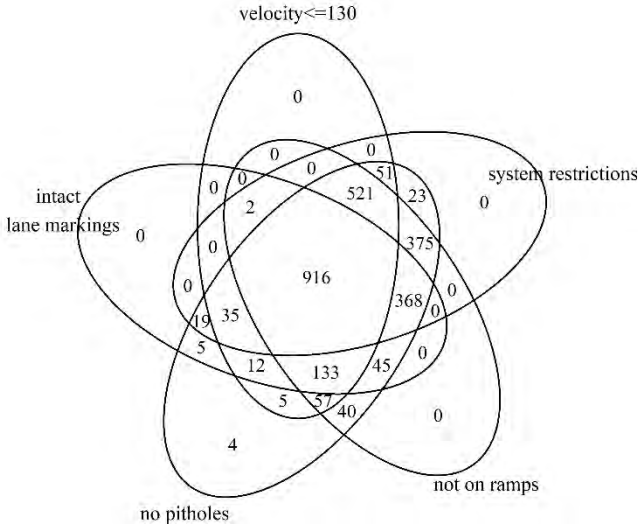


Abbildung 23 Venn-Diagramm der für das Effektivfeld des Autobahn-Chauffeurs genutzten Filter

Des Weiteren kann diese Untersuchung für verschiedene Schweregrade von Verletzungen durchgeführt werden. Die verwendete Verletzungsskala ISSx wurde durch (M. Junge, 2013) eingeführt und basiert auf der AIS. Das Ergebnis wird in Tabelle 6zusammengefasst.

Tabelle 6 Effektivfeld des Autobahn-Chauffeurs in den GIDAS-Daten

	Alle	Auf Autobahnen		Durch den Autobahn-Chauffeur adressiert		
		#	[%]	#	[%] Autobahn	[%] Alle
Autos	33.024	2.611	8 %	916	35 %	3 %
Personen	47.994	4.516	9 %	1.557	35 %	3 %
Leicht verletzt (ISSx 1+)	3.671	555	15 %	184	33 %	5 %
Schwer verletzt (ISSx 2,5+)	1.116	188	17 %	52	28 %	5 %
Polytrauma (ISSx 5+)	693	131	19 %	37	28 %	5 %
Todesfälle	362	79	22 %	21	27 %	6 %

Nach der Indetnifikation der relevanten Kollisionen in GIDAS müssen die entsprechenden PCM-Daten in das PEGASUS-Messdatenformat konvertiert werden. Der grundlegende Unterschied zwischen PCM und dem PEGASUS-Format liegt darin, dass PCM alles in einem globalen Koordinatensystem beschreibt, während das PEGASUS-Format ein auf das Fahrzeug zentriertes Koordinatensystem nutzt. Um die Kompatibilität der Daten mit dem FOT-Format sicherzustellen, müssen die PCM-Daten konvertiert werden, indem sie in einer Simulationsumgebung simuliert werden. Dabei werden die PCM-Daten zur Replikation der Situation und Aufzeichnung der Daten aus dem Blickwinkel des beobachteten Teilnehmers genutzt. Dies wird in der Simulationsumgebung rateEFFECT durch eine ideale Sensoreinstellung erreicht. Alle relevanten Autobahn-Chauffeur-Szenarien werden auf diese Weise konvertiert. Danach werden der Datei einige GIDAS-Daten hinzugefügt, z.B. Wetter-/Lichtverhältnisse. Zusätzlich werden die Risikofaktoren aus den GIDAS-Daten abgeleitet und ebenfalls im Code abgebildet. Zu guter Letzt werden die Ergebnisse dieses Verfahrens im gemeinsamen Messdatenformat in die PEGASUS-Datenbank hochgeladen.

Simulatordaten

Die Simulatordaten wurden im Rahmen von Fahrsimulatorstudien erfasst, z.B. durch wiederholte Produktion kritischer Szenarien mit variierenden Reizintensitäten. Die variablen Reize wurden durch unterschiedliche Kritikalitäten operationalisiert, z.B. die Zeit bis zum Aufprall (time to collision, TTC) auf einen vorausfahrenden Einscherer. Im Rahmen der ersten experimentellen Studie wurden die Teilnehmer z.B. gebeten, mit einer konstanten Geschwindigkeit von 130 km/h auf der linken Spur (Ego-Spur) einer geraden, zweispurigen Autobahn zu fahren. Auf der rechten Spur fuhr eine aus Autos und Lastwagen bestehende Fahrzeugkolonne mit einer Betriebsgeschwindigkeit von 80 km/h und unter Einhaltung eines Abstands zwischen 10 und 50 Metern. Die Teilnehmer erlebten ein kritisches Szenario, in dem ein Auto (Zielfahrzeug) abrupt mit einer lateralen Geschwindigkeit von 2,31 m/s von der rechten Spur in die Ego-Spur einscherte, als die angestrebte Zeit zum Aufprall (angestrebte TTC) erfüllt war. 52 Freiwillige nahmen an der Studie teil. Jeder von ihnen fuhr in 60 Szenarien, wobei jede Stufe der angestrebten TTC (0,5 s, 0,7 s, 0,9 s, 1,1 s, 1,3 s und 1,5 s) des kritischen Szenarios 10 Mal wiederholt wurde. Insgesamt wurden 3120 Versuche zu Einscher-Szenarien gesammelt. Die Simulatordaten wurden dann in das PEGASUS-Messdatenformat überführt. Der grundlegende Unterschied zwischen den Simulatordaten und dem PEGASUS-Format lag darin, dass die Umgebung der Simulatordaten alles in einem globalen Koordinatensystem beschreibt, während das PEGASUS-Format ein auf das Fahrzeug zentriertes Koordinatensystem nutzt. Außerdem wurden einige berechnete Werte, z.B. die Fahrzeugposition, lateraler Abstand zur Fahrbahnmarkierung etc. zum Datensatz hinzugefügt. Die Daten wurden dann von .csv in .mat konvertiert und in die PEGASUS-Datenbank hochgeladen.

Feldversuche (FOT)

Das PEGASUS-Projekt zielte darauf ab, verfügbare, nicht streng vertrauliche Daten zur Entwicklung der Methodologie zu nutzen. Aus diesem Grund wurden Messdaten aus früheren NDS- oder FOT-Studien ausgewählt, wie etwa die euroFOT-Daten. Das europäische FP7-Forschungsprojekt euroFot lief von 2008 bis 2012 und war ein großangelegter Feldversuch für FAS-Funktionen, an dem bis zu 1.000 Fahrzeuge beteiligt waren. Insgesamt wurden in PEGASUS euroFOT-Daten aus über 1.000.000 gefahrenen Kilometern analysiert. Die größte Herausforderung, vor welche man bei der Analyse dieser euroFOT-Daten aus der Zeit vor hochautomatisierten Fahrsystemen steht, ist die Unvollständigkeit der Beobachtung, d.h. die Sensoren der Fahrzeuge deckten nicht die gesamte Umgebung ab. Daher sind die Resultate sorgfältig analysiert und in

vollem Bewusstsein der Unzulänglichkeiten der Messdaten in die PEGASUS-Datenbank integriert worden.

Im Jahr 2016 fanden Studien zur euroFOT-Stichprobe zur menschlichen Fahrleistung in kritischen Situationen statt, hauptsächlich im Zusammenhang mit Einschermanövern, Fahrstreifenwechseln vom Ego-Fahrstreifen auf den angrenzenden Fahrstreifen sowie Situationen auf Autobahnauf- und abfahrten. Zudem sollte eine Abfrage der im Datensatz enthaltenen lateralen Beschleunigungsspitzenwerte, die auf Ausweichmanöver hindeuten, bisher noch nicht kategorisierte kritische Situationen aufspüren. Diese relevanten, aber unbekannten Ereignisse wurden als kritisch angenommen, da sie den Fahrer aus irgendeinem Grund zum Ausweichen gezwungen hatten. Die sorgfältige Einzelfallbetrachtung dieser Situationen ergab jedoch keine solchen unvorhergesehenen Befunde.

Ferner wurden die extrahierten, gekennzeichneten Daten genutzt, um im Projekt darüber zu diskutieren, wie die zukünftige PEGASUS-Datenbank Rohdaten verarbeiten und Parameterverteilungen bereitstellen sollte. Beispielsweise könnten Verteilungen von Verkehrsmerkmalen, wie die Fahrzeugfolgezeit zum Zeitpunkt eines Einschermanövers, als Grundlage der Testfallauswahl dienen.

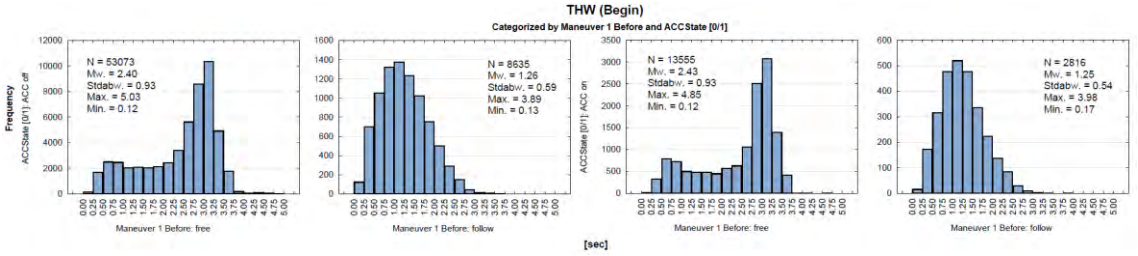


Abbildung 24 Verteilung der Fahrzeugfolgezeit (time headway, THW) vor einem Einschermanöver eines fremden Fahrzeugs. Kategorisiert nach ACC an/aus, Freifahrt oder Folgefahrt.

In PEGASUS wurde insbesondere Inhalte zu den folgenden Themen adressiert:

1) Eintrittshäufigkeit einzelner, möglicherweise kritischer Verkehrssituationen auf Grundlage der FOT-Datenanalyse
2) Detaillierte Beschreibung der spezifischen Situation und ihrer Komponenten auf Grundlage der FOT-Datenanalyse
3) Bewertung des menschlichen Leistungsvermögens in Einscherszenarien auf Grundlage der FOT-Datenanalyse
4) Entwicklung einer wahrscheinlichkeitsbasierten Kritikalitätsmetrik: Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit eines Folgefahrtmanövers auf Grundlage der Trajektorienvorhersage

Motiviert durch Beispielfragen wie "Wie oft tritt eine bestimmte Situation ein?" ist es notwendig, die Eintrittshäufigkeit dieser Situationen zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden die euroFOT-Daten analysiert. Die Eintrittshäufigkeit wurde insbesondere für die folgenden Szenarien untersucht:

- Nutzungsverhalten auf Auffahrten
- Einschermanöver
- Annäherung an Stau und dichtes Auffahren im Stau
- Ausweichmanöver

Im Zuge dessen wurden sowohl univariate Verteilungen als auch multivariate Verteilungen berechnet und dem PEGASUS-Konsortium zur Verfügung gestellt. So wurden zum Beispiel beim Einschermanöver TTC-Werte, Längsabstände, Geschwindigkeiten

des Ego- und des Zielfahrzeugs sowie ihre Korrelationen zueinander berechnet. Auch diese Werte wurden in Abhängigkeit voneinander berechnet.

Annäherung an Stau und dichtes Auffahren im Stau

Es wird zwischen folgenden Stautypen unterschieden:

- Plötzliche Stauentstehung
- allmähliche Stauentstehung
- Stau auf anderer Spur
- Stau auf allen Spuren
- Stau auf linker Spur
- Stau nur auf Ego-Spur
- Stau auf rechter Spur

Es wurde insbesondere der Einfluss einzelner Stautypen auf das Fahrerverhalten bei der Realisierung der Stauentstehung untersucht. Genauer gesagt wurde die Art und die Intensität des Bremsverhaltens untersucht. Dabei wurde zwischen plötzlicher Stauentstehung, allmählicher Stauentstehung, Stau auf anderer Spur und Stau auf Ego-Spur unterschieden. Beispielergebnisse sind in Abbildung zu sehen.

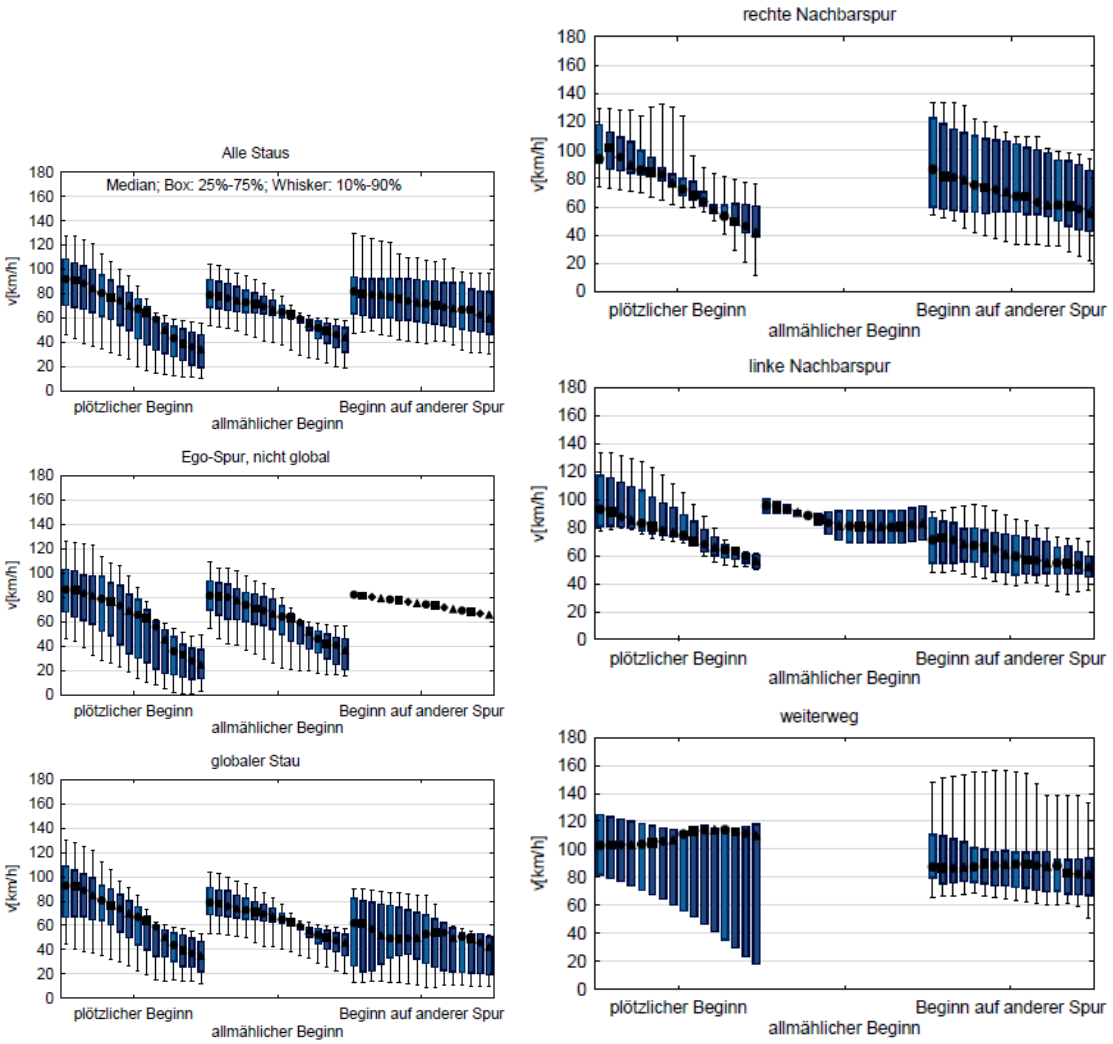


Abbildung 3: Bremsverhalten von Fahrern zu Beginn eines Staus. Unterschieden nach verschiedenen Stautypen

Mit der Untersuchung der Fahrerreaktion bei Einschermanövern war es möglich, eine Untergrenze für TTC-Werte zu definieren, die für den Fahrer beherrschbar zu sein scheinen. Diese hat als anfängliche Inputvariable für Simulatorstudien gedient. In der FOT-Datenanalyse konnte gezeigt werden, dass sowohl die Nutzung des Gaspedals als auch des Bremspedals eine signifikante Abhängigkeit von TTC aufweist, was der Grund dafür ist, dass TTC als Maß der Kritikalität der Fahrerreaktion validiert werden kann. Abbildung 25 zeigt Abhängigkeiten zwischen der Reaktionszeit des Fahrers, dem Gaspedal, dem Bremspedal und TTC. Eine Abhängigkeit der Reaktionszeit der stärksten Bremsung von TTC ist bis zu einem TTC-Wert von 8 zu sehen (nächste Abbildung links) Es ist eine signifikante Abhängigkeit zwischen TTC und Amplitude der Bremsung zu beobachten (nächste Abbildung Mitte). Außerdem ist eine signifikant längere Bremsdauer bei niedrigen TTC-Werten zu sehen (nächste Abbildung rechts).

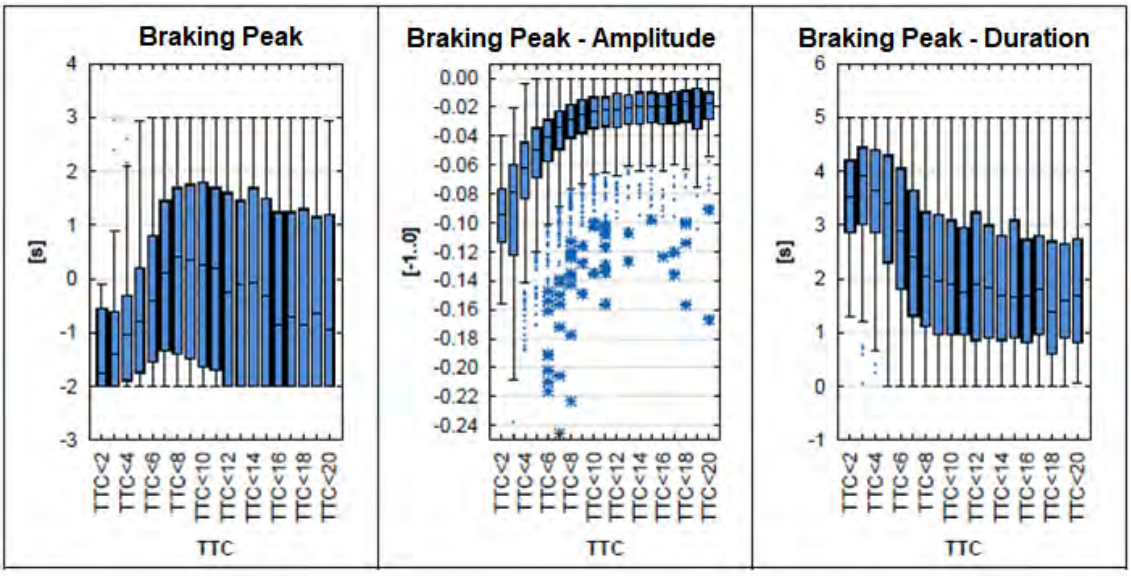


Abbildung 25 Verteilung der Reaktionszeit, Amplitude und Dauer der stärksten Bremsung

Im Rahmen der PEGASUS-Unfallforschung wurde eine Metrik für die Bewertung der Folgefahrt-Kollisionswahrscheinlichkeit durch Trajektorienvorhersage entworfen, implementiert und getestet. Die Herangehensweise war die folgende: Unter Anwendung von Stichprobenverfahren (Monte-Carlo-Simulation, Latin Hypercube und gewichtete Gleichverteilung) wurden Folgefahrtmanöver ausgewählt und mögliche Trajektorien berechnet. Die Trajektorienberechnung basiert auf der Variation von longitudinalen dynamischen Parametern (Abstand, Geschwindigkeit, Beschleunigung). Die Trajektorien wurden während eines festgelegten Zeitraums beobachtet. Bestimmte Trajektorien können in Unfallsituationen mit dem vorausfahrenden Auto münden. Die Simulation ergibt eine kontinuierliche probabilistische Größe, die zu jedem Zeitpunkt während einer Fahrt die aktuelle Kritikalität anzeigt.

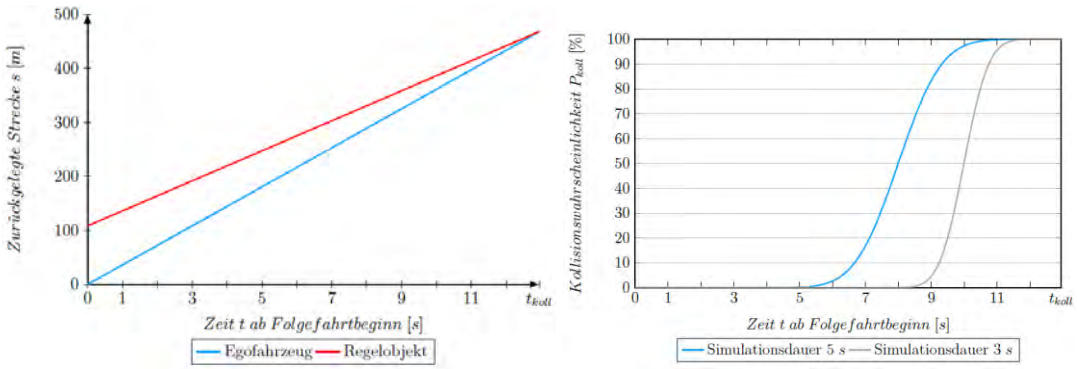


Abbildung 26 Beispieltrajektorien von Ego- und vorausfahrendem Fahrzeug (links) und Unfallwahrscheinlichkeit (rechts)

Die Evaluation (Vergleich von Delta v und TTC) zeigt eine signifikante Korrelation zwischen den unterschiedlichen Metriken auf, wie in Abbildung zu sehen ist.

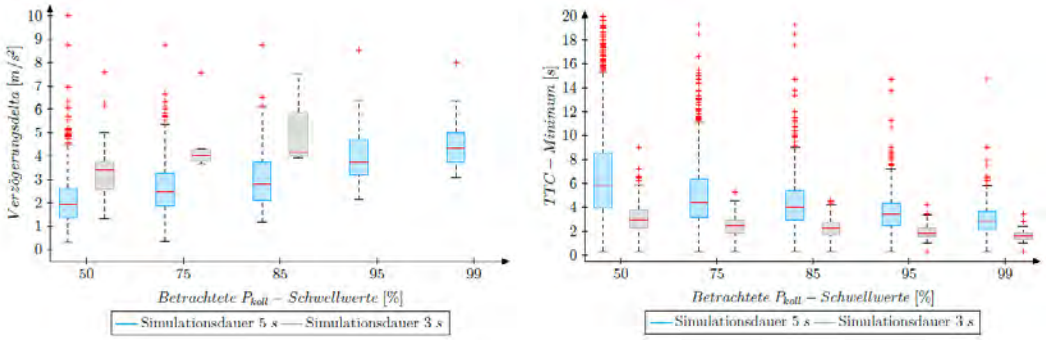


Abbildung 6: Vergleich der kontinuierlichen Kritikalitätsmetrik mit TTC und Delta v.

Output der FOT-Datenanalyse:

Schließlich sind alle identifizierten relevanten Szenarien innerhalb der euroFOT-Daten in das Eingabeformat der PEGASUS-Datenbank konvertiert worden (hdf5-Dateien) und in die PEGASUS-Datenbank hochgeladen worden. Innerhalb der Datenbank werden die Datensätze zunächst im Hinblick auf Beschränkungen und Unzulänglichkeiten dieser Daten analysiert.

(6) Prozessvorgaben + Metriken für die HAF-Bewertung

Generell ist ein automatisiertes Fahrzeug für verschiedene Fokusgruppen ein Risiko. Die ersten beiden Gruppen sind die Nutzer des HAF-Fahrzeugs und die potenziell involvierten Unfallbeteiligten, was jeder andere Verkehrsteilnehmer sein kann (Nicht-Nutzer). Wie bereits besprochen wurde, ergeben sich die unterschiedlichen Sichtweisen darauf, welches Risiko akzeptabel ist, aus dem jeweiligen Nutzen, den die Gruppen daraus ziehen. Die dritte Gruppe ist die Gesellschaft. Anders als für die ersten beiden Gruppen ist das Schicksal einer Einzelperson für die Gesellschaft nicht relevant, die Gesamtunfallzahl jedoch sehr wohl. Im Folgenden nur das Auftreten tödlicher Unfälle (Index d) diskutiert, so dass anstelle des Risikos quantitative Anforderungen an die Eintrittshäufigkeit oder Frequenz tödlicher Unfälle nennen können.

Quantitative Anforderungen für unterschiedliche Nutzungstypen werden in Abbildung 27 genannt. Es wird gefolgert, dass das akzeptable individuelle Sterberisiko pro Person und Jahr f_{inv} bei unfreiwilliger Exposition 10^{-6} k_d/a beträgt. Bei beruflicher Exposition (f_{prof}) beträgt es 10^{-5} k_d/a und bei freiwilliger Exposition ist das Risiko theoretisch unbegrenzt, mit typischen

Akzeptanzraten f_{vol} von bis zu 10^{-2} k_d/a. Generell variiert das akzeptable Risiko in Abhängigkeit vom Nutzen für den Nutzer oder die Fokusgruppe. Die meisten dieser Überlegungen stammen aus den in den 70ern und 80ern über die Sicherheit von Atomkraftwerken geführten Diskussionen. Generell sind die Annahmen heute nach wie vor valide, sie sollten jedoch an das heutige Sicherheitsniveau angepasst werden. Ein Faktor von einem Viertel wird an dieser Stelle vorgeschlagen, ähnlich der Entwicklung der MEM von den 70ern bis heute. (Eine Reduzierung mittels einer Änderung der Unfallquote wäre ein anderer Ansatz mit ähnlichem Ergebnis.) Im Folgenden wird das heute im Vergleich zu den oben genannten Zahlen niedrigere Risiko durch seinen Index gekennzeichnet, welcher Jahr und Land der zugrundeliegenden Statistik nennt.

Nutzer

Das Sterberisiko für Nutzer wird als äquivalent zum Risiko eines tödlichen Unfalls mit einem HAF-Fahrzeug angenommen (unter Vernachlässigung der Möglichkeit eines höheren Schadens mit mehr als einem Nutzer gleichzeitig). Wie in Abbildung 27 dargestellt wird, ist der Typ der Exposition für die Risikoakzeptanz relevant. In den meisten Anwendungsfällen werden HAF-Funktionen freiwillig genutzt; sie müssen aktiv gekauft und aktiviert werden. Berufliche Nutzung ist ebenfalls plausible, dieser Nutzungstyp wird jedoch während der ersten Einführungsphase nicht erwartet. Unfreiwillige Nutzung wird bei typischen Anwendungsbeispielen ausgeschlossen. Diese Überlegungen legen nahe, der Risikoakzeptanzquote $f_{prof\ 2016,\ GER}$ zu folgen, welche gleich $1{,}4 \cdot 10^{-9}$ k_d/km ist. Ähnliche Quoten liegen auch in den USA vor ($2{,}5 \cdot 10^{-9}$ k_d/km) (U.S. Department of Transportation Federal). Für andere Länder sind Daten über die gefahrene Distanz auf unterschiedlichen Straßentypen nicht immer verfügbar. Die Unfallquote für die kombinierte Fahrdistanz auf allen Straßentypen liegt in den meisten entwickelten Ländern in einer ähnlichen Größenordnung (Oguchi, 2016).

Die Substitution des herkömmlichen Fahrens legt ebenfalls nahe, das heutige Fahrrisiko mit der vorgeschlagenen Rate von f_{prof} zu vergleichen. Im Folgenden werden beide Aspekte untersucht und verglichen. Für das heutige Fahrrisiko wird das Fahren auf der deutschen Autobahn als Referenz herangezogen. Dies bietet mehrere Vorteile. Erstens ist das Fahren auf zugangsbeschränkten Autobahnen eine der sichersten, wenn nicht gar die sicherste Weise der Fortbewegung mit dem Auto, vor allem, wenn die Unfallquote pro Fahrkilometer als Referenz gewählt wird. Zweitens ist es wahrscheinlich, dass das erste HAF auf einer zugangsbeschränkten Autobahn fahren wird. Drittens sind Autobahn-Unfalldaten gut dokumentiert. Auch unbedeutende Unfälle werden wegen der Verkehrsbehinderung oftmals durch die Polizei untersucht und beeinträchtigen damit die gemessene Verkehrsdichte im Verhältnis zur gefahrenen Strecke. Unter Annahme einer durchschnittlichen Fahrtstrecke $\bar{d}$ kann die zeitbasierte Häufigkeit (Index t) auf eine distanzbasierte Häufigkeit (Index s) übertragen werden und umgekehrt. In diesem Beispiel werden 4000 km/a als durchschnittliche Fahrtstrecke gemäß VDA (siehe Fußnote 4) sowie eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 100 km/h angenommen.

In der folgenden Gleichung 1 werden das GAMAB-Prinzip und das MEM-Prinzip kombiniert. Dies wird als die Obergrenze für die tolerierbare Sterberate betrachtet, da eine neue Technologie eingeführt wird, die neues Risiko mit sich bringt. Ein zusätzliches Risiko ist akzeptabel, da der Nutzer einen persönlichen Nutzen aus dieser neuen Technologie zieht. Beachten Sie, dass wir in diesem Abschnitt nur das Risiko für den Nutzer betrachten. Dies ist keineswegs auf Nicht-Nutzer oder die Gesellschaft übertragbar, wie in den folgenden Abschnitten besprochen werden wird.

$$k_{d,\text{User}} \leq k_{\text{GAMAB}} + k_{\text{MEM/20}}$$
$$\Longrightarrow f_{\text{t,d,User}} \leq f_{\text{s,d,gamab}} \cdot \bar{d} + f_{\text{t,MEM/20}}$$
$$\Rightarrow f_{\text{s,d,User}} \leq f_{\text{s,d,gamab}} + f_{\text{t,MEM/20}}/\bar{d} \qquad (1)$$
$$f_{\text{s,d,User,2016,GER}} \leq 2.15 \cdot 10^{-9} \frac{\text{k}_\text{d}}{\text{km}};\ f_{\text{t,d,User,2016,GER}} = 8.6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{k}_\text{d}}{\text{a}}$$

Interessanterweise entspricht die Größenordnung gemäß Gleichung 1 der akzeptierten Häufigkeit bei beruflicher Exposition. Dies stützt die Hypothese, dass beide Schätzungen akzeptable Werte für Nutzer von automatisierten Fahrzeugen ergeben. Ein höheres Risiko könnte durchaus vom Nutzer akzeptiert werden (ähnlich wie bei Motorrädern oder Extremsport), dieser sollte sich allerdings dieses potenziell gesteigerten Risikos bewusst sein.

Nichtnutzer

Für alle anderen Verkehrsteilnehmer bringt HAF keinen persönlichen Nutzen (neben dem reduzierten Gesamtrisiko für alle Verkehrsteilnehmer, davon ausgehend, dass HAF generell sicherer ist als der durchschnittliche Fahrer). Nicht-Nutzer könnten jedoch einen niedrigeren Akzeptanz-Schwellenwert aufweisen, da sie der neuen Technologie skeptisch gegenüberstehen oder weil ihnen sogar (subjektive) Nachteile daraus entstehen, z.B. durch langsame Fahrzeuge auf der Straße. Das Risiko neuer Unfalltypen ist außerordentlich kritisch, da Nicht-Nutzer HAF für diese Unfälle verantwortlich machen würden, trotz einer potenziellen Senkung der Gesamtunfallmenge.

Neue Risiken könnten beispielsweise durch Leistungsbegrenzungen (gemäß ISO/PAS 2144), systematische Softwareausfälle oder Cyber-Attacken verursacht werden. Das gesamte neue Risiko, das die Technologie für einen einzelnen Nicht-Nutzer mit sich bringt, sollte unter $f_{\text{inv,2016,GER}}$ gleich $2{,}5 \cdot 10^{-7}\ \text{k}_\text{d}/\text{a}$ liegen (= ¼ des Werts für unfreiwillige Exposition). Wie kann also das individuelle Risiko für einen Nicht-Nutzer berechnet werden? Solange es nicht viele HAF-Fahrzeuge auf dem Markt gibt, ist die Exposition sehr niedrig, und die Wahrscheinlichkeit, dass ein einzelner Verkehrsteilnehmer an einem HAF-Unfall beteiligt ist, ist niedrig. Das Risiko wird also mit μ multipliziert. Das Risiko für Nicht-Nutzer wird durch die Exposition gegenüber mit HAF-Funktionen ausgestatteten Fahrzeugen abgeschwächt.

$$f_{\text{t,s,new}} \cdot \mu \leq f_{\text{inv,2016,GER}} = 0.25 \cdot 10^{-6} \frac{\text{k}_\text{d}}{\text{a}}$$
$$\Leftrightarrow f_{\text{d,s,new}} \leq 6.25 \cdot 10^{-11} \frac{\text{k}_\text{d}}{\text{km}} \cdot \frac{1}{\mu} \qquad (2)$$

Gemäß Gleichung 2 sinkt das akzeptierte Risiko für ein einzelnes HAF-Fahrzeug mit zunehmender Anzahl von HAF-Fahrzeugen. Dies ist intuitiv einleuchtend, da die Exposition sich mit der Anzahl potenzieller Einzelgefahren vervielfacht. Der Vergleich des Risikoniveaus mit der Gleichung 1 ergibt eine Anzahl von $1.625 \cdot 10^6$ HAF-Fahrzeugen in Deutschland, bis zu welcher die Risikoakzeptanz der anderen Verkehrsteilnehmer dominant wird. Hierbei wird absichtlich vernachlässigt, dass der Nicht-Nutzer auch Nutzen daraus zieht, wenn das System sicherer ist als der menschliche Fahrer, den es ersetzt. Dies wird durch Nicht-Nutzer nur dann anerkannt, wenn es einen unleugbaren Unterschied in der Unfallstatistik gibt. Andernfalls bleibt der (subjektive) Nachteil der neuen Technologie dominant.

Gesellschaft

Für die Gesellschaft sind Einzelschicksale weniger wichtig. Nutzen und Kosten von HAF werden an der Gesamtzahl der Unfälle gemessen sowie daran, ob diese sich mit der Zeit reduziert. Generell kann in Deutschland (Bundesamt, 2017) bei der Unfallquote im Laufe der Jahre ein rückläufiger Trend beobachtet werden, ebenso wie in den USA (U.S. Department of Transportation NHTSA). Erkennbar ist, dass dieser Trend sich in den letzten 5 Jahren für Unfälle mit Verletzungen abgeschwächt hat und sogar ein kleiner (jedoch insignifikanten) Anstieg während dieses Zeitraums zu verzeichnen war. Für tödliche Unfälle ist dieser Trend einer langsamer abnehmenden Quote ebenfalls beobachtbar, jedoch weniger signifikant. Man könnte vermuten, dass es mit den gegenwärtigen Straßennetzen, der Verkehrsdichte und dem Stand der Fahrzeugtechnik eine natürliche Begrenzung gibt.

Bei der Einführung von HAF wird es immer noch ein Risiko größer Null für schwere Unfälle geben. Daher ist es wahrscheinlich, dass HAF an diesen schweren oder sogar tödlichen Unfällen beteiligt sein werden. Was sind also die gesellschaftlichen Anforderungen, wenn einzelne Unfälle die Gesamtzahl nicht signifikant beeinflussen? Was ist die Obergrenze für eine Gesamtunfallquote, die von der Gesellschaft akzeptiert wird?

Das übergeordnete Ziel ist die Reduzierung der Unfallzahlen im Laufe der Zeit durch die Einführung neuer Technologie. Wenn man der Argumentation von (Wachenfeld W. , Dissertation, 2017) und (Kalra & Groves, 2017) folgt, sollte ein gewisses Risiko erlaubt werden, um HAF auf den Markt zu bringen und weitere Erkenntnisse zu gewinnen. Zugleich ist es für die Gesellschaft als Ganzes nicht akzeptabel, wenn das Risiko auf spürbare Weise erhöht wird. Ist die Technologie jedoch erst einmal auf dem Markt, kann allerdings nicht überprüft werden, wie sich die Unfallzahlen ohne diese entwickelt hätten. Im letzten Jahrzehnt hat sich der Rückgang von tödlichen Unfällen und Unfällen mit Verletzungsfolgen abgeschwächt. Zugleich ist die jährliche Fahrleistung gestiegen. Daher scheint es gerechtfertigt, aktuelle Zahlen als Referenz heranzuziehen. Bei Verwendung der Unfallquote für tödliche Unfälle $f_{\mathrm{s,d}}$ ist eine exponentielle Regression besser geeignet als eine lineare Regression. Interessanterweise ist das auch für Unfälle in der Luftfahrt der Fall (vgl. Fußnote 5). Die Standardabweichung für die exponentielle Regression für alle Jahre seit 2010 ergibt:

$$\sigma_{\mathrm{7y,exp}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\mathrm{year}}} \sum_{i=2010}^{2016} \left(f_{\mathrm{s,d,i}} - f_{\mathrm{7year,exp}}(i) \right)^2} = 9.4 \cdot 10^{-11} \frac{\mathrm{k_d}}{\mathrm{km}} \qquad 3$$

Die Multiplikation der Standardabweichung mit der durchschnittlichen Fahrleistung 2016 ergibt 23 tödliche Unfälle pro Jahr. Hier ist darauf hinzuweisen, dass der Regressionstyp und die Anzahl der Jahre das Ergebnis beeinflussen. Es kann auch die doppelte oder dreifache Standardabweichung als Maßstab gewählt werden. Die Ergebnisse liegen dann jedoch in einer ähnlichen Größenordnung. Im Folgenden wird das Ergebnis der Gleichung 3 verwendet.

Die gesellschaftliche Anforderung sollte sein, dass das Risiko von HAF signifikant niedriger liegt als der beschriebene exponentielle Trend, der in den jüngsten Daten beobachtet wird. HAF sollten also mindestens um eine Standardabweichung $\sigma_{7y,exp}$ besser sein als die vorhergesagte Leistungsfähigkeit des konventionellen Fahrens. Die Gesellschaft sollte HAF jedoch Zeit einräumen, um diesen hohen Sicherheitsreferenzwert zu erreichen. Ähnlich wie beim Luftverkehr ist die Überwachung der Leistung notwendig, um Verbesserungen der Funktionen, der Infrastruktur und der Nutzererfahrung zu ermöglichen. In der folgenden Formel wird vorgeschlagen, zu Beginn der Einführung ein zusätzliches Risiko in Höhe einer Standardabweichung zu erlauben und zu fordern, dass das Risiko bei Erreichen einer vollen Marktdurchdringung um drei Standardabweichungen niedriger sein muss als der extrapolierte Wert. Daher hängt

das akzeptable Risiko nicht nur von der Entwicklung des Risikos im konventionellen Straßenverkehr im Laufe der Jahre ab, sondern auch von der Marktdurchdringung μ von HAF.

$$f_{\mathrm{d,acc,soc}}(t)\cdot\mu + f_{\mathrm{7y,exp}}(t)\cdot\big(1-\mu(t)\big) \leq \big(f_{\mathrm{7y,exp}}(t)+\sigma_{\mathrm{7y,exp}}\big)\cdot\big(1-\mu(t)\big) + \big(f_{\mathrm{7y,exp}}(t)+3\cdot\sigma_{\mathrm{7y,exp}}\big)\cdot\mu(t) \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow f_{\mathrm{d,acc,soc}}(t) \leq f_{\mathrm{7y,exp}}(t) + \sigma_{\mathrm{7y,exp}}\frac{1-\mu(t)}{\mu(t)} - 3\cdot\sigma_{\mathrm{7y,exp}}$$

Im Folgenden wird eine Marktdurchdringung μ angenommen, die sich ähnlich entwickelt wie jene anderer Fahrfunktionen, wie etwa die elektronische Stabilitätskontrolle (vgl. (*5*)). Es wird angenommen, dass eine vollständige Marktdurchdringung nach 30 Jahren erreicht wird. Sie wird in Gleichung 4 als Sinusfunktion $(1+\sin\pi\cdot t/T)/2;\ 0\leq t\leq T,$ beschrieben, es sind jedoch auch andere Parameter zeitabhängig, da erwartet wird, dass die tatsächliche Sicherheit des Straßenverkehrs sich mit der Zeit auch ohne HAF ändert.

Zusammenfassung der Sicherheitsanforderungen

In den vorhergehenden Abschnitten wurden die Sicherheitsanforderungen drei unterschiedlicher Interessengruppen abgeleitet. Für die Gesellschaft hängt das erforderliche Risiko vom Marktanteil der HAF ab. Die Verfasser schlagen vor, einen Anstieg des Gesamtrisikos um eine Standardabweichung der vorhergesagten Unfallquote zu erlauben, damit HAF bereits eingeführt werden können, wenn das Wissen über ihr Sicherheitsniveau noch unvollständig ist. Zusätzlich zu den Anforderungen der Gesellschaft haben die Nicht-Nutzer (als Teil der Gesellschaft) gesteigerte Anforderungen an neue Risiken, welche die Automation mit sich bringt. Für Nutzer werden konstante Risikoanforderungen vorgeschlagen, wenngleich diese sich mit der gegenwärtigen Verkehrssicherheit über die Jahre erhöhen könnten. Die Anforderungen der Nutzer sind jedoch nur in der frühen Einführungsphase dominant (vgl. Abbildung 27), wenn der Marktanteil relativ niedrig ist. Ab einem Marktanteil von ca. 10 % aufwärts werden die Anforderungen der Gesellschaft (und der Nicht-Nutzer) dominant. Wenn der Marktanteil allerdings 100 % erreicht, sind keine Nicht-Nutzer mehr übrig.

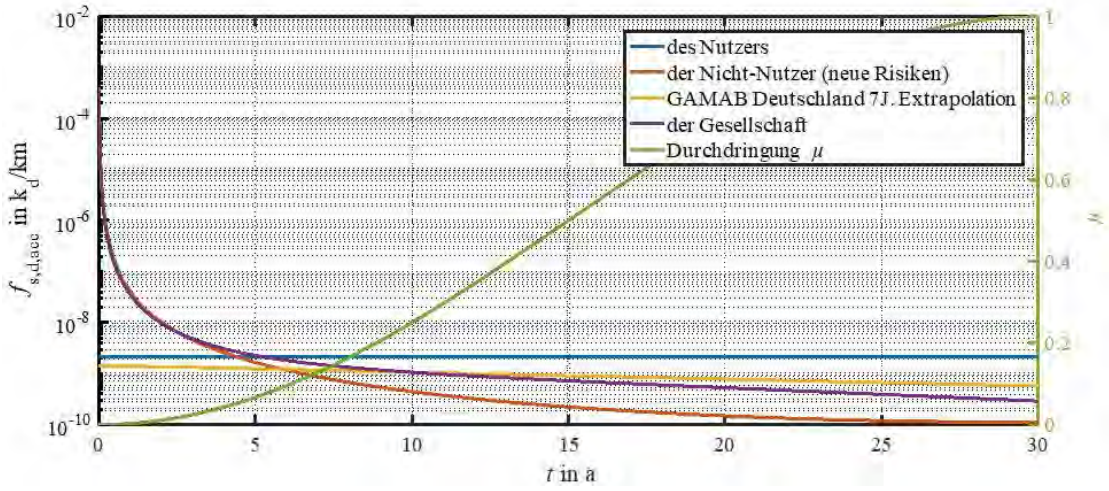


Abbildung 27 Sicherheitsanforderung

In Tabelle 7 werden die Anforderungen zusammengefasst. Hier ist zu beachten, dass derzeit nur Werte für Deutschland angegeben sind, da hier Statistiken zur Fahrleistungen auf zugangsbeschränkten Autobahnen verfügbar sind. Da die Daten zur Unfallquote im gesamten Straßennetz sich in entwickelten Ländern in derselben Größenordnung bewegen (siehe oben), werden keine signifikanten Veränderungen der Sicherheitsanforderungen erwartet.

Tabelle 7 Zusammenfassung der Sicherheitsanforderungen

Beschreibung	Symbol	Wert basierend auf deutschen Daten aus 2016
Nutzeranforderungen		
per Strecke	$f_{\mathrm{s,d,User}}$	$2.2 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{k_d/km}$
per Zeit	$f_{\mathrm{t,d,User}}$	$8.6 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{k_d/a}$
Anforderungen von Nicht-Nutzern an neue Risiken		
bei μ=0,1	$f_{\mathrm{s,d,new}}$	$6.3 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{k_d/km}$
bei μ=0,1	$f_{\mathrm{t,d,new}}$	$2.5 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{k_d/a}$
bei μ=1	$f_{\mathrm{s,d,new}}$	$6.3 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{k_d/km}$
bei μ=1	$f_{\mathrm{t,d,new}}$	$2.5 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{k_d/a}$
Gesellschaftliche Anforderungen		
in 5 Jahren bei μ=0,095	$f_{\mathrm{s,d,soc}}$	$1.8 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{k_d/km}$
in 5 Jahren bei μ=0,095	$f_{\mathrm{t,d,soc}}$	$7.2 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{k_d/a}$
in 30 Jahren bei μ=1	$f_{\mathrm{s,d,soc}}$	$2.9 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{k_d/km}$
in 30 Jahren bei μ=1	$f_{\mathrm{t,d,soc}}$	$1.2 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{k_d/a}$

Sicherheitsnachweis und Felderprobung

Obwohl individuelle und soziale Risikoakzeptanzkriterien für HAF ermittelt wurden, ist es weder möglich,

- Sicherheitsanforderungen oder Testkriterien für bestimmte Fahrzeuge aus Risikoakzeptanzkriterien abzuleiten, noch
- eine Reihe von Szenarien zu bestimmen, die belegen, dass individuelle und gesellschaftliche HAF-Risiken akzeptiert werden.

Für den ersten Punkt ein *Sicherheitsnachweis* und für den zweiten Punkt eine *Felderprobung* benötigt.

Sicherheitsnachweis

Der gesellschaftliche Konsens im Hinblick auf akzeptable Risiken wird durch das Haftungsrecht geregelt, z.B. das deutsche ProdSG, §5(2), demzufolge bei einem Produkt, das Normen oder andere relevante technische Spezifikationen erfüllt, davon ausge-

gangen wird, dass es die Anforderungen an die Produktsicherheit erfüllt, soweit diese von den Normen oder anderen relevanten technischen Spezifikationen erfasst werden. Die Entwicklung gemäß ISO 26262 gewährleistet die „Abwesenheit unvernünftigen Risikos“ (d.h. „Risiko, das geltenden gesellschaftlichen Moralvorstellungen zufolge in einem bestimmten Kontext als inakzeptabel beurteilt wird“). Eine weitere technisch relevante Spezifikation ist z.B. ISO/PAS 21448 für SOTIF, mit der Automationsrisiken in PEGASUS repräsentiert werden. Die Konformität mit Normen oder anderen relevanten technischen Spezifikationen ist jedoch nur eine notwendige Bedingung.

Eine hinreichende Bedingung wird durch die Regeln der Ethik-Kommission geliefert, welche besagen:

- HAF sind vertretbar, wenn sie im Vergleich zur menschlichen Fahrleistung eine Schadensreduzierung im Sinne einer positiven Risikobilanz versprechen.
- Falls eine grundsätzlich positive Risikobilanz vorliegt, stehen technisch unvermeidbare Restrisiken einer Einführung nicht entgegen.

Für eine grundsätzlich positive Risikobilanz im Vergleich zur menschlichen Fahrleistung spricht der Experten zufolge zu erwartende allgemeine Nutzen der Fahrzeugautomation für die Verkehrssicherheit durch

- Vermeidung von Unfällen und
- Minderung der Folgen (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2012)

Des Weiteren stellt das in PEGASUS entwickelte Testkonzept beispielhaft sicher, dass die Systeme mindestens mit der menschlichen Fahrleistung gleichziehen.

Neben dem allgemeinen Nutzen für die Verkehrssicherheit werden HAF in Einzelfällen aufgrund von Leistungsbegrenzungen und inadäquater Interaktion mit Fahrern und anderen Verkehrsteilnehmern Automationsrisiken mit sich bringen. Diese Automationsrisiken werden in PEGASUS identifiziert und - soweit möglich - quantifiziert, um sicherzustellen, dass HAF-Systeme nur technisch unvermeidbare Restrisiken verursachen.

Eine Produktentwicklung im Einklang mit Normen und Spezifikationen ersetzt allerdings keine Produkttests im Rahmen der Verifizierung und Validierung. Eine Evaluation unterschiedlicher Teststrategien liefern (Junietz, Wachenfeld, Klonecki, & Winner, 2018)

Eine wesentliche Limitierung aller apriorischen Betrachtungen besteht darin, dass ein valider statistischer Beweis dafür, dass die Systeme tatsächlich die Erwartungen erfüllen, nicht vor ihrer Markteinführung erbracht werden kann. Daraus ergeben sich Anforderungen an die *Felderprobung* sowie an die aus dieser zur kontinuierlichen Verbesserung der Systeme abzuleitenden Maßnahmen.

Begrenzte Einführung und Felderprobung

Trotz aller Abwägungen, normativen Spezifikationen und Produkttests wird es zum Zeitpunkt der ersten Markteinführung von HAF eine gewisse Unsicherheit bezüglich ihrer zukünftigen Leistung geben. Diese Unsicherheit kann entweder akzeptiert werden, wenn alle Interessengruppen der Ansicht sind, das Restrisiko sei klein genug, oder aber kontrolliert werden, indem die Anzahl der verkauften Fahrzeuge in der Einführungsphase reduziert wird. Der Marktanteil μ wird kontrolliert und die Exposition der Gesellschaft und der Nicht-Nutzer reduziert. Nur der Nutzer muss die Unsicherheit akzeptieren, wenn er HAF nutzen möchte. Die Leistung von HAF sollte allerdings beobachtet und Statistiken sollten öffentlich diskutiert werden, um bei Kunden und der Gesellschaft Vertrauen aufzubauen, aber auch, um kritische Situationen zu identifizieren und das System mit Updates zu verbessern.

Jüngste Feldbeobachtungen unterliegen Einschränkungen bezüglich der Berücksichtigung besonderer HAF-Aspekte, der rechtzeitigen Wahrnehmung seltener Ereignisse sowie der Einheitlichkeit durch den gesamten Produktlebenszyklus hindurch. Potenzielle Verbesserungen sind zum Beispiel

- Weiterentwicklung von Unfallmodellen
- Definition von Mängelindikatoren für HAF-Systeme
- Steigerung der Dichte von Unfallanalysen
- Feldstudien mit HAF-Systemen diverser Hersteller
- Befragungen von Kunden, die Fahrzeuge mit HAF-Systemen besitzen
- Effektive Überprüfungen von HAF-Systemen im Rahmen der regelmäßigen technischen Überwachung.

Diese Verbesserungen müssen vor der Markteinführung implementiert werden. Zudem muss eine unabhängige Organisation für die Durchführung der Überprüfung in der realen Welt eingerichtet werden. Zur effizienten Produktüberwachung und kontinuierlichen Optimierung von HAF ist die Aufzeichnung von Ereignisdaten (Event Data Recording, EDR) erforderlich. Dafür müssen Normen und Verfahren zum Umgang mit Daten entwickelt und implementiert werden.

Der Gesetzgeber hat kürzlich, mit der Änderung des deutschen Straßenverkehrsgesetzes (StVG) 2017, den gesetzlichen Rahmen für die Einführung von HAF geschaffen. Ein Sicherheitsnachweis in der Realverkehrserprobung ist daher auch eine wesentliche Voraussetzung für die erwünschte und erforderliche Weiterentwicklung des Gesetzesrahmens für die Einführung höherer Automationsstufen.

(8) Daten im PEGASUS-Format

Für das PEGASUS-Projekt musste eine gangbare Methode zur Sammlung von Daten aus verschiedenen Quellen und von verschiedenen Partnern entwickelt werden. Wie in Schritt (2) hervorgehoben wurde, handelt es sich bei den verschiedenen Quellen unter anderem um Simulationsdaten, FOT- und NDS-Daten sowie Daten zu Entwicklungsfahrzeugen. Um diese Daten in einer einzigen Datenbank zu vereinen, musste ein gemeinsames Datenformat etabliert werden. Das Hauptziel ist die Gewährleistung eines einheitlichen Umgangs mit den Daten in allen unterschiedlichen Verarbeitungsschritten. Zu diesem Zweck werden verschiedene Anforderungen geprüft und auf Basis dieser Informationen wird eine Definition generiert.

Zuerst muss eine Struktur für all die unterschiedlichen Daten entwickelt werden. Da die Verarbeitung der Daten in Matlab stattfindet, wird eine Matlab-Struktur gewählt. Matlab steht allerdings nicht allen Projektpartnern zur Verfügung. Deshalb können auch hdf5-Dateien verwendet werden, diese müssen allerdings die gleiche interne Struktur aufweisen wie die Matlab-Dateien.

Die Hauptstruktur im Inneren der Dateien ist so gestaltet, dass sie einen Kanal für jedes in ihr gespeicherte Signal hat. Innerhalb dieses Kanals muss für jedes Signal ein *Zeit*- sowie ein *Wert*-Vektor bereitgestellt werden, welche miteinander korrespondieren. Der Zeitvektor sollte für die gesamte Messdauer eine (weitestgehend) feste Frequenz haben, diese kann jedoch zwischen unterschiedlichen Signalen variieren. Werte, die sich während einer ganzen Messung nicht ändern, können nur einmal mit einem Zeitstempel von 0 gespeichert werden. Mit dieser Struktur können alle benötigten Daten gespeichert werden. Alle obligatorischen Signale, aber auch weitere nützliche Signale werden definiert. Zusätzliche Signale können eingefügt werden, so dass spezielle Daten, die in verschiedenen Testfahrzeugen verfügbar sein können, in das Format integriert werden können.

Während dieses Prozessschritts wurden unterschiedliche Anforderungen beurteilt. Die Hauptanforderungen ergaben sich aus den unterschiedlichen Datenquellen sowie der Weiterverarbeitung der Daten. Als Hauptziel wurde die Fähigkeit identifiziert, jede mögliche Situation darstellen zu können, welche der Autobahn-Chauffeur-Funktion im Rahmen des Projekts

begegnen könnte. Da der Autobahn-Chauffeur an Autobahnszenarien gebunden ist, muss das Datenformat nur diese Szenarien darstellen können. Da die meisten Daten aus Fahrzeugen erfasst werden, wird im entwickelten Format eine Ego-Perspektive verwendet.

Im Allgemeinen müssen zwei Dinge durch das Datenformat dargestellt werden:

- Objekte im gegenwärtigen Szenario
- Umgebung des gegenwärtigen Szenarios

Verwendete Koordinatensysteme

Um eine einheitliche Darstellung zu gewährleisten, werden in dem Format zwei Koordinatensysteme verwendet. Ein globales Koordinatensystem (Norden, Osten, Höhe) dient der Beschreibung der allgemeinen Bewegung des Ego-Fahrzeugs, während ein lokales Koordinatensystem (x,y,z) an die Hinterachse des Ego-Fahrzeugs gebunden ist. Die Ausrichtungen sowie die Verbindungen zwischen diesen beiden werden in Abbildung 28 gezeigt.

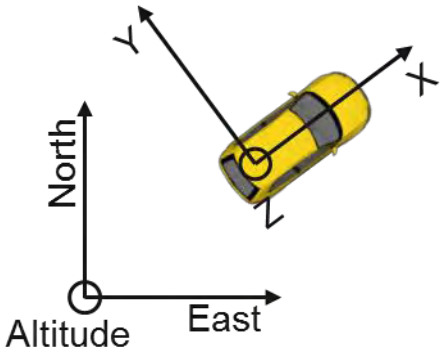


Abbildung 28 Koordinatensysteme der Datendefinition

Der Großteil der Daten ist im Fahrzeug-Koordinatensystem enthalten, da Aufzeichnungen in verschiedenen Fahrzeugen die Hauptquelle der Daten sind. Nichtsdestotrotz ist ein globales Koordinatensystem notwendig, um die gesamten Trajektorien des Ego-Fahrzeugs und aller Umgebungsobjekte darstellen zu können.

Objektdarstellung

Die Objektdarstellung verfügt über ein Maximum von 65 Objektplätzen. Dies schließt das Ego-Fahrzeug und bis zu 64 Umgebungsfahrzeuge ein. Um zwischen den Daten dieser verschiedenen Objektplätze zu unterscheiden, wird jedes Signal für jeden Objektplatz repliziert. Dies geschieht, indem die aktuelle Platznummer in den Namen jedes Signals integriert wird. So erhalten die Signalnamen die Form idX_SignalName, wobei X einen Wert zwischen 0 und 64 annehmen kann. Gibt es weniger Objekte, so müssen nicht alle Plätze genutzt werden. Für jedes Objekt können Signale für typische Translations- und Rotationswerte sowie andere Eigenschaften abgespeichert werden. All diese Werte werden relativ zum Ego-Fahrzeug abgespeichert, da dies das gemeinsame Format für mit einem Testfahrzeug vorgenommene Messungen ist.

Um mehr als 65 Fahrzeuge in diesem Format speichern zu können, wird für jeden Objektplatz eine globale Objekt-ID als Einzelsignal gespeichert. Mit dieser globalen Objekt-ID kann jeder Platz im Laufe der Zeit unterschiedliche Objekte speichern, da Einzelobjekte nach gewisser Zeit wahrscheinlich außer Reichweite geraten. So erhält jedes in den Messdaten enthaltene Objekt eine einzigartige globale Objekt-ID. Für die weiteren Datenverarbeitungsschritte müssen diese globalen Objekt-IDs, also auch das aktuelle Objekt, innerhalb eines einzelnen Objektplatzes des Datenformats verbleiben. Da die Anzahl der

verwendeten Plätze innerhalb einer Einzelmessung konstant bleiben muss, müssen gegenwärtig ungenutzte Objektplätze mit einer globalen Objekt-ID von -1 gekennzeichnet werden.

Für das Ego-Fahrzeug sind zusätzliche Signale notwendig, um eine vollständige Darstellung des aktuellen Szenarios zu erreichen. Um die vollständigen Trajektorien neu berechnen zu können, müssen Rechts- und Hochwert des Ego-Fahrzeugs sowie sein aktueller Orientierungswinkel bereitgestellt werden. Diese Werte werden für die umgebenden Objekte nicht benötigt, da deren vollständige Trajektorien aus der Position des Ego-Fahrzeugs abgeleitet werden können.

Umgebungsdarstellung

Wie bereits erwähnt, ist die Umgebung im PEGASUS-Projekt auf Autobahnszenarien beschränkt. Daher kann ein einfacher Ansatz für die Beschreibung der aktuellen Situation im Datenformat genutzt werden. Die Umgebung wird durch die Fahrstreifenmarkierungen und die straßenseitige Infrastruktur beschrieben. Diese werden alle durch ein Polynom dritten Grades beschrieben, unter Verwendung von jeweils 4 Signalen (Abstand, Orientierung, Kurvenkrümmung und Krümmungsableitung). Mithilfe dieser Werte kann die Position jedes Objekts entlang der Straße kalkuliert werden. Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen das allgemeine Konzept der Fahrstreifenmarkierungen sowie die Definitionen von Orientierung und Abstand. Genau wie für den Abstand und die Orientierung Abbildung 29 müssen auch die Kurvenkrümmung und die Krümmungsableitung an der Hinterachse des Ego-Fahrzeugs angegeben werden.

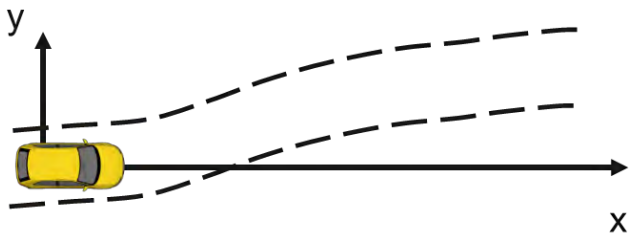


Abbildung 29 Fahrstreifenmarkierungen links und rechts vom Fahrzeug

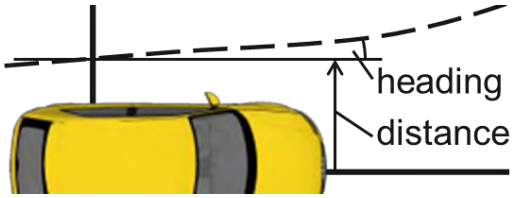


Abbildung 30 Orientierung und Abstand der ersten linken Fahrstreifenmarkierung

Die Gleichung bis Gleichung 7 zeigen, wie die Position, Orientierung und Kurvenkrümmung im Koordinatensystem des Ego-Fahrzeugs berechnet werden:

$$y(x) = distance + heading * x + \frac{curvature}{2} * x^2 + \frac{curvatureDerivative}{6} * x^3$$

Gleichung 5: Position der Fahrstreifenmarkierungen im Koordinatensystem des Ego-Fahrzeugs

$$\varphi(x) = heading + curvature * x + \frac{curvatureDerivative}{2} * x^2$$

Gleichung 6: Orientierung der Fahrstreifenmarkierungen im Koordinatensystem des Ego-Fahrzeugs

$$\kappa(x) = curvature + curvatureDerivative * x$$

Gleichung 7: Krümmung der Fahrstreifenmarkierungen im Koordinatensystem des Ego-Fahrzeugs

Zusätzliche Daten wie die Farbe der Fahrstreifenmarkierungen, die Art der Fahrstreifenmarkierungen oder die Art der straßenseitigen Infrastruktur (Barriere, Leitplanke, Gras, ...) können mit einem zusätzlichen Signal abgebildet werden.

Notwendige, empfohlene und optionale Signale

Von den Anforderungen des Datenbankprozesses ausgehend müssen manche Signale in jeder Messung verfügbar sein. Diese Signale werden in Abbildung 31 gezeigt. Für eine grundlegende Darstellung der Umgebung müssen mindestens die linke und die rechte Fahrstreifenmarkierung vorhanden sein. Diese sind an das Ego-Fahrzeug gebunden. Des Weiteren sind Positionen, Geschwindigkeiten sowie die globale Objekt-ID aller Objekte für jede Messung zwingend notwendig. Für die Neuberechnung der globalen Trajektorien aller Objekte wird außerdem bei jeder Messung die absolute Position des Ego-Fahrzeugs benötigt.

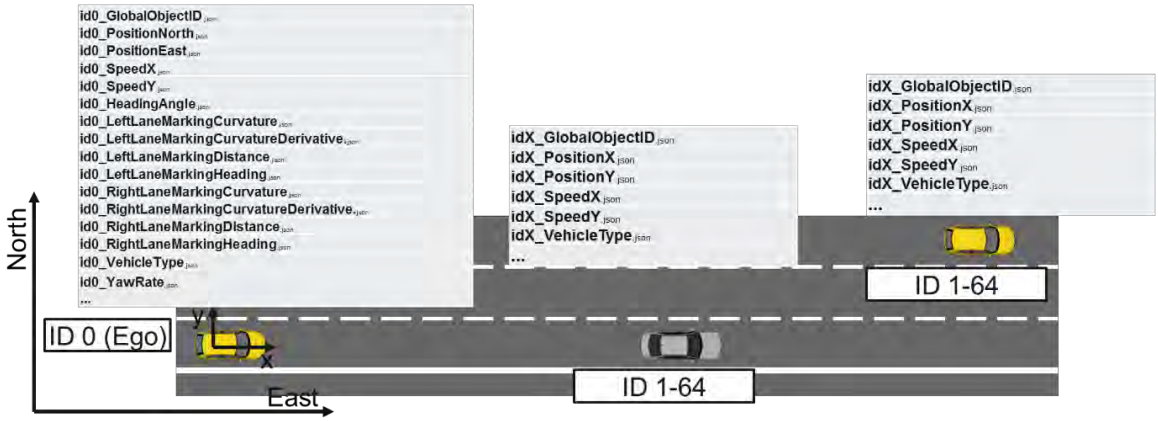


Abbildung 31 Obligatorische Signale für Ego-Fahrzeug und Umgebungsobjekte

Wenn diese Daten in einer Messung enthalten sind, können alle weiteren Prozessschritte ausgeführt werden. Wie bereits erwähnt, werden in dem Format noch viele weitere Signale definiert. Diese können für zusätzliche Erweiterungen der Datenbankprozesse oder für andere spezifische Berechnungen genutzt werden. Die verbleibenden Signale werden in empfohlene und optionale Signale unterteilt. Die empfohlenen Signale sollten bereitgestellt werden, wenn dies möglich ist, während die optionalen Signale möglicherweise nur für Spezialanwendungen benötigt werden.

Im Folgenden wird eine Liste zwingend notwendiger PEGASUS-JSON-Signale gezeigt. Diese Signale müssen in Testdaten enthalten sein. Die Konvention besagt, dass der Index für EGO 0 beträgt und für Umgebungsobjekte auf einen Wert zwischen 1 und 64 gesetzt wird.

Tabelle 8 Obligatorische Signale

Signalname	Beschreibung	SUT/ weiteres Fahrzeug	Einheit
idXY_YawRate	Winkelgeschwindigkeit um die z-Achse des fahrzeugzentrierten Koordinatensystems, Linkskurve positiv, Rechtskurve negativ	SUT	rad/s
idXY_VehicleType	0 = nicht vorhanden, 1 = Auto, 2 = Lastwagen, 3 = Fußgänger, 4 = Fahrradfahrer 5 = Sonstige, 6 = Motorrad 7 = Fahrzeug mit Anhänger	SUT	-
idXY_SpeedY	Absolute Geschwindigkeit in Richtung der y-Achse des fahrzeugzentrierten Koordinatensystems	SUT/ weiteres Fahrzeug	m/s
idXY_SpeedX	Absolute Geschwindigkeit in Richtung der x-Achse des fahrzeugzentrierten Koordinatensystems	SUT/ weiteres Fahrzeug	m/s
idXY_RightLaneMarkingHeading	Zweiter Parameter zur Beschreibung der rechten Fahrstreifenmarkierung, positiv zur linken Seite	SUT	rad
idXY_RightLaneMarkingDistance	Erster Parameter zur Beschreibung der rechten Fahrstreifenmarkierung, positiv zur linken Seite	SUT	m
idXY_RightLaneMarkingCurvatureDerivative	Vierter Parameter zur Beschreibung der rechten Fahrstreifenmarkierung, positiv zur linken Seite	SUT	$1/m^2$

Signalname	Beschreibung	SUT/ weiteres Fahrzeug	Einheit
idXY_RightLaneMarkingCurvature	Dritter Parameter zur Beschreibung der rechten Fahrstreifenmarkierung, positiv zur linken Seite	SUT	1/m
idXY_PositionNorth	Position im globalen Koordinatensystem. Anfangspunkt zu Beginn der Messung.	SUT	m
idXY_PositionEast	Position im globalen Koordinatensystem. Anfangspunkt zu Beginn der Messung.	SUT	m
idXY_LeftLaneMarkingHeading	Zweiter Parameter zur Beschreibung der linken Fahrstreifenmarkierung, positiv zur linken Seite	SUT	rad
idXY_LeftLaneMarkingDistance	Erster Parameter zur Beschreibung der linken Fahrstreifenmarkierung, positiv zur linken Seite	SUT	m
idXY_LeftLaneMarkingCurvatureDerivative	Vierter Parameter zur Beschreibung der linken Fahrstreifenmarkierung, positiv zur linken Seite	SUT	$1/m^2$
idXY_LeftLaneMarkingCurvature	Dritter Parameter zur Beschreibung der linken Fahrstreifenmarkierung, positiv zur linken Seite	SUT	1/m
idXY_HeadingAngle	Winkel um z-Achse des fahrzeugzentrischen Koordinatensystems, 0 zeigt in Richtung UTM-Norden, positiv zur linken Seite	SUT	rad
idXY_RightLaneMarkingCurvatureDerivative	Vierter Parameter zur Beschreibung der rechten Fahrstreifenmarkierung, positiv zur linken Seite	SUT	$1/m^2$

Signalname	Beschreibung	SUT/ weiteres Fahrzeug	Einheit
idXY_GlobalObjectID	Globale Objekt-ID des Fahrzeugs	SUT/ weiteres Fahrzeug	-
idXY_PositionX	Position im auf das Ego-Fahrzeug zentrierten Koordinatensystem, Anfangspunkt in der Mitte der Hinterachse am unteren Ende des Ego-Fahrzeugs, Bezugspunkt in der Mitte der Rückseite des Objekts	SUT/ weiteres Fahrzeug	m
idXY_PositionY	Position im auf das Ego-Fahrzeug zentrierten Koordinatensystem, Anfangspunkt in der Mitte der Hinterachse am unteren Ende des Ego-Fahrzeugs, Bezugspunkt in der Mitte der Rückseite des Objekts	SUT/ weiteres Fahrzeug	m

(8) Anwendung von Metriken + Zuordnung zu logischen Szenarien

Zuordnung zu logischen Szenarien

Für die Zuordnung von Messdaten zu logischen Szenarien werden unterschiedliche Signale und Daten benötigt. Zu diesem Zweck wird ein Verarbeitungsrahmen erstellt. Dieser erhält die aufgezeichneten Daten als Input und gibt die zugeordneten Szenarien gemeinsam mit Leistungskennzahlen (Key Performance Indicators, KPI) aus, welche das logische Szenario beschreiben.

Im ersten Schritt werden die Daten auf Fehler überprüft, die dann falls möglich automatisch bearbeitet und korrigiert werden. Ist dies nicht möglich, so muss der Schritt der Datenkonvertierung wiederholt werden. Da es viele verschiedene KPIs gibt, die für die Analyse der unterschiedlichen logischen Szenarien von Interesse sein können, ist der Verarbeitungsrahmen im Hinblick auf die berechneten Messwerte flexibel. Zu diesem Zweck analysiert er die jeweiligen Skripte und Funktionen, die zur Ableitung der Maßnahmen benötigt werden, und erstellt einen Berechnungsbaum anhand der Anforderungen der einzelnen Skripte. Er analysiert Input und Output jedes Skripts und ordnet diese so an, dass jederzeit alle benötigten Signale bereits berechnet worden sind.

Die Funktionen und Skripte werden in vier separate Gruppen eingeteilt: abgeleitete Signale, Szenariowahrscheinlichkeiten, Szenarioextraktion und Indikatoren. Im ersten Schritt der Berechnung geht es um die abgeleiteten Signale. Hier werden Signale wie die Zeit zum Aufprall (TTC), die Fahrzeugfolgezeit oder auch die Zuordnung von Objekten zu bestimmten Fahrstreifen berechnet. Szenariowahrscheinlichkeiten liefern für jeden Zeitschritt der Aufzeichnung eine Wahrscheinlichkeit und zeigen an, ob dieser Zeitschritt Teil eines Szenarios ist und mit welcher Wahrscheinlichkeit dies der Fall ist. Funktionen zur Szenarioextraktion nehmen

dann diese Wahrscheinlichkeiten und extrahieren Szenarien daraus, wobei sie nicht nur die Einzelwahrscheinlichkeiten, sondern auch Sensordefizite und Verarbeitungsfehler berücksichtigen. Die letzte Gruppe von Funktionen, die Indikatoren, extrahieren KPIs für jedes der extrahierten Szenarien. Je nach Typ des Szenarios können diese Indikatoren mehr oder weniger umfangreich sein.

Nachdem all diese Funktionen verarbeitet worden sind, werden die Daten zur weiteren Verwendung aggregiert. Im aktuellen Stand des Verarbeitungsrahmens werden sie dann zur weiteren, fahrt- und aufzeichnungsübergreifenden Aggregierung an die Datenbank weitergereicht. Zu diesem Zweck wird der Umfang eines Szenarios und seine KPIs in eine Datei des Formats JavaScript Object Notation (JSON) übertragen. Diese kann dann in die Datenbank eingelesen werden.

Der ganze Rahmen dient einem einzigen Zweck: der Extraktion von Szenarien und der KPIs, die diese Szenarien beschreiben. Aufgrund seines modularen Aufbaus kann der Rahmen stets erweitert werden, um mehr Szenarien zu extrahieren oder mehr KPIs zu berechnen. Werden die Namenskonventionen der verwendeten Signale beibehalten und sind die benötigten Signale verfügbar, so kann eine beliebige neue Funktion durch den Rahmen leicht integriert werden.

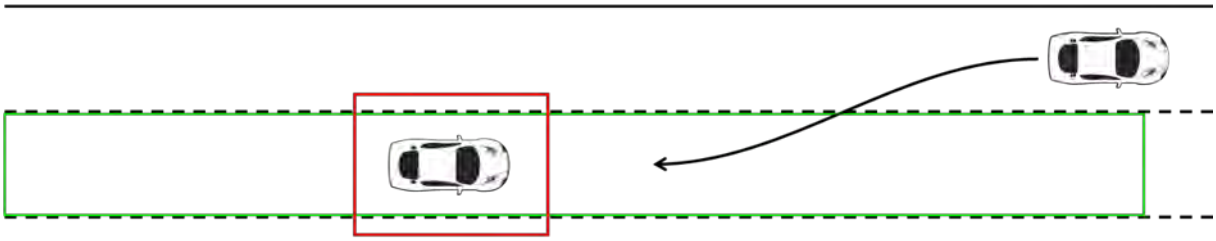


Abbildung 32 Die beiden um das Ego-Fahrzeug herum definierten Komfortzonen. Die erste liegt entlang des Ego-Fahrstreifens (grün), die zweite befindet sich um das Ego-Fahrzeug herum (rot).

Die zuvor genannten Szenarien werden in den Funktionen der Gruppe Szenariowahrscheinlichkeiten erkannt. Aus den Daten werden mittels eines vierstufigen Verfahrens die Wahrscheinlichkeiten abgeleitet. Zu diesem Zweck werden in einem ersten Schritt Komfortzonen um das Ego-Fahrzeug herum eingerichtet. Diese Zonen werden in Abbildung 32 gezeigt. Die durch das grüne Rechteck gekennzeichnete Zone wird durch die Ego-Fahrstreifenmarkierungen links und rechts begrenzt. Die Begrenzung nach vorn wird dynamisch durch den Time Headway (THW) gehandhabt. Für die zweite Komfortzone (rot in Abbildung 32) werden die Abmessungen statisch festgelegt. Üblicherweise werden Abmessungen von ein paar Metern vor und hinter dem Auto und 1 m neben dem Auto gewählt. Es ist zu bedenken, dass andere Objekte anhand ihres Mittelpunkts gehandhabt werden, d.h., wenn die Distanz von der Seite des Ego-Fahrzeugs zum Objekt 1 m beträgt, ist es bereits sehr nah.

Wie oben erwähnt, wird beim Verarbeitungsrahmen ein modularer Ansatz genutzt. Daher wird die Zuordnung der Objekte auf die Fahrstreifen als abgeleitetes Signal angegeben. Das bedeutet: Wenn die Zuordnung zu den logischen Szenarien durchgeführt wird, weiß die Funktion bereits, ob Objekte sich zu einem bestimmten Zeitpunkt auf dem Ego-Fahrstreifen befinden oder nicht. Das gleiche gilt für die Verletzung der Sicherheitszone (rot). Deshalb besteht der zweite Schritt zur Erkennung in der Berechnung aller Einscherer auf die Ego-Fahrspur während der gesamten Fahrt. Dies wird dann um die Information über die exakte Position des die Zone verletzenden Objekts ergänzt, wobei die zur Definition der Relevanz der logischen Szenarien verwendeten THW-Schwellenwerte berücksichtigt werden. Einscherer in die (grüne) Komfortzone werden nur dann als relevant betrachtet, wenn sie unter einem bestimmten Schwellenwert erfolgen.

Wenn ein Kandidat für einen Einscherer in die Komfortzone gefunden wurde, besteht die dritte Stufe in der Zuordnung zum eigentlichen logischen Szenario. Zu diesem Zweck wird der

Zeitraum vor und nach dem Eindringen des Objekts in die Komfortzone untersucht. Unter Verwendung der dynamischen Objektinformationen kann der Rahmen ableiten, zu welchem logischen Szenario dieser Einscherer gehört.

Die vierte und letzte Stufe ist die Reduzierung der für die Beschreibung des Szenarios benötigten Parameter. Um die Szenarienbeschreibung möglichst kurz zu halten und auch im Sinne der Speichereffizienz wird nicht die vollständige Trajektorie gespeichert. Des Weiteren werden nur Parameter berechnet, welche die präzise Rekonstruktion der Trajektorie erlauben. Für Einscherer von vorn und hinten ist dies recht einfach, da eine gerade Bewegung relativ zur Straße angenommen werden kann. Für Einscherer, die einen Fahrstreifenwechsel einschließen, erfolgt eine Anpassung einer einfacheren Funktion, die den Fahrstreifenwechsel beschreibt. Auf diese Weise können sogar komplexere Szenarien mit nur einer kleinen Teilmenge der in den aufgezeichneten Rohdaten enthaltenen Parameter beschrieben werden.

Nachdem ein Szenario vollständig erkannt wurde und seine Parameter extrahiert worden sind, wird die Wahrscheinlichkeit des Szenarios zur weiteren Verwendung im Extraktionsprozess und für die Berechnung der KPIs gespeichert.

Anwendung von Metriken

Im Folgenden werden der Zweck und die Konzeption der Kritikalitätsmetriken als Beispiel für die Anwendung von Metriken beschrieben. Weitere Details dazu finden sich in der Veröffentlichung von (Junietz, Bonakdar, Klamann, & Winner, 2018). Bei der Ableitung von Szenarien aus Realverkehrsdaten ist ein Filter notwendig, um relevante Szenarien zu finden. Insbesondere Autobahnfahrten sind meist monoton und erfordern keinen gesonderten Testfall (Wachenfeld, Junietz, Wenzel, & Winner, 2016). Die Metrik sollte alle Szenarien mit gesteigerten Fahranforderungen ermitteln, um herausfordernde Testfälle abzuleiten. Sie kann auf NDS/FOT-Daten sowie während HAF-Testfahrten angewandt werden, um relevante Szenarien zu ermitteln. Wenn die Metrik während des Fahrens online angewandt wird, ist eine Berechnung in Echtzeit notwendig. Wird diese Bedingung nicht erfüllt, so könnte in einem ersten Beurteilungsschritt eine Metrik zur Filterung aller definitiv irrelevanten Szenarien verwendet werden, um die Anzahl der Szenarien zu reduzieren, die weiteren Berechnungsaufwand erfordern. Worst-Time-to-Collision (Wachenfeld, Junietz, Wenzel, & Winner, 2016) ist eine Metrik, die für den Einsatz als erster Filter entworfen wurde, um diese Szenarien effizient aufzuspüren, und könnte hier verwendet werden.

Anforderungen an eine Kritikalitätsmetrik

Neben der Abwesenheit von Unfällen könnten auch Metriken, welche die Kritikalität des Testszenarios beschreiben, zur Beurteilung der Sicherheit genutzt werden. Kritikalität wird hierbei als die Fahranforderungen definiert, die in dem Szenario vorhanden sind. Die Fahranforderungen hängen stark vom Szenario ab, dem die HAF-Funktion ausgesetzt ist. Daher kann keine allgemeingültige Anforderung abgeleitet werden. Die statistische Auftretenswahrscheinlichkeit von Szenarien mit anspruchsvollen Anforderungen kann nur im Realverkehr bestimmt werden. Wenn zwei verschiedene HAF-Funktionen im gleichen künstlichen Test (Simulation/Testgelände) unterschiedliche Leistungen erbringen, bedeutet das nicht notwendigerweise einen Sicherheitsunterschied, da eine konservativere Fahrstrategie nicht unbedingt eine gesteigerte Sicherheit bedeutet, sofern beide HAF-Funktionen unfallfrei fahren. Eine Ausnahme läge vor, wenn die Fahrfähigkeiten der HAF-Funktion bekannt sind (z.B. eine Reaktionszeit bis zur Vollbremsung aufgrund der Berechnungszeit und der Bremsverzögerung). In diesem Fall ist es erforderlich, dass die Fahrfähigkeiten ausreichend für eine unfallfreie Leistung sind und die Fahrstrategie muss entsprechend angepasst werden.

Da allen Unfallarten vorgebeugt werden soll, wird die Unfallschwere hier nicht berücksichtigt, sie ist also keine Risikometrik. Idealerweise sollte die Metrik die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls in einer spezifischen Situation für die autonome Fahrfunktion o-

der einen menschlichen Fahrer beschreiben. Da verschiedene Fahrer und verschiedene autonome Fahrfunktionen auch unterschiedliche Fahrleistungen erbringen und daher unterschiedliche Kollisionswahrscheinlichkeiten haben, soll die Metrik die Fahranforderungen in einer Situation beschreiben, die unabhängig von der verfügbaren Fahrleistung ist (Junietz, Schneider, & Winner, Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und -szenarien, 2017). Die Fahranforderungen bestehen aus den folgenden Entitäten:

1. Notwendige Beschleunigung in lateraler und longitudinaler Richtung
2. Spielraum für Korrekturen des Kurswinkels (seitlicher Abstand)
3. Spielraum für Korrekturen der Geschwindigkeit (vorderer Abstand)

Diese Entitäten sind voneinander abhängig. Ein größerer Korrekturspielraum kann mit einem früheren Abbremsen erkauft werden. Daher sollten die drei Entitäten normalisiert und zu einem gemeinsamen Wert kombiniert werden.

Vergleich mit dem aktuellen Entwicklungsstand

Es existieren diverse Metriken für die Identifizierung von Szenarien, die Trajektorienplanung und die allgemeine Kritikalitätsbeurteilung. Sie können in aposteriorische Metriken, die oft zur NDS-Analyse genutzt werden (Benmimoun, 2015), (Dingus, Hanowsk , & Klauer, 2011), sowie in Metriken mit deterministischer (Rodemerk, Habenicht, Wenzel, & Winner, 2012), (Winner, Geyer, & Sefati, Maße für den Sicherheitsgewinn von Fahrerassistenzsystemen, 2013), (Satzoda & Trivedi, 2016), (Damerow & Eggert, 2014) und probabilistischer Trajektorienvorhersage (Damerow & Eggert, 2014), (Schreier, 2016), (Eggert & Puphal, 2017), (Althoff, Kuffner, Wollherr, & Buss, 2012) unterteilt werden. Eine Übersicht und eine Klassifizierung der Metriken mit Trajektorienvorhersage ist in (Schreier, 2016) und (Lefèvre, Vasquez, & Laugier, 2014) zu finden. Diese Metriken kombinieren allerdings nicht alle genannten Entitäten. In (Broadhurst, Baker, & Kanade, 2005), (Eidehall & Petersson, 2008) wird das Monte-Carlo-Stichprobenverfahren genutzt, um kombinierte Manöver zu adressieren. In (Schmidt, 2014) wird der erreichbare und verfügbare Freiraum beurteilt, um Kritikalität abzuleiten. Diese Ansätze adressieren jedoch nicht die Schwierigkeit des Fahrens auf diesen Trajektorien. Bei der Trajektorienplanung und Optimierung werden oft unterschiedliche Kriterien kombiniert (Yi & et al., 2016), (Ulbrich & Maurer, 2015). Die Definition einer zu minimierenden Optimierungsfunktion bietet Gelegenheit zur Kombination unterschiedlicher Entitäten und Gewichtungsfaktoren. Typischerweise ist die resultierende Trajektorie mit den benötigten Kontrollwerten von Interesse, sofern Model Predictive Control (MPC) genutzt wird. In PEGASUS verfolgen wir einen ähnlichen Ansatz mit einer Optimierungsfunktion, die entworfen wurde, um Kritikalität als die oben genannten Fahranforderungen zu beschreiben. Der minimierte Wert der Optimierungsfunktion ist die Kritikalität in einer Situation. Es ist wichtig, den Unterschied zwischen diesem Ansatz und den meisten Anwendungsfällen bei der Trajektorienoptimierung zu beachten. Die Metrik hat keine direkte Durchführung zur Trajektorienkontrolle. Ihr einziger Zweck ist die Optimierung möglicher zukünftiger Trajektorien, um die Kritikalität zu berechnen. Dies kann entweder live während der Testfahrt oder a posteriori auf Grundlage aufgezeichneter Daten geschehen.

Berechnung

Um die gewünschte Kritikalitätsmetrik zu erhalten, definieren wir das Zustandsraummodell mit Zustandsvektor $\underline{x} = [x_w\ y_w\ v_v\ \psi_c]$ und Eingangsvektor $\underline{u} = [a_x\ a_y]$. Das Problem ist von der aktuellen Ego-Geschwindigkeit in natürlichen Koordinaten v_v, dem Kurswinkel ψ_c und der Beschleunigung a_x, a_y in natürlichen Koordinaten abhängig. Zusätzlich wird die Position im Weltkoordinatensystem benötigt, da die Position der Objekte nicht zu Fahrzeugkoordinaten aktualisiert wird, sobald der

Vorhersagehorizont initialisiert worden ist. Für die meisten MPC-Anwendungen wird ein lineares Einspurmodell genutzt. Dies hat den Vorteil, dass die Aktor-Eingangswerte auf direkte Weise optimiert werden können. Bei der Anwendung der Kritikalitätsmetrik sind jedoch die Beschleunigungen von Interesse. Da wird das Modell nicht zur tatsächlichen Fahrzeugsteuerung verwenden, können zusätzliche Abweichungen von einem vereinfachten Modell (z.B. durch Vernachlässigung der Reifenquersteifigkeit) vernachlässigt werden. Stattdessen wird ein Massenpunktmodell genutzt, das um einen Kurswinkel erweitert wird, der für die Übertragung der Fahrzeugbewegung in Weltkoordinaten erforderlich ist. Ein nonlineares Fahrzeugmodell wird wie folgt beschrieben:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{v}_v \\ \dot{\psi}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_v \cdot \cos(\psi_c) \\ v_v \cdot \sin(\psi_c) \\ a_x \\ \dfrac{a_y}{v_v} \end{bmatrix} \qquad 8$$

Die Annahme kleiner Kurswinkeländerungen und kleiner Geschwindigkeitsänderungen erlaubt eine Linearisierung des Modells. Wird das Modell bei einem Kurswinkel von Null und unter Verwendung einer konstanten Geschwindigkeit v_{old}, die nur zu Beginn des Vorhersagehorizonts aktualisiert wird (vgl. (Yi & et al., 2016)), initialisiert, so vereinfachen sich die Gleichungen wie folgt:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{v}_v \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_v \\ v_{\text{old}} \cdot \psi_c \\ a_x \\ \dfrac{a_y}{v_{\text{old}}} \end{bmatrix} \qquad 9$$

Resultat sind diese Systemmatrizen:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_{\text{old}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1/v_{\text{old}} \end{bmatrix} \qquad 10$$

Das Ziel des MPC ist die Optimierung der Trajektorien im Hinblick auf die Kritikalität innerhalb eines gegebenen Vorhersagehorizonts N. Die ersten beiden Einflussfaktoren sind die minimierten Beschleunigungen. Der Spielraum für Winkelkorrekturen hängt vom seitlichen Abstand und der Geschwindigkeit ab. Ein größerer Abstand gibt mehr Raum zur Korrektur des Kurswinkels. Eine niedrigere Geschwindigkeit hat zwei Einflussfaktoren: Eine Störung (z.B. Seitenwind) hat einen kleineren Einfluss auf eine Positionsabweichung (da die Geschwindigkeit integriert ist) und der Kurswinkel kann in a_y mit weniger Aufwand korrigiert werden. Da wir einen Term minimieren wollen, der die Maximierung von Abständen beinhaltet, nutzen wir die Position mit maximalem seitlichem Abstand zu allen Hindernissen als Referenz r_y und Maximalabweichung d_y, was zu folgendem Term führt:

$$R_y^2 = \frac{\left(y(k) - r_y(k)\right)^2}{d_y^2(k)} \cdot \frac{v_{\text{old}}}{v_{\max}} \qquad 11$$

Der Spielraum in longitudinaler Richtung kann nicht auf diese Weise genutzt werden, da nur der vordere Abstand relevant ist. Als Referenzwert r_x nutzen wir den in

Deutschland empfohlenen Mindestfahrzeugabstand (0,5·*v*/(km/h)). Wir nutzen die stückweise lineare Funktion:

$$R_x = \max\big(0, x(k) - r_x(k)\big)\,/d_x(k) \tag{12}$$

Mit der Minimierung einer Zielfunktion allein wird die Kollision mit anderen Objekten nicht ausgeschlossen. Daher sind die Ausgangswerte durch Bedingungen gebunden, die zu Beginn des Vorhersagehorizonts unter Annahme konstanter Geschwindigkeit und konstanten Kurswinkels aktualisiert werden. Hier vernachlässigen wir wiederum Objekte, die von hinten kommen, und stellen die einzuhaltende linke, rechte und vordere Begrenzung mit c_l, c_r bzw. c_f dar. Zusätzlich müssen die Eingangswerte gebunden werden, da die Dynamik eines Fahrzeugs durch den verfügbaren Reibungskoeffizienten beschränkt wird. Gemäß dem kammschen Kreis:

$$a_x^2(k) + a_y^2(k) \leq \mu_{\max} g \tag{13}$$

Um eine effiziente Lösung des Optimierungsproblems zu erlauben, wird der kammsche Kreis mit 12 linearen Nebenbedingungen angenähert, unter Verwendung von L_x, L_y und M aus (Yi & et al., 2016). Die Modellierung der Zielfunktion mit der Summe der definierten Elemente mit konstanten Gewichtungsfaktoren w ergibt das folgende Optimierungsproblem:

$$\min_u J = \sum_{k=1}^{N-1} w_x R_x(k) + \sum_{k=1}^{N-1} \mathrm{w_y} R_y^2(k) + \sum_{k=1}^{N-1} w_{ax} \frac{a_x^2(k)}{(\mu_{\max}\mathrm{g})^2} + \sum_{k=1}^{N-1} w_{ay} \frac{a_y^2(k)}{(\mu_{\max}\mathrm{g})^2} \tag{14}$$

s.t.

$$\underline{\dot{x}} = \underline{A}(k)\underline{x}(k) + \underline{B}(k)\underline{u}(k) \tag{15}$$

$$c_r(k) \leq y(k) \leq c_l(k)$$

$$x(k) \leq c_f(k) \tag{16}$$

$$L_x a_x(k) + L_y a_y(k) \leq M \tag{17}$$

$$L_x a_x(k) - L_y a_y(k) \leq M \tag{18}$$

Die Gewichtungsfaktoren werden so gewählt, dass eine gleiche Gewichtung der vier Elemente der Optimierungsfunktion möglich ist. Allerdings ergibt R_x typischerweise Werte, die 10 bis 20 Mal höher als die anderen Elemente sind. Da das Ego-Fahrzeug näherkommt, werden die Elemente der Zielfunktion für die folgenden Schritte summiert. Daher wählen wir hier einen Gewichtungsfaktor von 1/10, während alle anderen Faktoren 1 bleiben. Die finale Kritikalität ist das Beschleunigungsmaximum während der Vorhersage geteilt durch die maximal mögliche Beschleunigung.

Entwickelter Workflow

Der Berechnungsaufwand der vorgeschlagenen Metrik ist im Vergleich zu aktuell standardmäßig genutzten Metriken hoch. Daher wird vorgeschlagen, eine Vorauswahl von Szenarien zu treffen, die relevant sein könnten - in anderen Worten, Szenarien auszufiltern, die definitiv nicht relevant sind. Wir schlagen vor, die Metrik Worst-Time-to-Collision (WTTC) [2] zu nutzen, da sie für alle Arten von Szenarien geeignet ist. Sie berechnet die Zeit bis zum Aufprall für den Fall, dass beide Fahrzeuge das Manöver durchführen, das zur schnellstmöglichen Kollision führt (Abbildung 33).

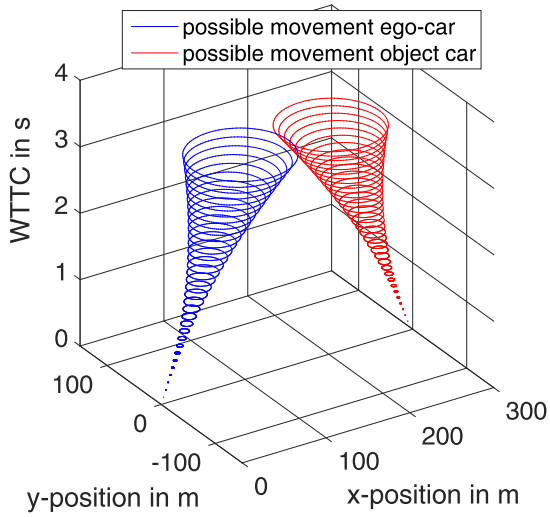
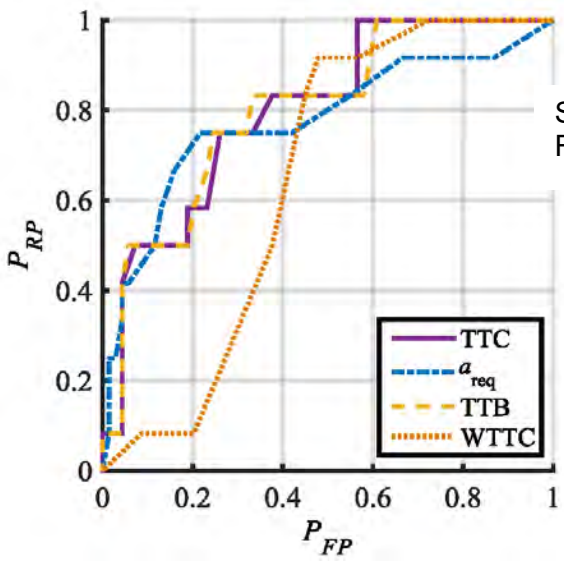


Abbildung 33 Schlechtestes Manöver bei maximaler Reibung zwischen Reifen und Straße

Als Schwellenwert wird ein WTTC-Wert von mindestens einer Sekunde empfohlen, basierend auf der Kalibrierung mit Realverkehrsszenarien (Junietz, Schneider, & Winner, Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und -szenarien, 2017) (Abbildung 34). In Szenarien, in denen sie anwendbar sind, wären auch andere Metriken möglich (z.B. Auffahrunfälle für TTC, TTB oder erforderliche Beschleunigung). Der identifizierte Schwellenwert ist jenen ähnlich, die in der SHRP2-Datenbank zu finden sind (Hankey, Perez, & McClafferty, 2016).



Schwellenwert mit Richtig-Positiv-Rate von 100 %

$\tau_{tc,krit} = 3{,}9$ s	$P_{FP} = 57{,}1\%$
$a_{req,krit} = -2$ m/s²	$P_{FP} = 100\%$
$\tau_{tb,krit} = 3{,}8$ s	$P_{FP} = 61{,}4\%$
$WTTC_{krit} = 1$ s	$P_{FP} = 72{,}8\%$

Abbildung 34 falsche und richtige Identifizierung kritischer Szenarien auf Basis von durch Menschen gekennzeichneten Daten

Falls ausreichend Daten verfügbar sind, könnte auch maschinelles Lernen zur Klassifizierung von Szenarien für eine erste Evaluation genutzt werden. Während des Trainings sollten Falsch-Negative vermieden werden, indem eine Kostenmatrix verwendet wird, die solche Ereignisse bestraft. Für die Klassifizierung wird eine Ordinalskala vorgeschlagen, mit welcher das Szenario als unkritisch, leicht kritisch und kritisch klassifiziert werden kann. Für ein Einscherszenario wurden die Metriken WTTC, Time-Headway, Time-to-Steer und Collision Index (CI=v^2/TTC) bevorzugt, unter Verwendung von Methoden der Merkmalsauswahl. Mit mehr verfügbaren Daten könnte ein trainiertes Klassifizierungsmodell den vorgeschlagenen Filter durch reine WTTC ersetzen.

(9) Logische Szenarien & Parameterraum

Die zuvor definierten logischen Szenarien werden in diesem Datencontainer gemeinsam mit ihren aus Messdaten extrahierten Varianten gespeichert. Logische Szenarien sind eine abstrakte Beschreibung eines Verkehrsszenarios. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass nicht alle Szenarioelemente, wie etwa Abstände oder Geschwindigkeiten, einen konkreten Wert haben. Stattdessen werden einige Werte offengelassen und es werden nur Parameterbereiche spezifiziert. Welche Parameterkombinationen wie oft auftreten, kann aus Messdaten entnommen werden. Mehrere Komponenten sind erforderlich, um diese logischen Szenarien gemeinsam mit den aus Messdaten gewonnenen Varianten (konkrete Szenarien) speichern zu können. Zunächst werden Parameter aus der Modellierung der logischen Szenarien abgeleitet, welche die konkreten Merkmale der Szenarien eindeutig beschreiben. Diese Parameter werden dann im Extraktionsschritt für die gefundenen Szenarien automatisch bestimmt. Um die modellierten Szenarien in Simulationen oder auf dem Testgelände nutzen zu können, werden Vorlagen in OpenSCENARIO und OpenDRIVE erzeugt. Diese Vorlagen werden für jedes Szenario manuell erzeugt und in der Datenbank gespeichert.

Nachdem in den vorherigen Prozessschritten Szenarien gefunden und aus Messdaten, z.B. von Testfahrten, extrahiert worden sind, werden sie in diesem Datencontainer gespeichert. Szenarien müssen allerdings nicht nur extrahiert werden, sie müssen auch in der Simulation und auf dem Testgelände wiedergegeben werden können. Einerseits ist es wichtig, dass ein in Messdaten gefundenes Szenario, einschließlich der statischen Umgebung, algorithmisch korrekt extrahiert und modelliert werden kann. Andererseits ist mindestens genauso wichtig, dass diese Szenarien technisch beschrieben werden können, damit die Ereignisse präzise reproduziert werden können und das zur Beschreibung verwendete Format in der Simulation und auf dem Testgelände genutzt werden kann.

Im Rahmen dieses Projekts werden die beiden Beschreibungsformate OpenDRIVE und OpenSCENARIO für diese Aufgabe eingesetzt. Beide Formate sind offene Standards und basieren auf der XML-Beschreibungssprache. Sie lösen das Problem, dass ein offener Standard zur Beschreibung der statischen und dynamischen Umgebung benötigt wird. So kann innerhalb der Datenbank eine einzige Kombination von Standards genutzt werden, um Daten aus unterschiedlichen Quellen wie FOT, NDS oder Simulationen zu aggregieren und sie simultan auf dem Testgelände oder in Simulationen unterschiedlicher Anbieter zu nutzen.

OpenDrive wurde 2005 veröffentlicht und ermöglicht die Beschreibung einer statischen Umgebung mit Fokus auf Straßen. So können individuelle Straßenelemente wie gerade Linien und Kurven parametriert und mit anderen Elementen kombiniert werden, um vollständige Strecken zu erstellen. OpenSCENARIO wurde 2014 eingeführt und während des PEGASUS-Projekts weiterentwickelt. Anders als OpenDRIVE wird OpenSCENARIO zur Beschreibung der zeitlich dynamischen Elemente eines Szenarios genutzt. Zum Beispiel wird die Position einer Ampel in OpenDRIVE definiert, während ihre Schaltzeiten in OpenSCENARIO definiert werden. Der Fokus liegt jedoch auf den Fahrzeugen selbst. So werden Fahrzeuge zum Beispiel in Katalogen definiert und auf einer Strecke positioniert, die in OpenDRIVE referenziert wird. Das Verhalten der Fahrzeuge im Szenario kann mit einer Geschichte beschrieben werden. Fahrzeugaktionen können ausgelöst werden, wenn Voraussetzungen eintreten. Die Aktionen umfassen zum Beispiel eine seitliche Bewegung zum Fahrstreifenwechsel auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen. Einem Fahrzeug kann lediglich ein neuer Zielfahrstreifen gegeben werden, die quergerichtete Bewegung kann durch geometrische Stammfunktionen beschrieben werden oder aber durch eine Trajektorie in Form einer Liste von Positionen präzise angegeben werden.

Obwohl OpenDRIVE und OpenSCENARIO technisch leistungsfähig genug zur Definition von Szenarien sind, gibt es immer noch Raum für Verbesserungen. Zum Beispiel ist die Definition von Strecken in OpenDRIVE oft zeitaufwändig, insbesondere für komplexere Strecken. Aus diesem Grund hat DLR die SimpleRoad-Beschreibungssprache eingeführt. Dies erleichtert die Generierung von Strecken, indem eine kürzere und leichter verständliche Beschreibung geliefert wird. Daten im SimpleRoad-Format können durch einen mitgelieferten Konverter in OpenDRIVE übertragen werden.

Selbst bei der Beschreibung der dynamischen Elemente eines Szenarios in OpenSCENARIO müssen in der aktuellen Version im Hinblick auf die Parametrierung Kompromisse eingegangen werden. Dies wird am Beispiel der Beschreibung einer Fahrstreifenwechsel-Trajektorie deutlich. Innerhalb des Szenariokonzepts werden Fahrstreifenwechsel durch Polynome vierten Grades beschrieben. Da die aktuelle Version des OpenSCENARIO-Standards diese jedoch nicht als geometrische Stammfunktionen unterstützt, muss eine solche Trajektorie als Liste von Positionen definiert werden. Das ermöglicht die Verwendung des Polynoms für Fahrstreifenwechsel, doch diese Trajektorie kann nicht mit ein paar Parametern in OpenSCENARIO selbst beschrieben werden. Andererseits können unterstützte geometrische Formen wie gerade Linien einfach durch Parameter modifiziert werden, was eine wichtige Voraussetzung für stochastische Variation ist. Die Lösung für dieses Problem ist es, die Einführung von nicht-standardkonformen Elementen in OpenSCENARIO zu erlauben. Für diese muss allerdings ein geeignetes Skript bereitgestellt werden, das durch einen eingeführten *Transpiler* ausgeführt wird und die neue Definition in standardkonformes OpenSCENARIO übersetzt. So können neue Manöver und andere Elemente einfach integriert und zur Evaluation an Partner verteilt werden, bevor sie schließlich zu guter Letzt in den Standard integriert werden.

Diese Datenformate (OpenDRIVE und OpenSCENARIO) und Erweiterungen (SimpleRoad und *Transpiler*) werden zur Definition der logischen Szenarien genutzt. Wie bereits erwähnt wurde, wird nicht allen Parametern ein konkreter Wert zugeordnet. Da Elemente wie Abstände und Geschwindigkeiten in einem logischen Szenario nicht festgelegt sind, werden in den Dateien an diesen Stellen Platzhaltervariablen spezifiziert. Bevor die Szenarien zum Beispiel für eine Simulation verwendet werden können, müssen diese Variablen durch konkrete Werte ersetzt werden, so dass ein konkretes Szenario aus dem logischen Szenario erzeugt wird.

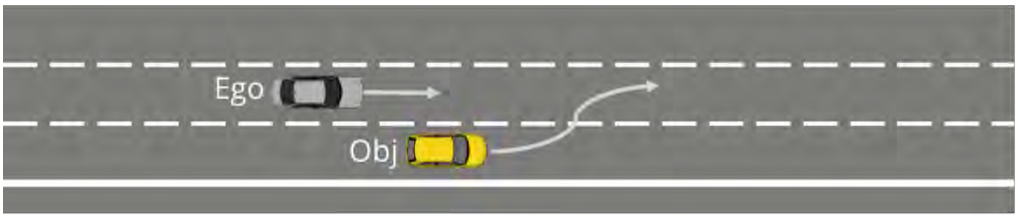


Abbildung 35 Illustration des Rechtseinscherer-Szenarios

Tabelle 9 Zur Beschreibung des Rechtseinscherer-Szenarios in OpenScenario genutzte Parameter

	Beschreibung	OpenSCENARIO-Parameter
dx_i	Ausgangsabstand	L4_Obj_Position_Initial
$y_{e,i}$	Ausgangsposition Ego auf Fahrstreifen	L4_Ego_Lateral_Offset_Initial
$y_{o,i}$	Ausgangsposition Obj auf Fahrstreifen	L4_Obj_Lateral_Offset_Initial
$y_{o,f}$	Endposition Obj auf Fahrstreifen	L4_Obj_Lateral_Offset_Final
$v_{e,i}$	Ausgangsgeschwindigkeit Ego	L4_Ego_Speed_Initial
$v_{o,i}$	Ausgangsgeschwindigkeit Obj	L4_Obj_Speed_Initial
$v_{o,f}$	Endgeschwindigkeit Obj	L4_Obj_Speed_Final
dt_o	Dauer	L4_Obj_LC_Duration

Als Beispiel wird ein einzelner Einscherer von rechts betrachtet, wie in Abbildung 35 gezeigt wird. Für die dynamischen Elemente dieses logischen Szenarios waren insgesamt acht Parameter erforderlich, die in

Tabelle 9 aufgelistet sind. Wenn für jeden Parameter ein Wert definiert ist, kann die in diesem Szenario gezeigte Fahrzeugkonstellation eindeutig beschrieben werden. Die Gesamtheit aller möglichen Parameterkombinationen ist der Parameterraum. Dieser enthält alle möglichen Variationen dieses einen Szenarios. Nachdem zum Beispiel ein Einscherer von rechts in den Daten ermittelt wurde, werden die Werte aller Parameter anhand der Trajektorien bestimmt und gespeichert. Nachdem dies für eine große Menge von Szenarien durchgeführt worden ist, können in den nächsten Prozessschritten Analysen durchgeführt werden, zum Beispiel im Hinblick auf die Häufigkeit gewisser Merkmale, um die Befunde für die Simulation zu nutzen.

(10) Integration von Pass/Fail-Kriterien

Pass/Fail-Kriterien werden als feste Schwellenwerte implementiert. Diese Schwellenwerte werden mithilfe von funktionsgeprägten Formaten abgebildet Zu diesem Zweck wurde eine vereinheitlichte Sprache definiert, die grundlegende Operatoren und Funktionen bietet. Solange für alle Zeitschritte innerhalb des Tests die Grenzwerte eingehalten oder unterschritten werden, gilt der Test als bestanden Das Format basiert auf Matlab-Funktionen zur Verringerung des Implementierungsaufwands, der für die Integrierung von Pass/Fail-Kriterien in bestehende Testwerkzeugketten erforderlich ist.

```
<PassFailCriterias>
    <PassFail>idn_PositionX.Value &gt; 0</PassFail>
    <PassFail>idn_PositionY.Value &gt; 0</PassFail>
</PassFailCriterias>
```

Abbildung 36 Integration von Pass/Fail-Kriterien

(11) Logischer Testfallraum

Die Ergebnisse der Datenbankverarbeitungskette werden im Datencontainer der logischen Testfälle gespeichert. Dieser Container enthält die Testfälle, die für die hochautomatisierte Fahrfunktion oder das allgemeine Testobjekt relevant sind, basierend auf allen verfügbaren Informationsquellen. Die Testfälle werden in den technischen Formaten OpenDRIVE, OpenSCENARIO und einem Format zur Parametrisierung des logischen Szenarios gespeichert.

(12) Anwendung Testkonzepts inkl. Variationsmethode

Testkonzept

Die PEGASUS-Testmethode ist im allgemeinen V-Modell oben rechts angesiedelt (siehe Abbildung 37). Es ist wichtig festzuhalten, was diese Testmethode abdeckt bzw. nicht abdeckt.

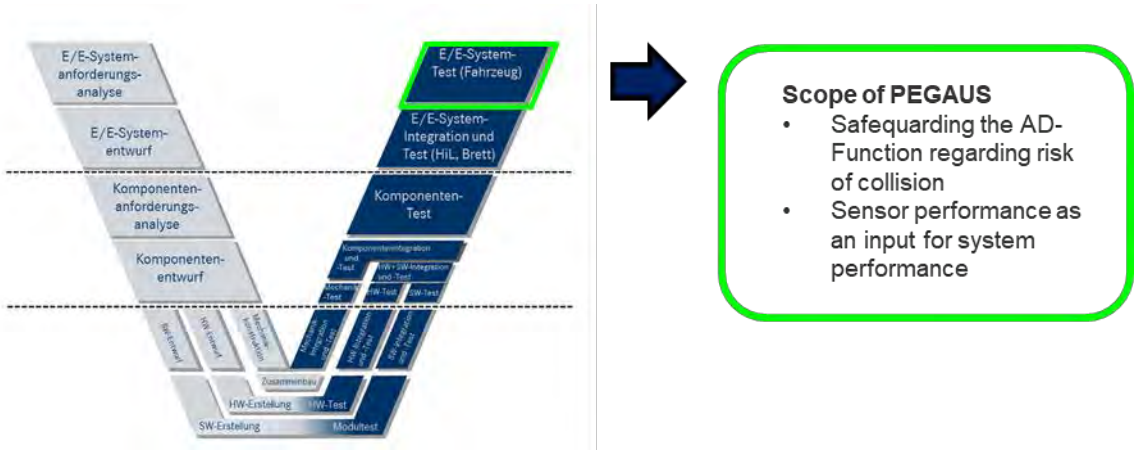


Abbildung 37 Die PEGASUS-Testmethode innerhalb des allgemeinen V-Modells

Die PEGASUS-Testmethode deckt folgendes ab:

- Absicherung der autonomen Fahrfunktion im Hinblick auf das Kollisionsrisiko
- Sensorleistung als Input für Systemleistung

Folgendes wird nicht abgedeckt:

Andere HAF-relevante Themen, die durch OEM, Zulieferer-Tests oder Vorschriften abgedeckt werden: (Beispiele)

- Tests gemäß ISO26262
- Direkte Absicherung der Sensorleistung
- Absicherung
    - Interaktion mit Fahrer (HMI, ...)
    - Einhaltung der Verkehrsregeln

Ziel des Testkonzepts ist die Entwicklung einer Methode zur Erzeugung von Evidenz im Hinblick auf die Absicherung eines Stufe-3-Systems (*Autobahn-Chauffeur*, max. 130 km/h). Die verwendeten Testinstanzen werden in Abbildung 38gezeigt.

Der Input für das Testkonzept ist eine Reihe von logischen Testfällen mit zugehörigem Parameterraum inkl. Exposition von Parametern und Pass/Fail-Kriterien sowie spezielle konkrete Szenarien (zum Beispiel zu Zertifizierungszwecken, Unfalldaten, Automationsrisikenanalyse falls im beschriebenen Kontext testbar (siehe oben)).

Der erwartete Output sind evaluierte Szenarien und die Unfallwahrscheinlichkeitsszenarien (mit Unfallschwere). Ausgehend vom logischen Testfallraum (= logische Szenarien + Parameterraum + Pass/Fail-Kriterien + Exposition der Parameter) werden Testfälle zu Testvalidierungsstufen zugeordnet.

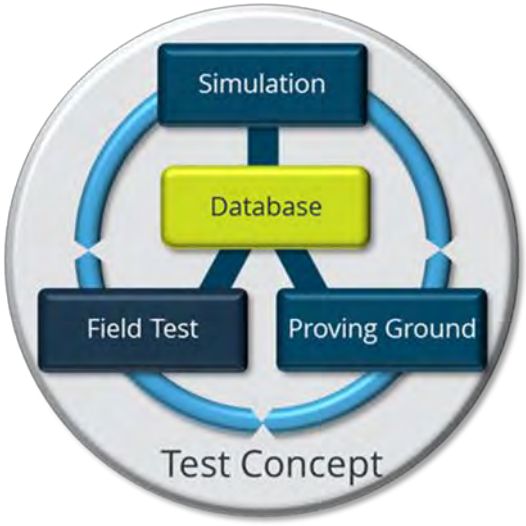


Abbildung 38 Testinstanzen und Datenfluss in der PEGASUS-Testmethode

Ausgehend vom Testfallraum werden die Testfälle den PEGASUS-Testinstanzen zugeordnet.
Hierdurch werden „alle“ logischen Szenarien in der Simulation getestet, um eine hohe Effizienz zu erreichen. Auf Grundlage der automatisierten/stochastischen Variation der zum logischen Szenario gehörenden Parameter werden konkrete Testfälle erzeugt. Diese konkreten Testfälle werden gemäß den Pass/Fail-Kriterien bewertet.

Interessante oder kritische Fälle (d.h. Pass-Kriterien nicht erfüllt oder nur knapp erfüllt) werden in echten Fahrzeugen auf einem **Prüfgelände** nochmals getestet bzw. validiert. Zusätzlich können manuell ausgewählte konkrete Testfälle auf dem Testgelände evaluiert werden (z.B. Tests gemäß ECE R79 oder Rating-Tests).

Bei **Feldtests** können keine expliziten Testfälle aus dem logischen Testfallraum getestet werden. Stattdessen wird das Verhalten der Fahrfunktionen im realen Verkehr getestet, wobei durch die Vorgabe von Strecke, Witterung oder Uhrzeit Herausforderungen für die HAF-Funktion erzeugt werden können. Das wesentliche Ziel ist hierbei „Überraschungen“ zu finden (z.B. neue Szenarien, neue Parameter) und Messdaten zur weiteren Analyse in Replay2Sim zu erzeugen

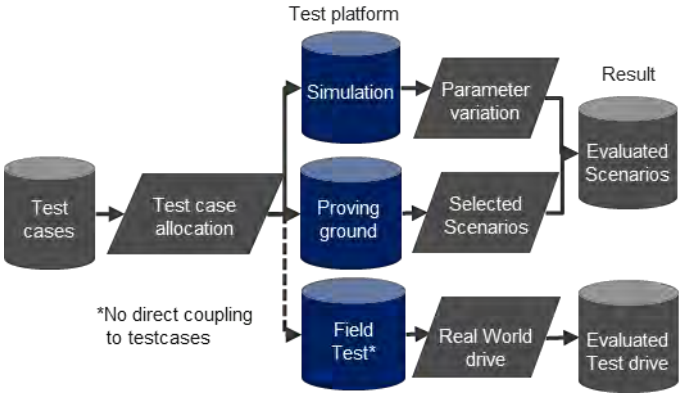


Abbildung 39 Testfallzuordnung

Wie läuft die Testfallzuordnung ab und wie funktioniert das Testverfahren?

Testfallzuordnung:

- **Simulation:**
  - Die Vielzahl der logischen Testfälle beim szenariobasierten Testen haben nur eine geringe Relevanz in Bezug auf die reale Sensorleistung.
- **Prüfgelände:**
  - Vorselektierte Tests, z.B. Zertifizierungstests
  - Test mit hoher Relevanz hinsichtlich Fahrdynamiken und echter Sensorleistung
  - Seltene Ereignisse, die in Feldversuchen kaum zu beobachten sind
- **Feldversuche:** Tests mit hoher Relevanz hinsichtlich der realen Systemleistung unter einer Vielzahl variierender Umgebungsbedingungen

Die Abwandlung von Testfällen für die Simulation erfolgt durch stochastische Parametervariation bzw. Testautomatisierung, für das Testgelände auf Grundlage manueller Selektion oder der Identifikation relevanter Szenarien innerhalb der Simulation.

Testergebnis:
Auf Grundlage der Pass/Fail-Kriterien evaluierte konkrete Szenarien für Simulation, Testgelände und Feldversuch Wahrscheinlichkeit von Unfallszenarien

Test-Ende-Kriterien für die Simulation (Vorschlag):

- Transferfunktion zwischen Szenarioparametern (Input) und Testergebnis (Output, z.B. Unfall ja/nein, Abstand zwischen Ego-Fahrzeug und relevantem Zielfahrzeug) erzeugen:

  Zielwert für Qualität der Transferfunktion (z.B. R_Qd-value) ≥ 80 %*

- Standardabweichung σ von der berechneten Wahrscheinlichkeit von Unfallszenarien berechnen:

  Zielwert für σ ≤ 20%* (*gemäß State-of-the-Art)

Ausgehend vom logischen Testfallraum werden die Testfälle und Teststufen zugeordnet. Hierdurch werden „alle“ logischen Szenarien innerhalb des logischen Testfallraums in der Simulation getestet. Auf Grundlage der automatisierten/stochastischen Variation der zum

logischen Szenario gehörenden Parameter werden konkrete Testfälle erzeugt. Diese Testfälle werden nach den Pass/Fail-Kriterien bewertet. Beispiele für diese Kriterien sind in Abbildung 5 zu sehen. Kritische Fälle (d.h. Pass-Kriterien nicht erfüllt oder nur knapp erfüllt) werden in echten Fahrzeugen auf einem Prüfgelände bewertet. Zusätzlich können manuell ausgewählte konkrete Testfälle auf dem Testgelände evaluiert werden (z.B. Unfallszenarien, Rating- oder Zertifizierungstests). Bei Feldtests können keine expliziten Testfälle aus dem logischen Testfallraum getestet werden. Stattdessen wird das Verhalten von Fahrfunktionen im Realverkehr getestet.

Wesentliches Ziel ist das Finden von „Überraschungen“ (d.h. neue Szenarien, neue Parameter). Diese Überraschungen können durch Vorgabe von Strecken (z.B. Tunnel) oder Tageszeiten (tiefstehende Sonne) provoziert werden und können in Replay2Sim weiter analysiert werden.

Test der HAF-Funktion im Realverkehr (Langzeiterprobung)

- Identifizierung expliziter Einzelsituationen im Rahmen der ereignisbasierten Simulation
- Identifizierung von Fehlern/Beeinträchtigungen des Systems als Resultat von Umwelteinflüssen, die derzeit nicht direkt mithilfe von Modellen simuliert werden können, da noch keine geeigneten Physikmodelle zur Verfügung stehen.
- Durchführung spezieller „*Bestehens*“-Bewertungen (z.B. Risiko beim Überholen oder Folgen anderer Fahrzeuge)

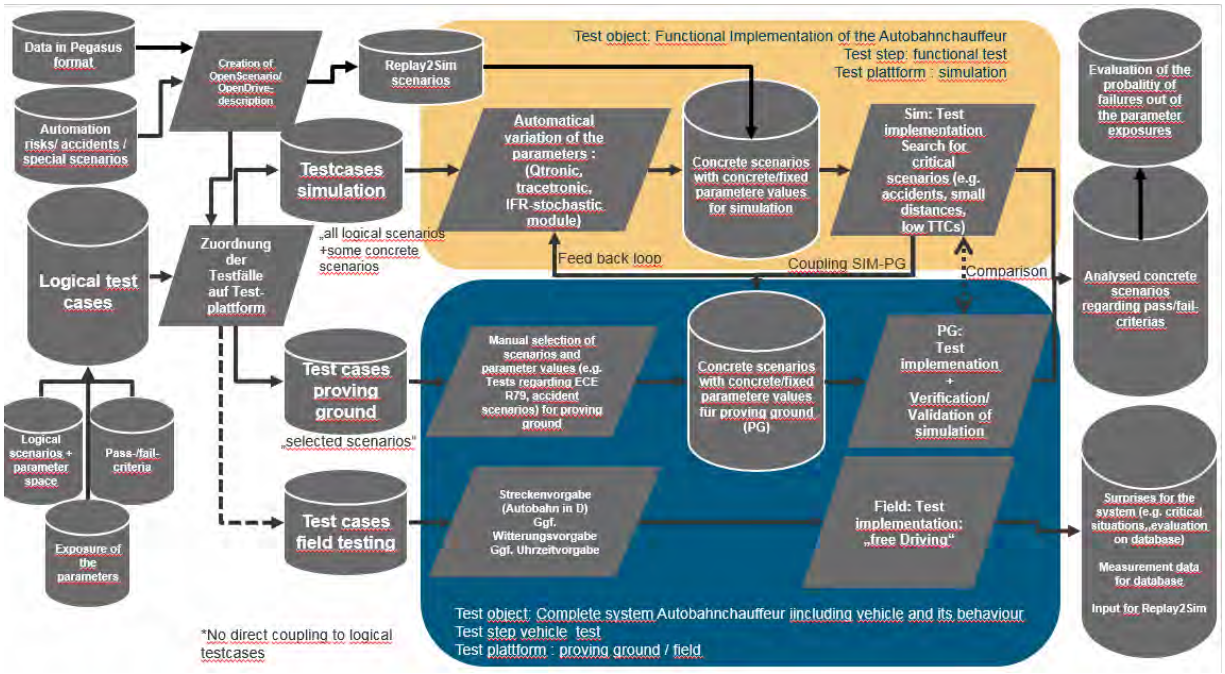


Abbildung 40 Testkonzept im Detail

Abbildung 41 Beispiele für PASS/FAIL-Kriterien

Variationsmethode

Der Verarbeitungsschritt der stochastischen Variation spielt eine zentrale Rolle innerhalb des Konzepts einer szenariobasierten Bewertung einer automatisierten Fahrfunktion. Liegt ein Szenariodatenmodell mit allen relevanten Parameterräumen sowie zusätzliches apriorisches Wissen über diese Räume aus einer zentralen Datenbank vor, dann ist es die Hauptaufgabe der Variationsmethode, alle relevanten kritischen Parameterteilmengen innerhalb jedes logischen Szenarioraums zu finden. Gemäß dem *PEGASUS*-Testkonzept wird diese Variation vor allem innerhalb der Simulation angewandt, da dies die einzige Testinstanz ist, die eine große Menge von Tests zu relativ niedrigen Kosten abhandeln kann. Die stochastische Variation der Parameter in allen relevanten logischen Szenarioräumen bietet die vollständigste Erforschung des extrem großen Szenarioraums, welcher die von der automatisierten Fahrfunktion zu bewältigende Realität repräsentiert. Die Variation und die Simulation sollten eine Beschreibung aller relevanten kritischen Szenarioteilräumen liefern. Diese Beschreibung oder sogenannte Charakterisierung der identifizierten kritischen Teilräume einschließlich des Wissens über ihre Eintrittswahrscheinlichkeit wird dann an die Risikobewertung weitergegeben, wo diese Ergebnisse dann zu einem Gesamtrisikomaß verarbeitet werden. Dieses Risikomaß ist die Grundlage des *PEGASUS*-Sicherheitsarguments.

Ist ein logischer Testfall gegeben (z.B. OpenSCENARIO, OpenDRIVE, Parameterraumbeschreibung und Metriken für die Sicherheitsbewertung der Simulationsergebnisse), so können die Ziele der Parametererforschung als eines der folgenden definiert werden:

1. Einen oder mehr Schlimmstfälle der Sicherheitsmetriken im definierten Parameterraum finden. Dies kann als Optimierungsproblem definiert werden.
2. Den Teilraum der Parameterwerte charakterisieren, in dem eine Metrik einen Sicherheitsverstoß meldet.
3. Die Wahrscheinlichkeit eines Sicherheitsverstoßes im definierten Parameterraum quantifizieren (z.B. einen Näherungswert ermitteln), falls möglich auch mit einem Konfidenzmaß für den Wahrscheinlichkeitswert.

Eine Kombination von Algorithmen, welche die Ziele (1) und (2) verfolgen, kann auch dazu verwendet werden, um Evidenz dafür zu erbringen, dass innerhalb des wahrscheinlichsten Parameterwert-Teilraums keine Sicherheitsverstöße geschehen – für den Fall, dass die Suche in diesem Teilraum keine Szenarien ergibt, welche die Sicherheitsgrenzen verletzen.

Formaler ausgedrückt, kann der Input eines Algorithmus zur Parametererforschung wie folgt definiert werden:

- N *Parameter* {P1, ..., Pn} mit gemischten diskreten und stetigen Wertebereichen und definierten Min-Max-Grenzen.
- Eine oder mehrere *Sicherheitsmetriken* {M1, M2, ... }, wie etwa Time-To-Collision (TTC), Distance-To-Collision (DTC) und andere.

- Optional kann die Parameterbeschreibung *Bedingungen* für Parameterwerte einschließen, wie etwa p1 < p2.
- Die Parameterbeschreibung kann auch vorherige *Wahrscheinlichkeitsverteilungen* und *Korrelationen* unter den Parameterwerten einschließen – ein benötigter Input für alle Erforschungsmethoden, welche die Bewertung der integrierten Wahrscheinlichkeit von Sicherheitsverstößen zum Ziel haben.

Damit die Simulationsergebnisse für eine Sicherheitsargumentation von Nutzen sind, müssen die folgenden Eigenschaften der Simulationsmodelle, der Eingangsdaten und der logischen Szenarien sichergestellt werden:

- Das Simulationsmodell muss realistisch sein, d.h. es muss Ergebnisse liefern, die der Realität nahekommen.
- Die Parameter mit Einfluss auf die Funktion/Sicherheit müssen vollständig sein (d.h. es darf kein wichtiger Parameter/Effekt fehlen), und darüber hinaus müssen auch die Min-Max-Grenzen korrekt sein.
- Die Metriken müssen eine realistische Sicherheitsbeurteilung liefern.
- Falls die vorherigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen in der Argumentation genutzt werden, müssen die Verteilungen aus Daten mit ausreichender statistischer Relevanz abgeleitet werden.

Testabdeckung

Abdeckungsmaße dienen der Definition von Vollständigkeitskriterien für einen Test. Für die Bewertung automatisierter Fahrfunktionen auf Systemebene existieren bislang keine anerkannten Maße für die Testabdeckung. Aufgrund der Tatsache, dass eine vollständige Charakterisierung des Parameterraums wegen seiner Komplexität unmöglich ist, ist die Annahme vernünftig, dass, selbst wenn in Zukunft eine oder mehr Abdeckungsmaße definiert und für die HAF-Sicherheitsbewertung empfohlen werden sollten, diese als Unvollständigkeitsindikatoren genutzt würden, nicht als Vollständigkeitsindikatoren.

In den durchgeführten Experimenten zur Parametererforschung verwendete Metriken

In *PEGASUS* haben wir eine Reihe von einfachen Metriken für die Identifizierung der Kritikalität von Szenarien in Betracht gezogen. Diese Metriken repräsentieren alle eine Art der Abstandsmessung, z.B. den Abstand selbst, den Time Headway, die Time-To-Collision oder Time-To-React. Zwei Beispielmetriken, mit denen experimentiert wurde und die in den folgenden Abschnitten zur Illustration verwendet werden, sind folgende:

- Time-To-Collision (TTC) – keine Bewertung des Schweregrads
- Time-To-Collision-Collision-Speed (TTC_VCOL) – verwendet die relative Kollisionsgeschwindigkeit zur Schweregradbeurteilung im Falle einer Kollision. Die Werte werden so definiert, dass sie gleich
  - TTC sind, wenn TTC > 0
  - – (abs(relative Kollisionsgeschwindigkeit)), wenn TTC = 0.

Untenstehende Abbildung 42 vergleicht die Wirkungsflächen der beiden Metriken in einem Experiment.

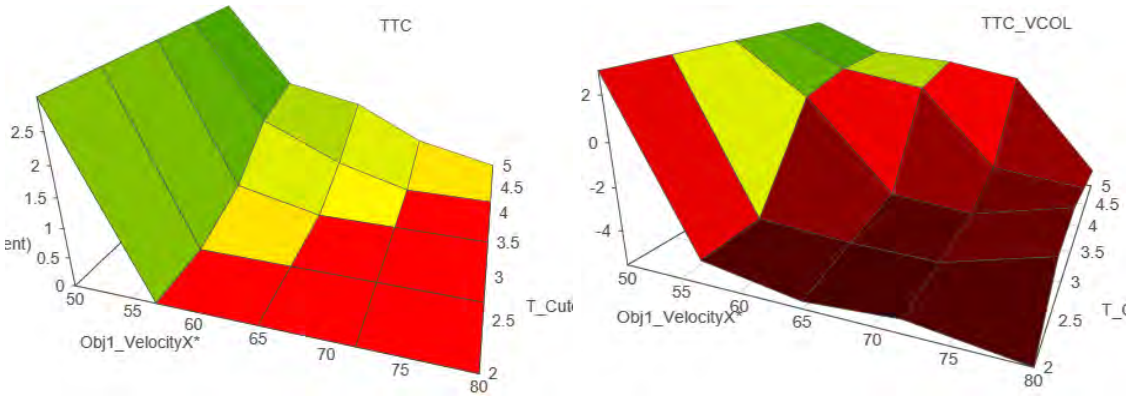


Abbildung 42 Grafische Darstellungen der Wirkungsflächen für TTC (links) und TTC_VCOL (rechts)

Wie die obenstehende Abbildung illustriert, bietet eine Metrik, die Schweregrade unterscheiden kann, mehr Informationen und mehr Struktur für den Suchraum und ist beispielsweise für die Suche nach Schlimmstfällen wahrscheinlich sinnvoller.

Definitionsbezogene und rechnerische Herausforderungen in Bezug auf die Metriken:

- Wie definiert man Metriken, die ein realistisches Maß der Sicherheitsverstöße ergeben, einschließlich des Schweregrads der Zwischenfälle? Die Berechnung der Metrikmodelle sollte keine zu hohen Rechenkosten mit sich bringen (z.B. wäre eine FEM-Unfallsimulation angesichts der großen Menge benötigter Szenariosimulationen wahrscheinlich nicht akzeptabel).
- Wie definiert man glatte Metriken, die effizientere Optimierungsalgorithmen ermöglichen?
- Wie definiert man Metriken, die nicht mehrere falsche lokale Minima oder große „Plateaubereiche“ aufdecken?
- Wie skaliert man mehrere Metriken, um vergleichbare Werte zu erhalten, falls in einem logischen Szenario mehrere Metriken verwendet werden sollen?
- Man sollte sich auch bewusst sein, dass Stichprobeneffekte und numerische Fehler in den Simulatoren die Identifizierung eines Nulldurchgangs (zum Beispiel für TTC) erschweren können.

Falls in der Analyse eines logischen Szenarios mehr als eine Sicherheitsmetrik verwendet werden soll, müssen die jeweiligen Outputs der Metriken idealerweise miteinander vergleichbar sein. Da sich alle Metriken auf die Sicherheit eines Szenarios beziehen, könnte eine Skalierung der Metrik-Outputs, z.B. zwischen [-1, 1], eine mögliche Lösung sein (zum Beispiel als Kombination des Maßes für den Abstand zu einem Zwischenfall und eines Maßes des Schweregrads – es ist zu berücksichtigen, dass die Schwere eines Ereignisses bei einer Failure Mode and Effects Analysis (FMECA) anhand von 10 Schweregraden bewertet wird.

Worst-Case-Fälle & Optimierungsalgorithmen finden

Es gibt eine große Menge von Optimierungsalgorithmen, die für die Suche nach Sicherheitsverstößen beziehungsweise Schlimmstfällen der Szenario-Schwere unter Verwendung der Metriken genutzt werden können. Der Output eines Optimierungsalgorithmus kann für gewöhnlich nicht zur Charakterisierung des definierten Parameterraums verwendet werden – es sei denn, es wurde kein Sicherheitsverstoß gefunden und es kann ein Argument hinsichtlich der Abdeckung des abgesuchten Raums konstruiert werden. Die folgenden Eigenschaften der Wirkungsfunktion, d.h. hier die Sicherheitsmetrik(en), können verschiedene Klassen von Optimierungsalgorithmen vor

Herausforderungen stellen[3]. Daher sollten diese Eigenschaften untersucht und ihr potenzieller Effekt in den Evaluationsergebnissen beurteilt werden.

- Plateau-Teilräume: Dies sind Teilräume, in denen die Metriken einen konstanten Wert haben und keine Orientierung im Hinblick auf Sicherheitsverstöße oder Schlimmstfälle bieten.
- Multiple (suboptimale) lokale Minima: Wenn zum Beispiel die TTC als Metrik verwendet wird, ist es abhängig von ihrer Implementierung möglich, dass jedes Mal, wenn das Ego-Fahrzeug ein anderes Auto/Verkehrsobjekt passiert, ein lokales Minimum erreicht wird – selbst wenn die Autos auf parallelen Fahrstreifen fahren und kein hohes Kollisionsrisiko besteht. Die Suche um lokale Minima herum kann viele Ressourcen verschlingen.
- Abrupte Änderungen der Sicherheitsmetriken oder Singularitäten: Solche „Inseln mit hohem Schweregrad“ können schwer aufzuspüren sein.

Es wurden mehrere Optimierungsalgorithmen implementiert und analysiert. Zwei Optimierungsalgorithmen sind:

- Lokale Suche (LS) und
- KD-OPT Gradientenoptimierung (KD-OPT)

Lokale Suche

Dies ist eine Variante des klassischen Optimierungsalgorithmus „Simulierte Abkühlung“. Von einem gegebenen Startpunkt aus sucht der Algorithmus nach benachbarten Punkten und folgt dem bislang besten/schlimmsten gefundenen Fall. Es können gemischte diskrete und stetige Parameter sowie (einfache) Bedingungen zwischen den Parameterwerten unterstützt werden.

Der Algorithmus wird durch seinen Startpunkt (Seed), den relativen Abstand, in dem benachbarte Punkte generiert werden und die zu generierende Gesamtmenge der Punkte (konkrete Szenarien) spezifiziert. Die generierten Punkte werden von lokalen oder globalen Minima attrahiert. Die Wahl der Konfigurationsparameter kann das Ergebnis des Algorithmus beeinflussen (welches lokale/globale Minimum gefunden wird). Je höher die Dimensionalität des Problems (Parameteranzahl) und je größer der Abstand zwischen dem Startseed und einem lokalen/globalen Minimum ist, desto mehr Simulationspunkte werden für die Annäherung an einen Lösungspunkt benötigt.

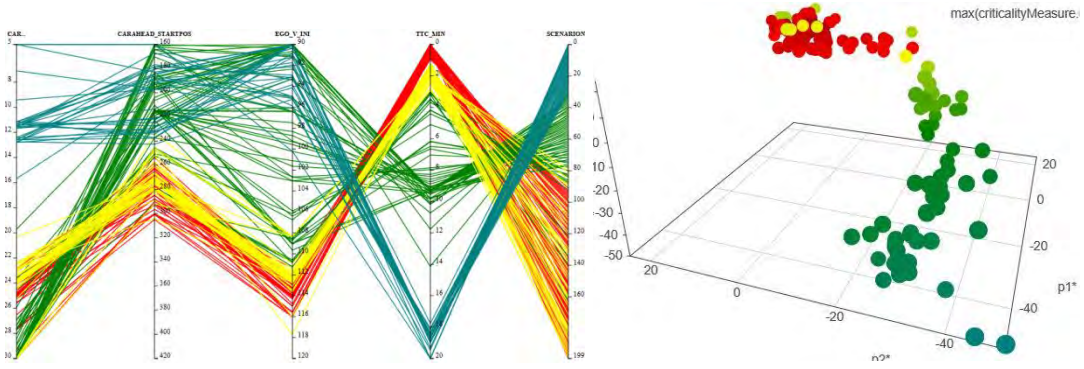


Abbildung 43 Output des LS-Algorithmus, dargestellt mit parallelen Koordinaten (links) und einer 3D-Punktwolke (rechts)

[3] Multiple Neustarts mit zufälligen Startpunkten können die erwähnten Schwächen der Optimierungsalgorithmen häufig zu einem gewissen Grad kompensieren.

Wenn die Wirkungsfunktionen mehrere lokale Minima aufweisen, kann der Algorithmus diese bis zu einem gewissen Grad immer noch überwinden und sich einer besseren Lösung annähern (allerdings ohne Garantie). Wenn die Wirkungsfunktion eine Region mit Plateauwerten aufweist, „durchwandern“ die generierten Punkte die Plateau-Region. Abhängig von der Größe der Region, der Anzahl der generierten Punkte und der relativen Abstände der generierten Nachbarn kann das Plateau überwunden werden oder nicht.

KD-Opt-Gradientenoptimierung für Teilräume

Dieser Algorithmus sucht iterativ entlang einzelner Achsen nach Schlimmstfällen, bis ein Konvergenzpunkt gefunden wird[4]. Dies führt oft zu einer direkteren Suche nach einem lokalen oder globalen Minimum, selbst bei größeren Parametermengen. Es können gemischte diskrete und stetige Parameter sowie (einfache) Bedingungen zwischen den Parameterwerten unterstützt werden.

Selbst in Fällen, in denen mehrere lokale Minima existieren, kann der Algorithmus die lokalen Minima immer noch „überspringen“ und ein globales Minimum finden - obgleich abhängig von der Form der Wirkungsfunktion nicht garantiert werden kann, dass ein globales Minimum gefunden wird. Plateau-Regionen der Wirkungsfunktion können oft ohne dramatische Probleme durchlaufen werden. Wenn der Schlimmstfall Teil einer Plateau-Region ist (zum Beispiel ein großer Teilraum mit TTC = 0), dann liefert dieser Algorithmus einen (zufälligen) Punkt in dieser Region als Ergebnis. Die Auswahl des Startpunkts (Seed) kann den gefundenen Schlimmstfall beeinflussen.

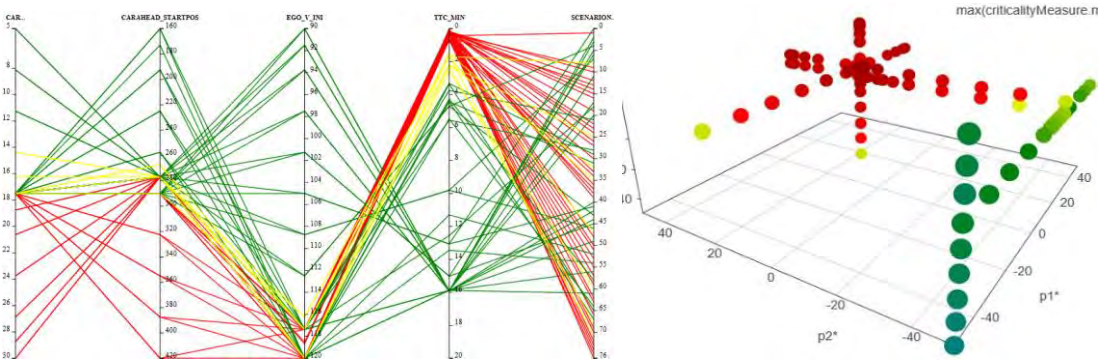


Abbildung 44 Abbildung 3. Output des KD-Opt-Algorithmus
Parallele Koordinaten (links) und 3D-Punktwolke (rechts)

Charakterisierungsalgorithmen

Ziel des Charakterisierungsalgorithmus ist es, Informationen über die Rückmeldung der Schweregrad-Metrik(en) im gesamten mit einem logischen Szenario verknüpften Parameterraum zu liefern. Dies ist im Allgemeinen wertvoller, als nur einen Schlimmstfall-Punkt zu finden, da es einer Sicherheitsbeurteilung des kompletten Parameterraums näherkommt. Zugleich ist das Lösen von Charakterisierungsproblemen mit einem größeren Rechenaufwand verbunden als das Lösen von Optimierungsproblemen. Deshalb müssen bei zunehmender Dimensionalität Kompromisse im Hinblick auf die Abdeckung des Parameterraums eingegangen werden. Dafür können die folgenden Charakterisierungsalgorithmen verwendet werden:

[4] Im Allgemeinen wird iterativ nach den Schlimmstfällen gesucht, bis ein Konvergenzpunkt gefunden wird, und zwar auf Achsen, Flächen und in Teilräumen bis zu einer maximalen Dimensionalität K.

- Fixed Sampling mit vollständigen oder partiellen Kreuzprodukten (FS)
- Adaptive Sampling mit vollständigen oder partiellen Kreuzprodukten (AS)
- Zufällige Generierung (RND)
- Mehrstufiger Strategiemix

Fixed Sampling mit vollständigen Kreuzprodukten

Dies ist ein klassisches Kreuzprodukt bei ausgewählten Parameterwerten. Es können gemischte diskrete und stetige Parameter sowie (einfache) Bedingungen zwischen den Parameterwerten unterstützt werden.

S=5 / N:	N=5 Parameter	N=10 Parameter	N=15 Parameter
S^N Szenarien	3.125	9.765.625	30.517.578.125
Simulationszeit	8,7 Stunden	3 Jahre	9677 Jahre
S=10 / N:	**N=5 Parameter**	**N=10 Parameter**	**N=15 Parameter**
Simulationszeit	11,6 Tage	3170 Jahre	$7600*10^6$ Jahre

Die Komplexität des Algorithmus ist für die Anzahl der Parameter exponentiell. Genauer gesagt ist die Gesamtanzahl der Parameterkombinationen im Kreuzprodukt $\mathbf{S^N}$, wenn man von N Parametern mit S Samplingpunkten pro Parameter ausgeht. Der exponentielle Anstieg der Anzahl der Wertekombinationen begrenzt die Tauglichkeit des Algorithmus auf kleine N (und S). Die obenstehende Tabelle zeigt die benötigte Zeit für eine vollständige Kreuzprodukterkundung von Szenarien, die 10s Simulation für diverse N- und S-Werte erfordern.

Der Algorithmus ist einfach zu implementieren und die Ergebnisse sind leicht verständlich, d.h. sie können mit einer Vielzahl von Visualisierungsdiagrammen dargestellt werden, einschließlich Projektionen als intuitive 3D-Punktwolken, wie in der Abbildung unten dargestellt.

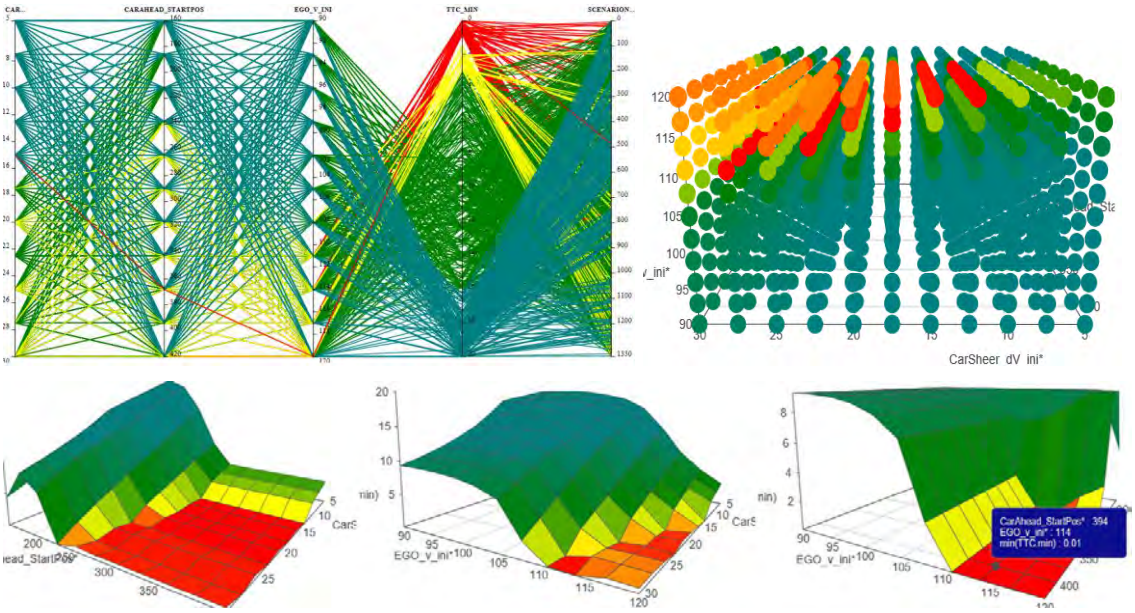


Abbildung 45 Output für Fixed Sampling mit vollständigen Kreuzprodukten

Obgleich der Algorithmus eine intuitive Charakterisierung des Raums für kleine N (und ausreichend große S) bietet, sollten wir erwähnen, dass der Schlimmstfall (wie er z.B. von Optimierungsalgorithmen gefunden wird) üblicherweise nicht im abgetasteten Raster enthalten ist. Um dies zu kompensieren, kann man natürlich den Algorithmus in Verbindung mit Optimierungsalgorithmen nutzen, die vor oder nach dem Fixed Sampling ausgeführt werden.

Fixed Sampling mit partiellen Kreuzprodukten (Größe K)

Dies ist eine Variante des Kreuzprodukt-Algorithmus, bei der die Größe der Kreuzprodukte auf maximal K Parameter begrenzt ist. Es können gemischte diskrete und stetige Parameter sowie (einfache) Bedingungen zwischen den Parameterwerten unterstützt werden.

Für N Parameter existieren C(N,K) Kombinationen von K Parametern, für welche jeweils ein Kreuzprodukt der Größe K erzeugt werden kann. Die Anzahl der generierten Wertekombinationen ist nur in K exponentiell, nicht aber für S; für Samplingpunkte pro Parameter heißt das z.B. $C(N,K)*S^K$.

K=2, S=10 / N:	5 Parameter	10 Parameter	15 Parameter	20 Parameter
Szenarien $C(N,2)*10^2$	1000	4500	10.500	19.000
Simulationszeit	2,7 Stunden	12,5 Stunden	29 Stunden	2,2 Tage
K=3, S=5 / N:	**5 Parameter**	**10 Parameter**	**15 Parameter**	**20 Parameter**
Szenarien $C(N,3)* 5^3$	1250	15000	56.875	142.500
Simulationszeit	3,5 Stunden	41,6 Stunden	6,6 Tage	16,5 Tage

Für kleines K kann man N erhöhen. Doch ist es „sicher“, die Größe der Kreuzprodukte von N auf K zu reduzieren? Abgesehen von einigen Fällen, in denen Teilmengen von Parametern nicht miteinander interagieren, ist die Reduzierung der Kreuzproduktgröße nicht garantiert „sicher“. Die untenstehende Abbildung zeigt die Reduzierung des abgetasteten Raums bei Reduzierung von K von 3 auf 2 Dimensionen: der Großteil des Volumens wird nicht abgetastet. Ist der Unterschied zwischen N und K größer, so verschwindet der getestete Teilraum buchstäblich im Inneren des Parameterraums. Sie können die untenstehende Abbildung mit den im vorherigen Abschnitt für das vollständige Kreuzprodukt generierten Diagrammen vergleichen - beachten Sie, dass hier N-K=1 ist.

Andererseits sollten wir die folgenden positiven Eigenschaften der FS-KD-Algorithmen erwähnen:

- können selbst für größere N-Werte genutzt werden
- Abdeckungsmaße für K Parameterkombinationen können demonstriert werden
- falls einige Parameter einen größeren Einfluss auf die Schweregradmetriken haben, können sie in eine Kreuzproduktmenge gesetzt werden, während die übrigen Parameter seriell um ausgewählte Punkte des signifikanteren Teilraums analysiert werden können (z.B. um Punkte mit Schlimmst- oder Grenzfällen, die aus der Analyse des signifikanteren Teilraums resultieren)

- eine intuitive 3D-Oberflächendarstellung der Wirkungsfunktion kann leicht erstellt werden. Dies erleichtert ein besseres Verständnis des Wesens der 2D/3D-Parameterinteraktionen, um auf iterative Weise eine Parametererforschungsstrategie entwickeln zu können.

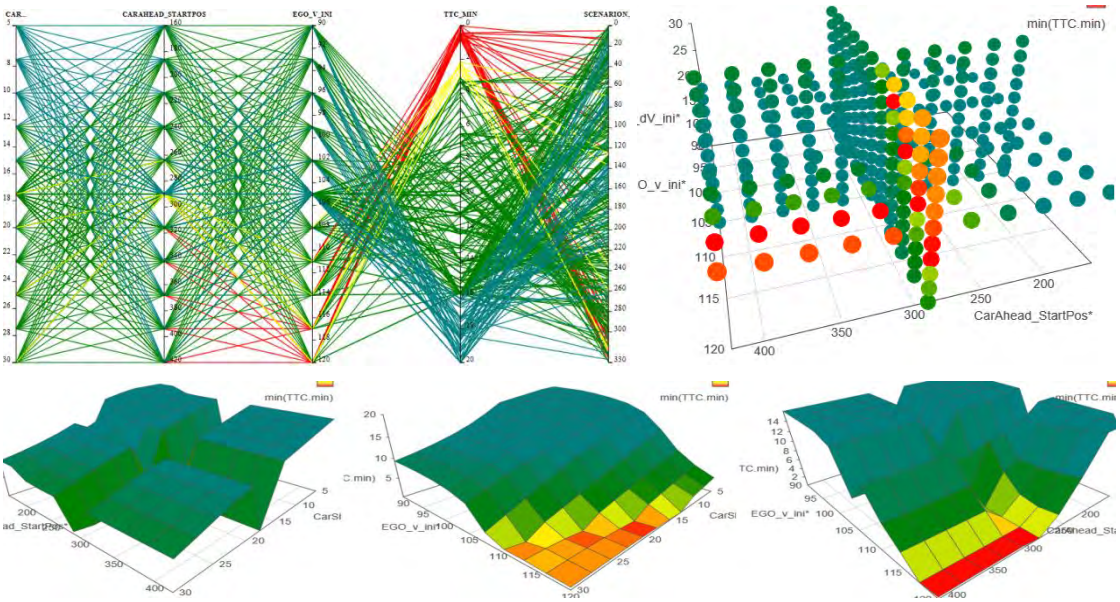


Abbildung 46 Outputs des FS-KD-Algorithmus.

Der Einfluss des Seedpunkts, um den herum die 2D/3D/KD-Projektionen erstellt werden, ist es wert, besprochen zu werden. Die untenstehende Abbildung zeigt die Ergebnisse des FS-KD (mit K=2), wenn der Seed (a) in der Mitte jedes Parameterbereichs liegt bzw. (b) an einem Punkt mit schlechtem Schwerewert liegt, der aus einer vorherigen Suche mit einem Optimierungsalgorithmus resultiert. Wie zu sehen ist, kommen die Projektionen des Schlimmstfall-Schweregrads jenen näher, die mit vollständigen Kreuzprodukten erhalten wurden, wenn die Projektionen um einen Schlimmstfallpunkt liegen. Falls das Ziel eine Fokussierung auf die Charakterisierung von Schweregrad-Verstößen ist, erscheint es also vernünftig, erst nach einem Schlimmstfall zu suchen und dann die FS-KD-Suche anzuwenden, wobei der Schlimmstfall als Seed verwendet wird.

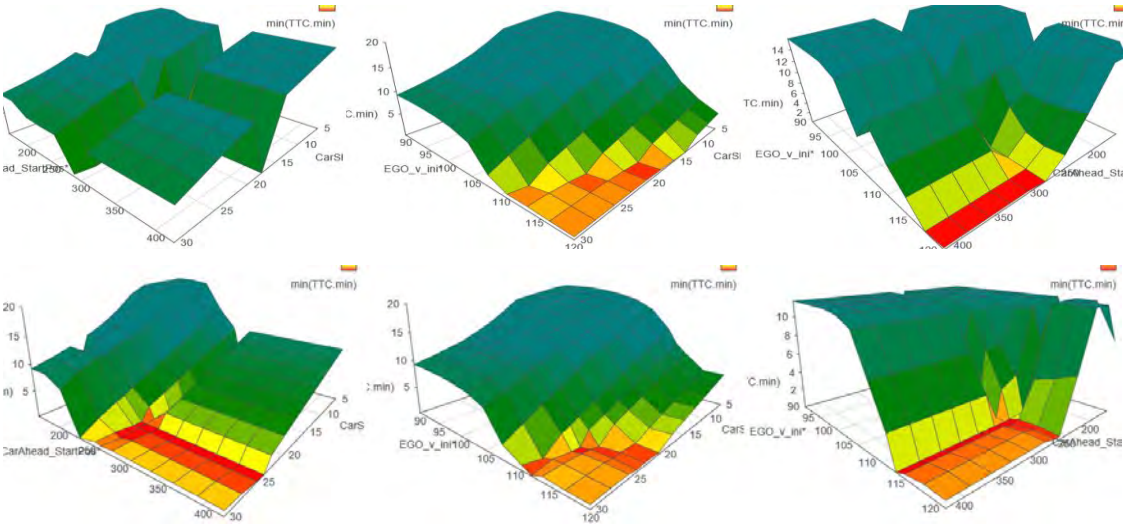


Abbildung 47 Einfluss des Startseeds auf FS-KD

Adaptive Sampling mit vollständigen/partiellen Kreuzprodukten

Adaptive Sampling hat zum Ziel, die lokalen Minima (lokalen Schlimmstfälle) sowie die Grenzen zwischen akzeptierten und nicht akzeptierten Werten der Schweregrad-Metrik besser zu identifizieren. Der Algorithmus beginnt mit einem Fixed Sampling (vollständige oder partielle Kreuzprodukte) und erhöht die Abtastrate in der Nähe der (a) Schweregrad-Grenzüberschreitungen und/oder (b) lokalen Minima/Schlimmstfälle. Es können gemischte diskrete und stetige Parameter sowie (einfache) Bedingungen zwischen den Parameterwerten unterstützt werden.

Die untenstehende Abbildung zeigt eine Wirkungsfläche mit 4 lokalen Min/Max-Punkten (linke Oberflächendarstellung), die Schweregrad-Rückmeldung mit relativ hoher fixer Abtastrate (13 Punkte / Achse, mittlere Heatmap) und dem Ergebnis des Adaptive Sampling mit eher kleiner fixer Abtastrate (5 Punkte / Achse), mit Supersampling nahe Schweregradgrenzen und Schlimmstfällen.

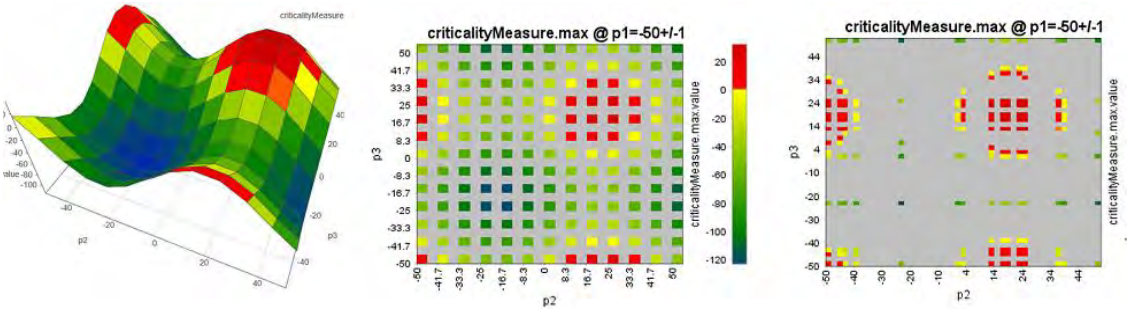


Abbildung 48 Outputs für Adaptive Sampling. Links: Wirkungsfläche.
Mitte: Heatmap mit höherer fixer Abtastrate.
Links: Heatmap mit niedriger fixer Abtastrate
und Supersampling nahe Grenzüberschreitungen
und lokalen WorstCase

Die Komplexität des Algorithmus ist höher als die des Fixed Sampling FS/FS-KD, d.h. über $C(N,K)*S^{K.}$ Da die Grenzen der Regionen mit Schweregradverstößen bei Erforschung mit hoher Auflösung in einem mehrdimensionalen Raum sehr lang sein können, ist der Algorithmus nur dann nützlich, wenn er auf eher kleine 2D- oder 3D-Parameterteilräume angewandt wird. Am nützlichsten ist er, wenn er zum Beispiel um

einen vorher gefundenen interessanten Punkt herum angewandt wird, etwa einen Schlimmstfall, der mit Optimierungsalgorithmen gefunden wurde.

Zufällige Generierung

Zufällige Generierung ist eine einfache, grundlegende Samplingmethode, die oft eine gute Ergänzung zu anderen, stärker zielorientierten Methoden darstellt. Obwohl sie einfach ist, kann sie oft einige Schwächen kompensieren, die kompliziertere heuristische Algorithmen aufweisen können. Es können gemischte diskrete und stetige Parameter sowie (einfache) Bedingungen zwischen den Parameterwerten unterstützt werden.

Zufällige Generierung bietet einen vertretbaren Grad der Abdeckung (gewissermaßen, gleichmäßig verteilte Samplingpunkte), sofern die Anzahl der generierten Wertekombinationen nicht zu klein ist. So ist es beispielsweise in jenen Fällen, in denen FS nicht praktikabel ist und FS-KD keine ausreichende Abdeckung bietet (aufgrund hoher Differenz zwischen N und K), vernünftig, zu RND zu wechseln oder der gesampelten Menge zumindest eine Anzahl von zufallsgenerierten Szenarien hinzuzufügen.

Die untenstehenden Abbildungen zeigen das Ergebnis einer Zufallsgenerierung für einen Parameterraum mit 5 Dimensionen. Sie werden diese Resultate eventuell mit den in den vorherigen Abschnitten für FS und FS-KD gezeigten vergleichen wollen.

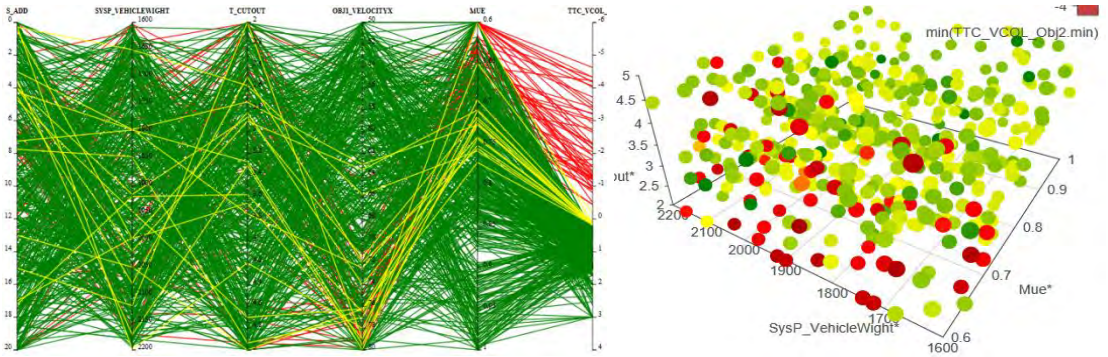


Abbildung 49 Outputs für zufällig generierte Szenarien

Mehrstufiger Strategiemix

Ohne vorheriges Wissen über die Wirkungsflächen der Schweregradmetriken für ein spezifisches logisches Szenario ist es nicht einfach, einen Algorithmus zu spezifizieren, der für die Charakterisierung des Parameterraums adäquat ist. Die beste Allzwecklösung, die wir nach Experimenten mit einigen Szenarien identifiziert haben, ist es, einen Mix aller Strategien spezifizieren zu können: Optimierung mit mehreren zufälligen Neustarts, zufällige Generierung und Fixed Sampling mit partiellen Kreuzprodukten um interessante Punkte herum, wie etwa zuvor gefundene Worst-Case-Fälle.

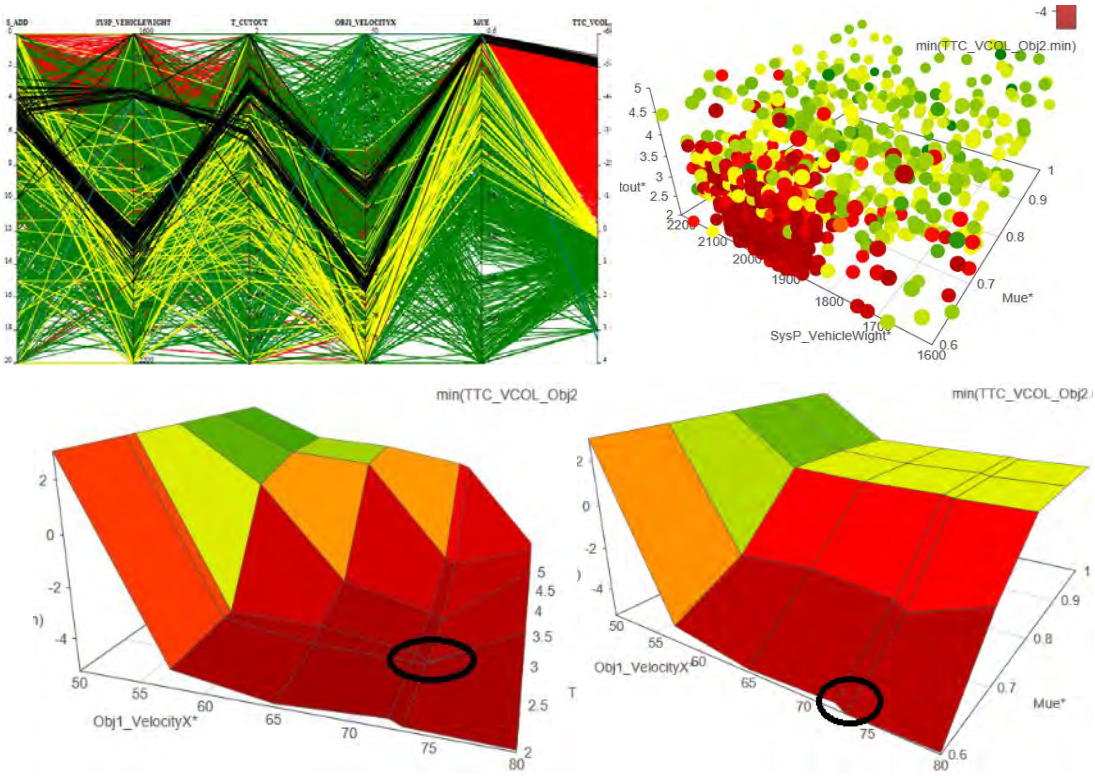


Abbildung 50 Output für eine mehrstufige Kombination aus zufälliger Generierung, lokaler Optimierung und FS-KD

Die obenstehende Abbildung zeigt den Mix aus (1) zufälliger Generierung (2) Optimierung mit lokaler Suche, gefolgt von (3) Fixed Sampling mit partiellen 3D-Kreuzprodukten. Die letzte Stufe wurde hinzugefügt, um auch die Schweregrad-Wirkungsflächen um den nach den ersten beiden Stufen gefundenen schlimmsten Fall herum abbilden zu können. Sie werden feststellen, dass wir hier TTC_VCOL als Schweregradmetrik verwendet haben, eine Metrik, die nicht nur die geschätzte Zeit bis zu einer Kollision verwendet, sondern auch die relative Kollisionsgeschwindigkeit im Falle einer Kollision.

Charakterisierung mit Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit von Sicherheitsverstößen

Die Beurteilung der Wahrscheinlichkeit von Sicherheitsverstößen für einen logischen Szenarioraum mit einem gegebenen Konfidenzmaß ist ein herausforderndes Ziel für die stochastische Parametererforschung. Um sich einem solchen Ziel anzunähern, muss für die Eingangsdaten die Erfüllung mehrerer Voraussetzungen sichergestellt werden:

- Alle relevanten Parameter mit Einfluss auf das Experiment sind bekannt, einschließlich ihrer vorherigen Wahrscheinlichkeiten, Korrelationen, Beschränkungen und anderen Abhängigkeiten.
- Das Simulationsmodell (Ego-Fahrzeug, Verkehr, Umgebung) liefert Werte, die der Realität nahekommen.
- Die Schweregradmetriken liefern realistische Bewertungen des Schweregrads eines Szenarios.

Die Beurteilung der Wahrscheinlichkeit für mehr als nur einige wenige Parameter bleibt aufgrund der hohen Anzahl von Samples, die für eine probabilistische Schät-

zung mit vertretbarem Konfidenzmaß notwendig sind, eine große Herausforderung, selbst wenn alle obengenannten Annahmen erfüllt sind.

Theoretisch kann eine Parametererforschung mit vollständigen Kreuzprodukten bei ausreichend hoher Samplingauflösung und gefolgt von einer Integration der Wahrscheinlichkeiten um die Schweregradverstöße herum zu einer probabilistischen Schätzung führen. Die Methode ist allerdings für mehr als 3-4 Parameter nicht praktikabel.

Im Prinzip können Monte-Carlo-Simulationen (oder Ableitungen davon, welche die Samplezahl optimieren, wie etwa Importance Sampling) verwendet werden, um die Wahrscheinlichkeit von Schweregradverstößen zu schätzen. Die Anzahl von Simulationen, die notwendig ist, um eine probabilistische Schätzung mit vertretbarem Konfidenzmaß zu erhalten, ist sehr hoch, so dass diese Methoden nur auf Szenarien mit einer sehr kleinen Anzahl von Parametern angewandt werden können.

Ein besonders glücklicher Fall, in dem eine Schätzung der Wahrscheinlichkeit vorgenommen werden kann oder wenigstens ein Argument für die Sicherheit innerhalb eines Parameterraums gegeben werden kann, liegt dann vor, wenn nach Verwendung kombinierter Optimierungs- und Charakterisierungsmethoden (mit ausreichender Abdeckung) *kein konkretes Szenario gefunden werden kann, das gegen die Sicherheitsbedingungen verstößt.* Dies ist für den vollständigen Parameterraum eines logischen Szenarios kein besonders wahrscheinlicher Fall, aber die Methode kann genutzt werden, um zu argumentieren, dass *innerhalb des wahrscheinlichsten Teilraums* des Parameterraums keine Sicherheitsverstöße auftreten.

Andere Ansätze, die potenziell mit einer (signifikant) kleineren Anzahl von Simulationen zu vernünftigen Schätzungen führen können, zum Beispiel die Verwendung von Surrogatmodellen, maschinellem Lernen und DoE-Methoden, sollten in Zukunft untersucht werden.

Empfehlungen für eine simulationsgestützte Sicherheitsargumentation von logischen Szenarien

Bis dato existieren keine allgemein akzeptierten und ausreichenden Abdeckungsziele für die Sicherheitsbewertung logischer Szenarien. Die Erhöhung der Abdeckung des analysierten Parameterraums in Richtung der Machbarkeitsgrenzen ist eine Option, die in Betracht gezogen werden sollte.

Selbst wenn keine Vollständigkeitsgarantie gegeben werden kann, können Simulationsergebnisse zu einer Sicherheitsargumentation beitragen. Zwei pragmatische Analyseansätze erscheinen bis dato angemessen:

1. Abwesenheit von Sicherheitsverstößen im wahrscheinlichsten Parameterteilraum:
    - Die Abwesenheit von Sicherheitsverstößen im wahrscheinlichsten Teilraum ist ein Argumentationsschritt, der in Reichweite der gegenwärtigen Technologie zu sein scheint. Diesem Ziel könnte man sich durch Verwendung einer Kombination von Optimierungs- und Charakterisierungsalgorithmen annähern.
    - In Abwesenheit einer vollständigeren und verlässlicheren Beurteilung der kumulierten Wahrscheinlichkeit der Sicherheitsverstöße sollte zumindest auch das nächste Ziel angestrebt werden.
2. Charakterisierung des Parameterraums mit einer Kombination von Algorithmen:
    - Zufällige Generierung – für eine „faire“ Abdeckung des Parameterraums.
    - Optimierungsalgorithmen mit multiplen zufälligen Neustarts – für eine stärker zielorientierte Identifizierung von Sicherheitsverstößen und Schlimmstfällen in unterschiedlichen Regionen des Parameterraums.

- Fixed Sampling mit Kreuzprodukten der Größe K – für K-dimensionale Abdeckung von Wertekombinationen um einen vorher ausgewählten Seed herum sowie für intuitivere Visualisierungen der Wirkungsfunktion mit 2D- und 3D-Projektionen, da diese für die im nächsten Schritt durchgeführte Beurteilung essenziell sein könnten (sie könnten zum Beispiel dabei helfen, Bereiche mit unerwarteten Parameterinteraktionen zu identifizieren).

Manuelle Beurteilung der Ergebnisse durch Experten: Eine intuitive und interaktive Visualisierung und Analyse der Ergebnisse zu Teilräumen wird für diese Aktivität wahrscheinlich notwendig sein.

(13) Testfälle

Testfälle sind im PEGASUS-Kontext konkrete Szenarien mit PASS/FAIL-Kriterien, die entweder als Simulation oder auf dem Prüfgelände ausgeführt werden können. Die Testautomation generiert ein neues konkretes Szenario in jedem (Prüf-)Schritt. Dieses konkrete Szenario steht dem Simulations- oder Prüfgeländemodul zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Das Datenformat ist für OpenDRIVE „.xodr“ und für OpenSCENARIO „osc“.

(14) Test HAF: Simulation, Prüfgelände, Realfahrt

Simulation

Die Simulation ist eine Testplattform, die zur Beurteilung der funktionalen Implementierung der HAF-Funktion verwendet wird. Sie spielt innerhalb der *PEGASUS*-Methode eine zentrale Rolle, da sie eine große Anzahl von Testszenarien abdecken kann und es ermöglicht, die relevanten Szenarioparameter frei zu variieren. Im Gegensatz zu Fahrten auf dem Prüfgelände oder im Realverkehr werden Simulationsmodelle genutzt, um mit der implementierten HAF-Funktion zu interagieren. In jedem Simulationsdurchlauf wird die HAF-Funktion für ein definiertes konkretes Szenario und ein konkretes Straßennetz mittels vorgegebener Pass/Fail-Kriterien (Metriken) bewertet.

Eine zentrale Testplattform, die zur Beurteilung der *funktionalen Implementierung einer HAF-Funktion in einer großen Anzahl von Szenarien* mit verschiedenen Szenarioparametern verwendet wird, ist die Simulation. Dieser Testplattform liegt im Wesentlichen die Idee zugrunde, dass Inputsignale der HAF-Funktion durch Simulationsmodelle geliefert werden und die Outputsignale der HAF-Funktion dann verwendet werden, um die Simulation dynamisch zu aktualisieren.

Im Gegensatz zu einer Simulation wird auf anderen Testplattformen, etwa bei Fahrten auf dem Prüfgelände und im Realverkehr, ein echtes Fahrzeug für die Überprüfung der HAF-Funktion verwendet. Dort läuft die Funktion typischerweise auf einem echten Steuergerät, das in das Fahrzeug integriert ist. Alle Inputsignale der HAF-Funktion werden vom Fahrzeug selbst geliefert, nicht von Simulationsmodellen. Typische Inputsignale sind z.B. Daten zur Fahrzeugdynamik (Geschwindigkeit, Lenkwinkel, etc.) oder zur Umgebung (z.B. erkannte Objekte, Informationen zum Fahrstreifen, etc.) Die letztgenannten werden mithilfe von bspw. auf Radar-, Kamera- oder LIDAR-Technologie basierenden Umgebungssensoren bereitgestellt, können aber auch durch einen nachgelagerten Datenverarbeitungsschritt geliefert werden, wie etwa eine Sensordatenfusion. Outputsignale der HAF-Funktion, z.B. Steuerbefehle, können dann zur Steuerung des echten Fahrzeugs genutzt werden. Daher bietet die Erprobung einer HAF-Funktion mit einem echten Fahrzeug den Vorteil einer größeren Realitätsnähe im Vergleich zu Simulationstestinstanzen. Die Kehrseite echter Fahrtests ist die Unmöglichkeit, einen großen Testraum abzudecken, etwa die Gesamtheit der möglichen Autobahnszenarien.

Die Simulation ist in der Lage, den großen Szenariotestraum und die notwendige Variation der Szenarioparameter effizienter abzudecken. Simulationsmodelle werden genutzt, um der

HAF-Funktion Inputsignale zu liefern. Des Weiteren können die verwendeten Simulationsmodelle durch von der HAF-Funktion gelieferte Signale dynamisch aktualisiert werden. Im Allgemeinen wird die Realitätsnähe der Simulation durch die Genauigkeit der für jede Situation verwendeten Modelle bestimmt. Das heißt, dass die benötigte Realitätsnähe bei der Auswahl der Simulationsmodelle berücksichtigt werden sollte. Allerdings ist *sowohl die Verifizierung als auch die Validierung der Simulation*, d.h. die Demonstration, dass die Simulation den benötigten Genauigkeitsgrad erfüllt, eine wichtige und herausfordernde Aufgabe. Ohne eine Validierung liefern die Simulationsergebnisse nur begrenzte Erkenntnisse.

Im Folgenden betrachten wir die Interaktion zwischen den Simulationsmodellen und der HAF-Funktion genauer. Abbildung 51 bietet einen schematischen Überblick über einen typischen Aufbau einer im Projekt berücksichtigten Simulationsumgebung.

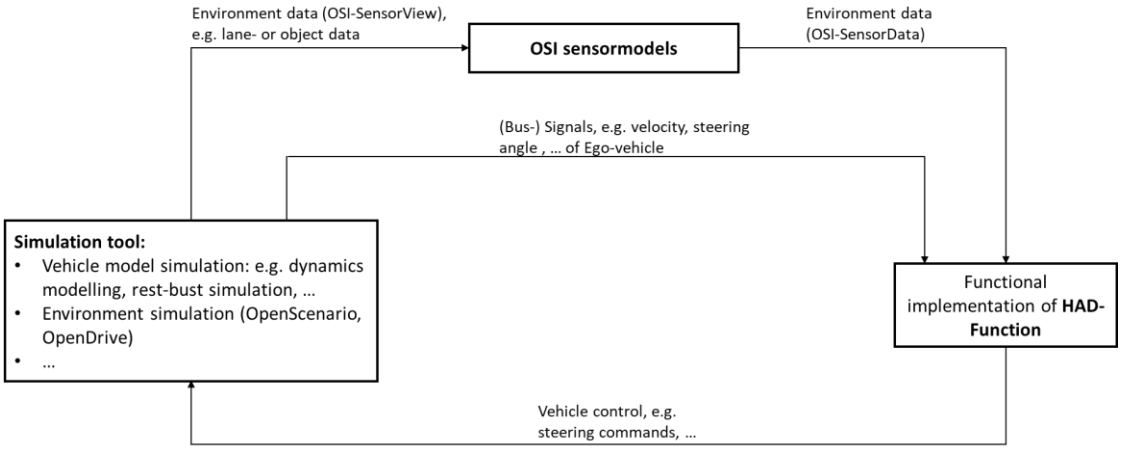


Abbildung 51 Closed-Loop-Simulation der HAF-Funktion.
Die Simulation kann auf einer MiL-, SiL- oder HiL-Plattform durchgeführt werden

Ein üblicher Ansatz ist die Verwendung eines Simulationswerkzeugs, in dem alle Modelle laufen, etwa das Fahrzeugmodell, die Umgebungssimulation, etc.

Zur Konfiguration der Simulation ist es notwendig, das Straßennetz und das Szenario zu definieren. Unter anderem wird das gewünschte Verhalten der Verkehrsumgebung sowie des Ego-Fahrzeugs (Geschwindigkeitsprofil, Fahrstreifenzuordnung, etc.) definiert. Eine wichtige Entscheidung innerhalb des Projekts war es, das Straßennetz und das Szenario mit den anbieterunabhängigen und offenen Dateiformaten *OpenDRIVE* beziehungsweise *OpenSCENARIO* zu definieren. Deren prototypische Unterstützung durch die Simulationswerkzeuge der Projektpartner IPG, Vires und dSpace wurde im Rahmen des Projekts implementiert oder verbessert, was zum Ziel hatte, einen international anerkannten Open-Source-Standard zu etablieren.

Auf Basis der simulierten Umgebung, wobei es sich in erster Linie um die simulierte Ground Truth handelt, können die simulierten Sensorsignale für die Umgebungssensoren abgeleitet werden. Dies erfolgt mit Sensormodellen für integrierte Sensoren, wie etwa Radar-, Lidar- und Kamerasensoren. Der Hauptzweck der Sensormodelle ist die Simulation des Verhaltens echter Sensoren, z.B. im Hinblick auf das Sichtfeld oder die Fehlermerkmale. Themen mit Bezug zu Sensormodellen, einschließlich verwendeter Standards wie Functional-Mockup-Interface (FMI) oder Open-Simulation-Interface (OSI), werden weiter unten detailliert erläutert.

Auf Grundlage aller Inputsignale berechnet die HAF-Funktion dann die internen oder Outputsignale, z.B. Signale für die Fahrzeugkontrolle, die zur dynamischen Aktualisierung der Simulation einschließlich des Fahrzeugmodells verwendet werden. Diese sogenannte Closed-Loop-Simulation kann auf unterschiedlichen Plattform durchgeführt werden, wie etwa auf MiL-, SiL- oder HiL-Plattformen.

Abbildung 52 bietet einen Überblick darüber, wie die oben beschriebene Closed-Loop-Simulation in die Gesamtsimulationsumgebung integriert wird.

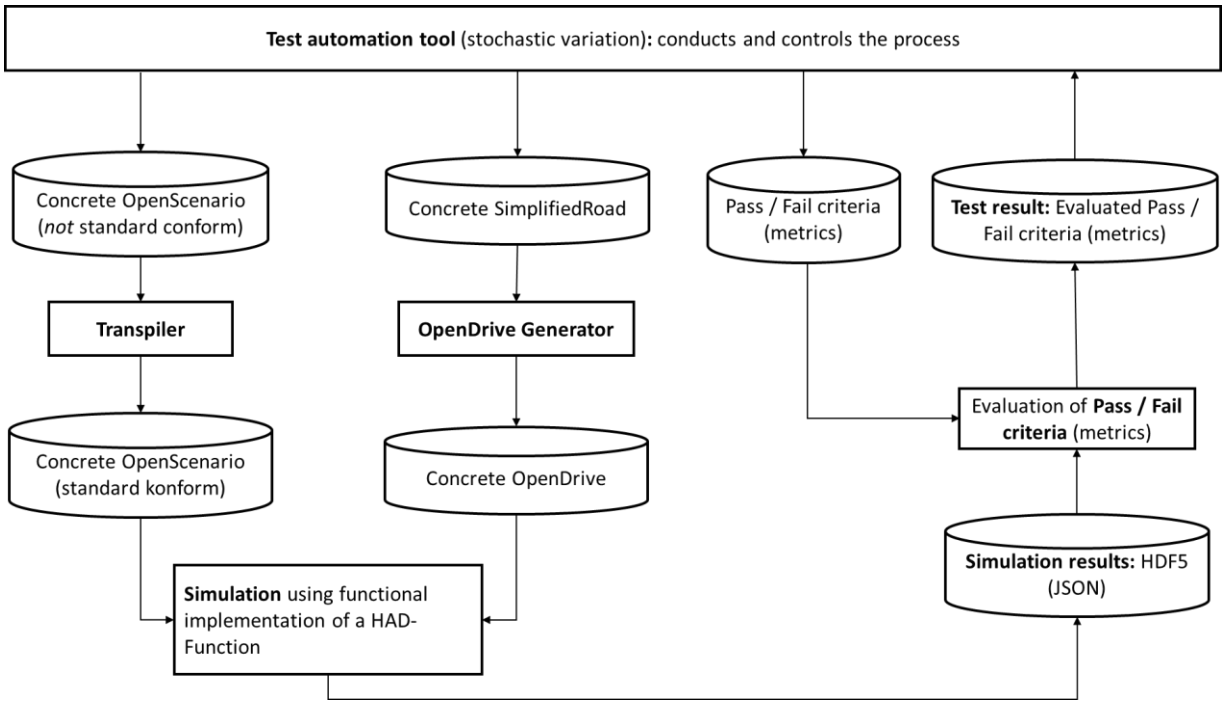


Abbildung 52 Schematische Übersicht der Simulationsumgebung
Für weitere Details zur Simulation siehe Abbildung 51

Input für die Simulationsumgebung sind ein konkretes Straßennetz und ein konkretes Szenario. Konkret bedeutet, dass die Parametrierung bereits im Vorfeld durch die stochastische Variation / das Testautomationswerkzeug auf konkrete Werte eingestellt wurde (siehe (12) für Details zur stochastischen Variation).

In der *PEGASUS*-Methode kann das im OpenSCENARIO-Dateiformat definierte konkrete Szenario Formaterweiterungen enthalten, die noch nicht standardkonform sind, z.B. eine noch nicht standardkonforme Darstellung der Trajektorie eines einscherenden Fahrzeugs. Diese *PEGASUS*-spezifische OpenSCENARIO-Datei wird dann mithilfe des sogenannten *Transpilers* und eines geeigneten Übersetzungsskripts in ein tatsächlich standardkonformes OpenSCENARIO übertragen. Der nicht-standardkonforme Inhalt der *PEGASUS*-spezifischen OpenSCENARIO-Datei wird aktuell von der Association for Standardization of Automation and Measuring Systems (ASAM) im Rahmen ihres Standardisierungsprozesses für das OpenSCENARIO der nächsten Generation adressiert. Dies erlaubt die Evaluierung von Formaterweiterungen ohne Modifizierungen des verwendeten Simulationswerkzeugs. Es kann auch erforderlich sein, dass die standardkonforme OpenSCENARIO-Datei spezifische, praktisch nicht parametrierbare Elemente enthält. Dies sind Elemente, für die eine Parameterdefinition kompliziert oder praktisch nicht machbar ist, z.B. eine Trajektoriendefinition, die aus einer Zeitreihe besteht, die Wertepaare zu Zeit und Position enthält. Die Konsequenz daraus ist, dass diese Elemente möglicherweise nicht durch die stochastische Variation variierbar sind. Nichtsdestotrotz kann es erforderlich sein, dass das konkrete OpenSCENARIO diese Elemente enthält, etwa um einen Test des konkreten Szenarios auf einer anderen Testplattform, wie dem Prüfgelände, zu ermöglichen.

Betrachten wir als Beispiel die Trajektorie eines einscherenden Fahrzeugs. Für die stochastische Variation muss die Trajektorie auf praktische Weise mittels idealerweise für Menschen interpretierbare Parameter parametriert werden, etwa mit dem Parameter der Dauer des Einschermanövers oder mit den Parametern einer mathematischen Darstellung der Einschertrajektorie. Dagegen könnte es für den Test desselben konkreten Szenarios auf dem Prüfge-

lände am besten sein, wenn die Einschertrajektorie in einem standardkonformen OpenSCENARIO durch eine Zeitreihe mit Wertepaaren für Zeit und Position des einscherenden Fahrzeugs dargestellt wird. Dann kann der *Transpiler* verwendet werden, um das praktisch parametrierbare OpenSCENARIO in ein OpenSCENARIO zu überragen, in welchem dieselbe Einschertrajektorie mit Wertepaaren für Zeit und Position dargestellt wird. Letztere kann dann sowohl in der Closed-Loop-Simulation als auch auf dem Prüfgelände genutzt werden.

Neben der Szenariobeschreibung können auch die Parameter des Straßennetzes, wie der Kurvenradius oder die Fahrstreifenbreite, durch die stochastische Variation variiert werden. Dies resultiert in einem konkreten Straßennetz, d.h. einem Straßennetz mit festgelegten Parametern, was einen Input für die Simulationsumgebung bildet. Eine Variation eines im Dateiformat OpenDRIVE definierten Straßennetzes ist allerdings recht schwierig. Deshalb wird stattdessen das Dateiformat SimplifiedRoad verwendet. Das als konkretes SimplifiedRoad definierte Straßennetz wird dann mithilfe des OpenDrive-Generators in OpenDrive konvertiert.

Das generierte, konkrete und standardkonforme OpenSCENARIO und das generierte, konkrete OpenDRIVE wird dann genutzt, um die Simulation mit der HAF-Funktion durchzuführen. Während der Simulation werden die Daten bestimmter Signale, etwa die Geschwindigkeiten des Ego-Fahrzeugs und des Herausforderers, unter Verwendung des *PEGASUS*-Formats aufgezeichnet, wie im Datencontainer (9) beschrieben. Auf Grundlage der aufgezeichneten Daten wird der Test dann unter Verwendung definierter Pass/Fail-Kriterien (Metriken) evaluiert. Dies kann die Evaluation bestimmter Metriken einschließen. Im Hinblick auf die stochastische Variation wird typischerweise eine bestimmte (Kritikalitäts-)Metrik evaluiert, z.B. Abstand, Time-To-Collision (TTC) oder Time-To-React (TTR), um ein Maß der Kritikalität zu erhalten. Die Entwicklung und Definition von Evaluationskriterien und Metriken wird in diesem Kapitel nicht behandelt (siehe (8) und (6)). Sie sind Input für diesen Prozessschritt. Das Ergebnis der Kriterienevaluation bildet dann einen Output dieses Prozessschritts, welcher zur weiteren Beurteilung genutzt wird.

Abbildung 53 illustriert auf schematische Weise, wie die oben beschriebene Simulationsumgebung in die übergeordnete Software-Architektur eingebettet wird, einschließlich relevanter Projektpartner. Beachten Sie, dass manche Komponenten der Architektur nicht in diesem Kapitel betrachtet werden, sondern in anderen Prozessschritten. Zudem werden für die Simulationsumgebung relevante Projektpartner gezeigt.

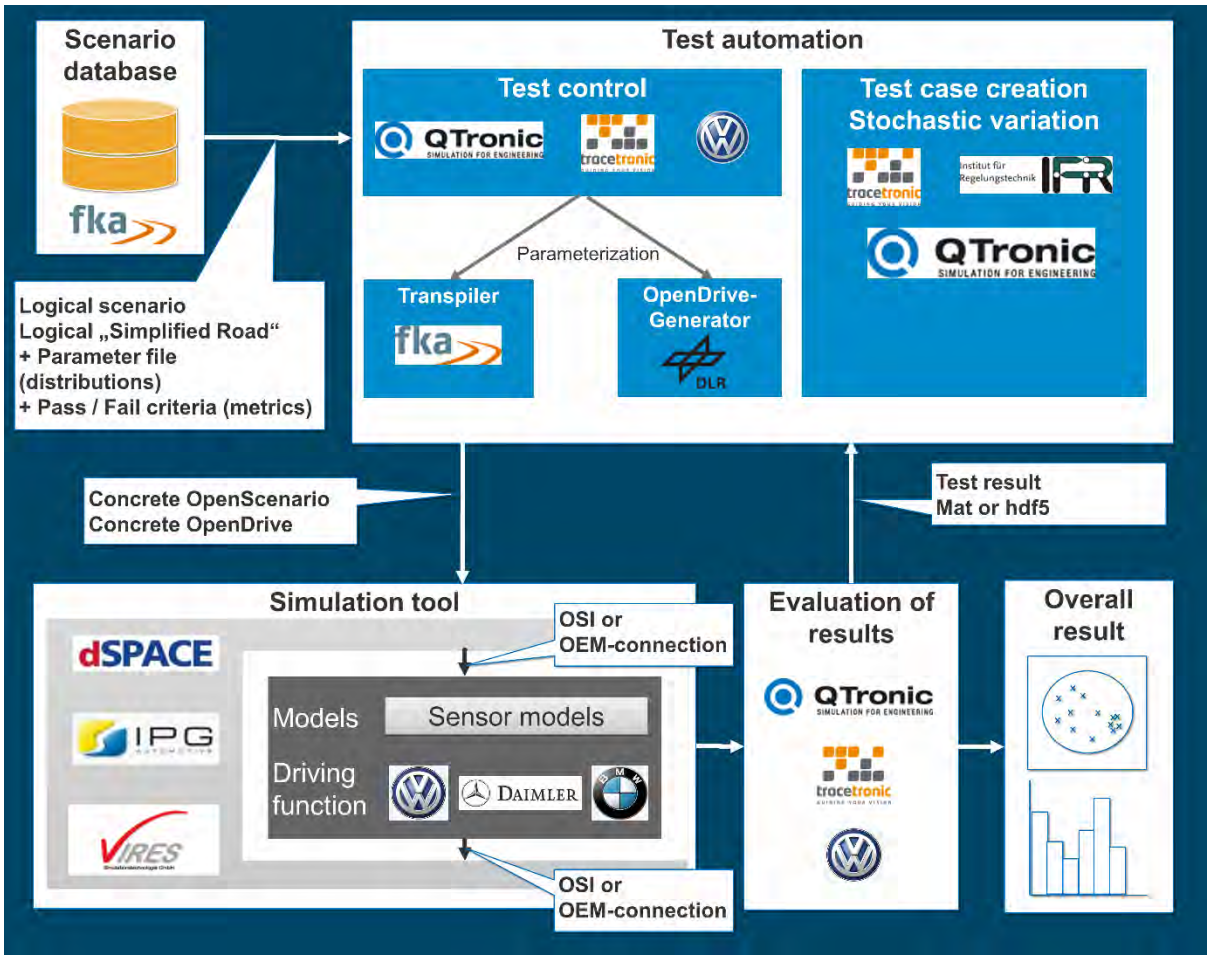


Abbildung 53 Schematische Übersicht über die übergeordnete Software-Architektur einschließlich der in diesem Prozessschritt beschriebenen Simulationsumgebung

Transpiler

OpenSCENARIO und OpenDRIVE sind zwei Dateiformatspezifikationen, die dabei helfen, für die Sicherheitsvalidierung des automatisierten Fahrens relevante Umgebungen und Szenarien präzise zu definieren. Allerdings unterliegen beide Dateiformate in ihrer gegenwärtigen Version starken Einschränkungen, welche die Modellierung komplexer Szenarien sehr umständlich machen. Zudem müssen Änderungen und Erweiterungen des Datensatzformats einen langen Standardisierungsprozess durchlaufen und in die (Simulations-)Werkzeuge implementiert werden - beides verhindert eine rasche Entwicklung der Standards. Deshalb wird ein OpenSCENARIO-*Transpiler* eingeführt, um beide Probleme anzugehen. Die Hauptidee hinter dem *Transpiler* ist es, die Hinzufügung von benutzerdefinierten Elementen zu den OpenSCENARIO-Formaten zu erlauben, welche nicht Teil der Standards sind, aber in standardisierte Elemente im OpenSCENARIO-Format übersetzt werden können. Die Übersetzung erfolgt mittels Übersetzungsskripts, die durch den *Transpiler* ausgeführt werden. Indem die Übersetzungsskripts mit einer Dokumentation kombiniert wird, können neue Ideen und Erweiterungen leicht mit Projektpartnern geteilt und so auf einfache Weise evaluiert werden, bevor sie in den Standard integriert werden. Es wird ausgeführt, nachdem aus einem logischen Szenario durch Spezifizierung der Parameter ein konkretes Szenario erzeugt wurde und bevor dieses bspw. an die Simulationsumgebung oder ein beliebiges anderes Werkzeug, das standardkonforme OpenDRIVE- und OpenSCENARIO-Dateien benötigt, weitergegeben wird.

Sowohl der OpenDRIVE- als auch der OpenSCENARIO-Dateiformatstandard löst mehrere Probleme in Verbindung mit der Definition statischer Umgebungen und Szenarien während der Entwicklung und Sicherheitsvalidierung des automatisierten Fahrens. So ist beispielsweise das OpenSCENARIO-Format eine technische Beschreibung von Szenarien. Es basiert auf der Beschreibungssprache XML und wird von einem Konsortium von mehr als 25 Partnern parallel zu und koordiniert mit dem *PEGASUS*-Projekt entwickelt. In diesem Beschreibungsformat sind die Elemente eine Szenarios, wie die Ausgangspositionen oder die Manöver der Verkehrsteilnehmer, durch vorher festgelegte Parameter klar definiert. Andererseits erlaubt dieses Format, die Elemente durch Bedingungen, Auslöser und Sequenzen zu einer Geschichte zu verknüpfen.

Die Entwicklung dieses Standards bringt viele Vorteile mit sich und löst zugleich essenzielle Probleme. Die Definition des Formats erleichtert es Werkzeugherstellern, ihre Software an die Anforderungen der Sicherheitsvalidierung von automatisierten Fahrzeugen anzupassen. Zugleich wird die Interoperabilität zwischen Werkzeugen auf gleichem oder anderem Niveau wie die Simulation und das Testgelände sichergestellt. Nur durch ein standardisiertes Dateiformat wird es möglich, ein Szenario in mehreren Werkzeugen zu verwenden, wenn es einmal spezifiziert worden ist.

OpenSCENARIO befindet sich allerdings noch in Entwicklung und so wurde im *PEGASUS*-Projekt deutlich, dass Änderungen und Verbesserungen notwendig sind, um Szenarien für die Sicherheitsvalidierung automatisierter Fahrzeuge zu erzeugen. Da es sinnvoll ist, diese Verbesserungen mit den Projektpartnern zu teilen und zu diskutieren, bevor sie Teil des Standards werden, wurde der *Transpiler* geschaffen. Mithilfe dieses Werkzeugs kann OpenSCENARIO umfassend erweitert werden, ohne dass Werkzeughersteller ihre Software an diese Änderungen anpassen müssen. Der Kniff besteht darin, für jede Erweiterung ein geeignetes Skript bereitzustellen, das die Erweiterung in standardkonformes OpenSCENARIO übersetzt. Ein Beispiel hierfür ist die Einführung neuer Manöver. Um Fahrstreifenwechsel abzubilden, sollte die laterale Bewegung als Polynom fünften Grades beschrieben werden, was OpenSCENARIO in seiner aktuellen Version nicht als geometrische Form unterstützt. Alle Trajektorien können in einer OpenSCENARIO-Datei als Serie von Positionen beschrieben werden. Diese Darstellung kann jedoch nicht parametriert werden, was eine notwendige Voraussetzung für die stochastische Variation im Testprozess ist. Deshalb wurde das Standardbeschreibungsformat um ein parametrierbares Element für durch ein Polynom fünften Grades beschriebene Fahrstreifenwechsel erweitert. Es wurde ein geeignetes Skript implementiert, welches das neue Element in eine Serie von Positionen übersetzt. Dies erlaubt die Verwendung des neuen Manövers zur Validierung, bevor das Element in den Standard aufgenommen und in die entsprechenden Werkzeuge implementiert wird.

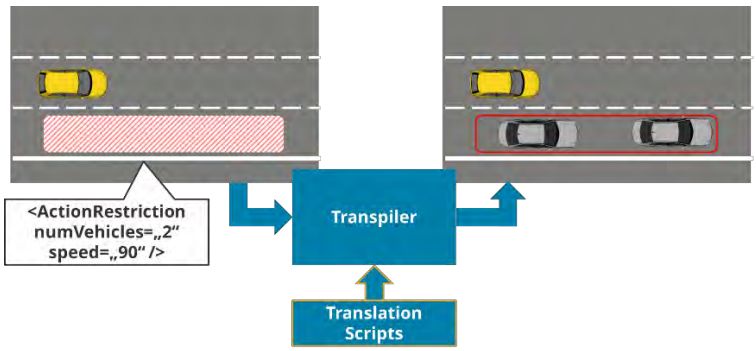


Abbildung 54 Vereinfachte Darstellung der Aktionsbeschränkung und Übersetzung in standardmäßiges OpenSCENARIO

Der *Transpiler* kann auch verwendet werden, um komplexe, aber zugleich parametrierbare Elemente auf einfache Weise einem Szenario hinzuzufügen, was Änderungen an mehreren Stellen der Datei verursacht. Ein Beispiel sind Aktionsbeschränkungen, die z.B. ein Fahrzeug beschreiben, das einen Fahrstreifen blockiert (siehe Abbildung 54). Eine Aktionsbeschränkung kann aus einem oder mehreren Fahrzeugen bestehen, die dem Szenario hinzugefügt werden müssen und denen eine Startposition und ein Verhalten zugewiesen werden muss. In der aktuellen Version von OpenSCENARIO wären diese Beschränkungen nicht parametrierbar, sondern mit großem Aufwand manuell zu implementieren. Andererseits könnte ein neues benutzerdefiniertes Element mit einer Anzahl von Parametern hinzugefügt werden, das durch den *Transpiler* vollautomatisch in die entsprechenden standardisierten Elemente konvertiert wird. Der *Transpiler* ist eine freie Open-Source-Software, die vom *PEGASUS*-Projekt bereitgestellt wird.

OpenDrive-Generator

OpenDRIVE ist ein offenes, anbieterunabhängiges und ausgereiftes Dateiformat auf XML-Basis, das alle Funktionen zur Modellierung echter Straßennetze beinhaltet und von gängigen Simulationssoftwares unterstützt wird. Daher ist OpenDRIVE eine naheliegende Wahl für die Modellierung von virtuellen Strecken für Testfälle. In Kombination mit OpenSCENARIO für die Beschreibung dynamischen Verhaltens von Objekten und Verkehrsteilnehmern (ebenfalls ein offenes Dateiformat auf XML-Basis) bilden diese beiden Format ein solides Fundament für die Modellierung von Umgebungen für virtuelle Testfälle.

Die direkte Modellierung verschiedener Teststreckenvarianten in OpenDRIVE ist recht anspruchsvoll. Eine einfache Änderung an einer Strecke zur Erzeugung von Varianten führt für gewöhnlich zu mehreren anderen Änderungen an derselben OpenDRIVE-Datei, die von den Abhängigkeiten des OpenDRIVE-Datenmodells verursacht werden. Deshalb wird eine domänenspezifische Sprache (DSL) verwendet, um verschiedene Varianten von Autobahnen effizient zu modellieren und so ausreichend realistische Strecken für die Beschreibung von Testfällen zu erzeugen. Diese DSL heißt *Simplified Road* und wurde speziell für die Vereinfachung der Prototypisierung von Straßenstrecken entworfen.

Der OpenDRIVE-Generator verarbeitet *Simplified-Road*-Dateien und ihre Parametrierung und erzeugt daraus OpenDRIVE-Dateien. Diese werden dann in der Simulation und den Testaktivitäten verwendet.

Schnittstellen

Input: Simplified Road

Das Format *Simplified Road* wird durch ein XML-Schema spezifiziert. Abbildung 55 visualisiert einen Auszug aus dieser Schemadatei. Manche Knotendetails sind eingeklappt, um die beispielhalber gezeigten Informationen zu limitieren. Insbesondere sind die untergeordneten Elemente von „course“ mit jenen von „lane“, „elevation“ und „lateral profile“ identisch. Zudem sind die untergeordneten Elemente von „center“ mit denen von „left“ und „right“ identisch.

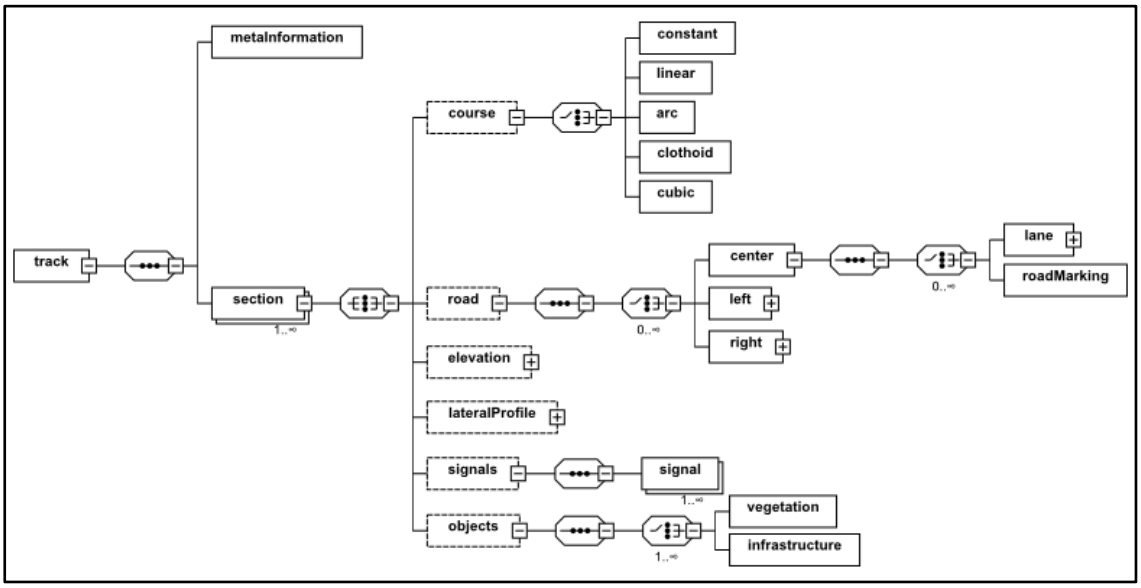


Abbildung 55 Partielle Visualisierung des Simplified-Road-XML-Schemas

Das Wurzelelement jedes Simplified-Road-Dokuments ist das Element „track“. Es kann ein „metaInformation“-Element enthalten sein, das Attribute zur Beschreibung des Dokuments mit Informationen zum Autor, zur Version und zur Beschreibung in Textform besitzen kann. Das „track“-Element enthält des Weiteren eine unbegrenzte Sequenz von Abschnittselementen, die Teile / Abschnitte der beschriebenen Straße repräsentieren. Jeder Abschnitt kann Unterelemente der Typen „course“, „road“, „elevation“, „lateralProfile“, „signals“ oder „objects“ haben, um Details des jeweiligen Abschnitts zu spezifizieren. Das „course“-Element spezifiziert die Krümmung des Straßenabschnitts mithilfe einer dieser mathematischen Funktionen: „constant“, „linear“, „arc“, „clothoid“ oder „cubic“.

Im Element „road“ wird definiert, wie viele Fahrstreifen der Straßenabschnitt aufweist, einschließlich ihrer Breite und anderer Attribute von „lane“ und „road marking“. Diese Fahrstreifen und Straßenmarkierungen werden für die Straßenbereiche „left“, „center“ und „right“ jeweils separat spezifiziert. Ähnlich wie „course“ werden auch „elevation“ und „lateral profile“ durch mathematische Funktionen für Straßenabschnitte definiert. Weitere Details zu diesen Elementen sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verborgen.

Falls das Element „signals“ vorhanden ist, enthält es Straßenschilder, die entlang der Straße zu lokalisieren sind. Das Element „objects“ enthält generischere „vegetation“, wie Bäume und Büsche, oder „infrastructure“ entlang der Straße. Infrastruktur kann Elemente des Typs Leitpfosten, Geländer, Schallschutzmauer und Leitplanke umfassen.

Mit diesen Elementen ist es aktuell möglich, eine lange Straße ohne Knotenpunkte zu definieren. Da der Fokus auf Testszenarien liegt, stellt diese Einschränkung im Rahmen des *PEGASUS*-Projekts kein Problem dar. In Zukunft sollte es möglich sein, auch Autobahnauffahrten und -ausfahrten auf Grundlage von Leitlinien und mit der Möglichkeit einer Modifizierung zu definieren. Aus Perspektive des Testszenarios ist lediglich die Bereitstellung der gegenwärtig im Test verwendeten Straße erforderlich.

Im Vergleich zu OpenDRIVE gibt es mehrere Vereinfachungen, da weniger XML-Elemente benötigt werden, um den gleichen Inhalt zu spezifizieren. Zudem haben die Attribute soweit möglich immer sinnvolle Standardwerte. Neben Leitpfosten werden derzeit weitere Infrastrukturelemente unterstützt, etwa Schallschutzmauern, Geländer und Leitplanken. In manchen Tests benötigte Simplified Road nur zwischen 7 % und

21 % der in OpenDRIVE für die Beschreibung einer spezifischen Straße benötigten Zeilen (Noyer, Richter, & Scholz, 2018).

Input: Parameterdatei

Parameterdateien definieren Variablen, die in Simplified-Road-Definitionen ersetzt werden. Auf Grundlage dieser Variablen können verschiedene Varianten von Straßenstrecken leicht verwaltet werden. Die Verwendung einer Parameterdatei mit Parametern ist optional.

Output: OpenDRIVE

Die vom OpenDRIVE-Generator erzeugte Ausgangsdatei ist die Umwandlung der Simplified-Road-Eingangsdatei mit angewendeten Parametern aus der Parameterdatei. Sie enthält die definierte Straßenstrecke im OpenDRIVE-Format. Da OpenDRIVE ein gängiger Industriestandard ist, kann die Datei durch alle wichtigen Simulationswerkzeuge und Umgebungen verarbeitet werden.

Sensormodelle

Ziele

Hier konzentrierten sich die Aktivitäten auf die Entwicklung geeigneter Radar-, Lidar- und Kamerasensormodelle für die Einbettung und Verwendung in bestehenden kommerziellen (z.B. IPG CarMaker, Vires VTD, dSPACE ASM) und proprietären OEM-Simulationswerkzeugketten für die Bewertung der Fahrfunktion. Um den Entwicklungsaufwand für die Sensormodelle zu minimieren und die Wiederverwendbarkeit der Entwicklungs- und Validierungsarbeiten für die unterschiedlichen Sensormodelle zu maximieren, wurde eine standardisierte Schnittstellen- und Paketerstellungsmethode als weiteres Hauptziel definiert.

Im Hinblick auf die Sensormodellierung folgten die Haupttätigkeiten hauptsächlich diesen Schritten:

- Anforderungserhebung
- Allgemeine Definition der Simulationsarchitektur
- Schnittstellendefinition
- Modellklassifizierung und -auswahl
- Modellimplementierung
- Modellvalidierung
- Integration des Modellwerkzeugs
  (kommerzielle und OEM-proprietäre Umgebungen)

Anforderungserhebung

Auf Grundlage des verfügbaren Expertenwissens wurden die primären Sensorphänomene von Radar, Lidar und Kamera identifiziert und im Hinblick auf die erwartete, mit simulierten Sensordaten zu versorgende Fahrfunktion priorisiert. Des Weiteren wurden Schnittstellenanforderungen aus den obengenannten Effektlisten abgeleitet und in diesem frühen Stadium zunächst an kommerziellen und proprietären Simulationswerkzeugketten ausgerichtet. Dies und die bereits erwähnte generelle Forderung nach Standardisierung führte zu bestimmten Änderungsanfragen seitens der Werkzeuganbieter, woraus der Standard Open-Simulation-Interface (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) hervorgegangen ist. OSI ist ein Open-Source-Projekt, das auf GitHub gehostet wird und von den *PEGASUS*-Mitgliedern gepflegt wird. Die Definitionen sind an der kommenden Norm ISO23150 ausgerichtet, die eine generische Sensoroutput-Schnittstelle beschreibt, die Objektdaten und Erkennungen enthält. Durch die Forderung nach allgemeiner Zielplattformunabhängigkeit sollten keinerlei

oder nur begrenzte Systemeinschränkungen der Zielumgebungen die Modellverwendung über verschiedene Plattformen hinweg limitieren.

Design / Architektur

Eine der größten Entscheidungen, die im Hinblick auf das Design getroffen werden mussten, war die Auswahl einer geeigneten Art von Sensorsimulationsmodell. Es wurden hauptsächlich zwei Arten von Modellen in Betracht gezogen:

- Phänomenologische Modelle
- (Quasi-)Physikalische Modelle

Ersteres basiert in den meisten Fällen auf statistischem Verhalten von Objektdaten als In- und Output und funktioniert daher auf einer höheren Abstraktionsebene. Der zweite Ansatz zielt auf eine stärker physikalische Implementierung ab, die für gewöhnlich eine sogenannte Rohdatenschnittstelle (z.B. für Radarerkennungen, Lidar-Punktwolken, Rohbilder) erfordern und stellt daher spezifischere Anforderungen an die Daten, die durch die Simulationsumgebung zur Verfügung gestellt werden. Beide Ansätze haben ihre Stärken und Schwächen, z.B. im Hinblick auf die Leistung, Genauigkeit und den Implementierungsaufwand. Für die Zwecke des Projekts wurde der phänomenologische Modelltyp ausgewählt, da er am besten für die gewünschten Funktionen von automatisierten Autobahnpiloten geeignet ist.

Ein phänomenologisches Modell erhält ideale Objekte aus der Umgebungssimulation und modifiziert diese unter Berücksichtigung sensorspezifischer Phänomene. Der Output des Sensormodells enthält erkannte Objekte (einschließlich falsch-positiver Erkennungen (Geister)), die sensorspezifische Eigenschaften haben (z.B. Abweichungen der Dimension, Position, Geschwindigkeit und individuelle Existenzwahrscheinlichkeiten).

Eine weitere wichtige Entscheidung im Hinblick auf die Standardisierung und Austauschbarkeit der Sensormodelle wurde einerseits durch die Definition der Open-Simulation-Interface (OSI) getroffen, welche das Protokoll Google-Protocol-Buffer (alias ‚Protobuf') nutzt, und andererseits durch die Wahl des Standards Functional-Mockup-Interface (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), was gemeinsam zum Ansatz des Open-Simulation-Model-Packaging (OSMP) geführt hat.

Die Auswahl von Simulationsumgebungen, welche die Simulationsläufe steuern, erfolgte während der Projektierung, indem die folgenden Projektpartner und ihre kommerziellen Werkzeugumgebungen ausgewählt wurden:

- IPG (CarMaker)
- Vires (VTD - Virtual Test Drive)
- dSPACE[5] (ASM)

Neben diesen wurde auch die Kompatibilität von proprietären Umgebungen von OEM-Projektpartnern mit dem obengenannten Simulationsmodelldesign erwogen. In Abbildung 56 ist die Entwurfsarchitektur zusammengefasst zu sehen.

[5] Assoziierter Projektpartner

Abbildung 56 Überblick über die Simulationsarchitektur

Implementierung

Die Implementierung der Sensormodelle wurde wie folgt arbeitsteilig verwirklicht.

Die Parametrierungen dieser Modelle wurden vor allem von echten Sensoren abgeleitet (z.B. Reichweite, Sichtfeld, dynamische und statistische Verhaltensattribute). Durch die Bereitstellung von auf OSMP basierenden FMI-Modellpaketerstellungsvorlagen konnte der Implementierungsaufwand gesenkt und die Einhaltung der gewählten Standards erleichtert werden.

Validierung

Zur Beantwortung der Frage, wie die Sensormodellvalidierung im Sinne von „ist das korrekte Modell implementiert?“ gestaltet werden sollte, wurden verschiedene Strategien diskutiert. Im Allgemeinen muss der Validierungsprozess einen Vergleich mit echten Sensordaten miteinbeziehen – z.B. Referenzdaten. Natürlich soll die Sammlung von Referenzdaten zugunsten einer umfassenden Sensormodellvalidierung im Vergleich mit Tests in der realen Welt nicht zu einem höheren Aufwand führen. Andererseits wird der Vergleich von Daten aus der realen Welt und synthetischen Daten definitiv darunter leiden, wenn unperfekte Referenzdaten im Zuge echter Messungen erhoben werden und dann für die Erzeugung synthetischer Daten zur Validierung über Replay2Sim verwendet werden. Weder ein Datenerfassungswerkzeug für echte Sensoren, noch eine beliebige Simulationsumgebung wird alle Umgebungsattribute, welche die Realität repräsentieren, erfassen oder bereitstellen können. Da eine Abweichung zwischen beiden implizit ist, stellt sich die Frage, was für eine Abweichung tolerabel ist und welche Arten von Attributen relevant sind und deshalb die Modellqualität beeinflussen.

Das übergeordnete Ziel der Sensormodellvalidierung im *PEGASUS*-Kontext ist die Fähigkeit, ein von einem Anbieter bereitgestelltes, validiertes Sensormodell bei der Validierung der automatisierten Fahrfunktionen beim OEM einzusetzen. Da es keine garantierten Gemeinsamkeiten der Simulationsumgebungen von Anbieter und OEM gibt, muss die Validierung auch dann gültig bleiben, wenn das Sensormodell in einer anderen Simulationsumgebung genutzt wird als jener, für die es validiert wurde. Um dies zu ermöglichen, nutzen wir einen zweistufigen Validierungsansatz.

- Validierungstestreihe für Ground-Truth-Quelle als Sensormodellinput:
  Auf Grundlage mehrerer repräsentativer Beispielszenarien werden Testfälle generiert, welche die tatsächliche Ground Truth, die von der Umgebungssimulation präsentiert wird, mit Referenzwerten abgleichen, um sicherzustellen,

dass die Ground Truth sich innerhalb akzeptabler Grenzen befindet (basierend auf den tatsächlichen Anforderungen der jeweiligen Sensormodelle).

- Validierungstestreihe für Sensormodelle:
  Auf Grundlage repräsentativer KPIs und der repräsentativen Beispielszenarien werden Testfälle generiert, welche den Sensoroutput mit Referenzgrenzwerten abgleichen und sicherstellen, dass das Sensormodelle Ergebnisse ausgibt, die charakteristisch sind und innerhalb des Rahmens der gesicherten KPI-Bereiche liegen.

Auf Grundlage des zweistufigen Ansatzes kann das Sensormodell als valide gelten, wenn es die Testreihe zur Sensormodellvalidierung erfolgreich durchläuft und falls es an eine Umgebungssimulation angeschlossen ist, welche die Testreihe zur Ground-Truth-Validierung besteht.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Validität des Sensormodells auf die Validierungsszenarien beschränkt ist. Für alle anderen Szenarien ist keine Prognose zur Genauigkeit des Sensormodells zulässig.

Es wurde ein Konzept und eine erste Implementierung der Validierungstestreihe für die Sensormodelle, die obenstehende Punkte abdeckt, entwickelt und auf Sensormodelle angewandt (s. Abbildung 57).

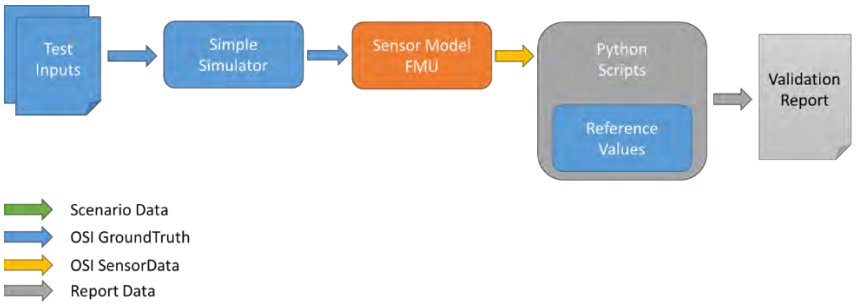


Abbildung 57 Bereitstellung von im Vorfeld generierter Ground Truth

Begonnene und fortlaufende Aufgaben

Der Aufbau der *PEGASUS*-Werkzeugkette wurde einerseits dadurch unterstützt, dass einerseits bereits existierende Artefakte zur Verfügung standen, wie die Standards OpenDRIVE und OpenSCENARIO, und andererseits durch die Erfahrung der beteiligten Werkzeug- und Sensorzulieferer. Abschließend wurden die obengenannten OpenX-Standards sowie die Schnittstelle Open-Simulation-Interface veröffentlicht, indem das Eigentum an ihnen an den ASAM e.V. übertragen wurde. Dort werden sie durch die Mitglieder weiterentwickelt werden und so auf internationaler Ebene breitere Anwendung finden. ASAM erwägt eine mögliche Verknüpfung mit ISO/TC 22/SC 33/WG 9, wodurch die OpenX-Standards referenziert und verfeinert werden und auf ein offizielles internationales Niveau gebracht werden sollen.

Tests auf dem Prüfgelände

Szenariobasierte Tests auf Prüfgeländen sind ein essenzieller Bestandteil der Bewertung hochautomatisierter Fahrfunktionen. Sie dienen der Erforschung des realen Verhaltens dieser Funktion unter definierten und daher beherrschbaren, echten Umgebungsbedingungen. Sie generieren Stützstellen, die zur Verifizierung der Simulationsergebnisse genutzt werden. Um reproduzierbare Tests durchzuführen, ist es notwendig, die besten aktuell verfügbaren Werkzeuge zu verwenden. Die Anforderungen an die Messtechnologie und die Kommunikation

zwischen den Testteilnehmern sind sehr hoch. Im *PEGASUS*-Projekt wurde eine komplette Werkzeugkette entwickelt, um die Anforderungen für Prüfgelände zu erfüllen.

Die Werkzeugkette besteht im Wesentlichen aus Verkehrssimulationsfahrzeugen, die automatisch (z.B. mithilfe von Fahrrobotern) konkrete Szenarien ausführen, um die Leistung des Prüffahrzeugs zu testen. Zwecks Beobachtung und Koordinierung der Testsequenz ist auch ein Leitstand Teil der Werkzeugkette. Um Gefahren zu minimieren und ein hohes Beherrschbarkeitsniveau zu erreichen, gehören auch Sicherheitsfahrer zu dieser Werkzeugkette. Die Sicherheit aller direkt und indirekt beteiligten Testteilnehmer spielt in dieser Beschreibung eine wichtigen Rolle.

Die folgenden Abbildungen und Absätze werden die technische Implementierung der *PEGASUS*-Prüfwerkzeugkette für Prüfgelände skizzieren. Die Werkzeugkette besteht aus einem statischen Teil, der den Leitstand und den stationären RTK-Korrekturdatensender beinhaltet, sowie einem dynamischen Teil, der aus dem am Experiment beteiligten Prüffahrzeug (Vehicle Under Test, VUT), Verkehrssimulationsfahrzeug (Traffic Simulation Vehicle, TSV) und/oder dem beweglichen weichen Aufprallziel (movable soft crash target, mSCT) besteht (siehe Abbildung 58). Nichtkritische Szenarien werden für gewöhnlich mit TSVs durchgeführt. Wird ein Szenario als kritisch klassifiziert, so können überfahrbare Elemente genutzt werden: die beweglichen weichen Aufprallziele (mSCTs). Diese können verwendet werden, wenn die Gefährdungs- und Risikobewertung es erlaubt und wenn keine Menschen am Testort oder auf der Teststrecke sind. Zu jeder Zeit während des Experiments müssen alle dynamischen Entitäten (VUT, TSVs, mSCTs) die exakten Positionen aller anderen Teilnehmer kennen. Aus diesem Grund ist eine robuste und dem Stand der Technik entsprechende Funkkommunikation erforderlich (meist WiFi Mesh). Um die höchstmögliche Positionsgenauigkeit zu erreichen, müssen alle ortsvariablen Testteilnehmer mit einer inertialen Messeinheit (IMU) ausgerüstet sein, die über Funk RTK-Korrekturdaten von einer D-GPS-Basisstation (Differential Global Positioning System) erhält.

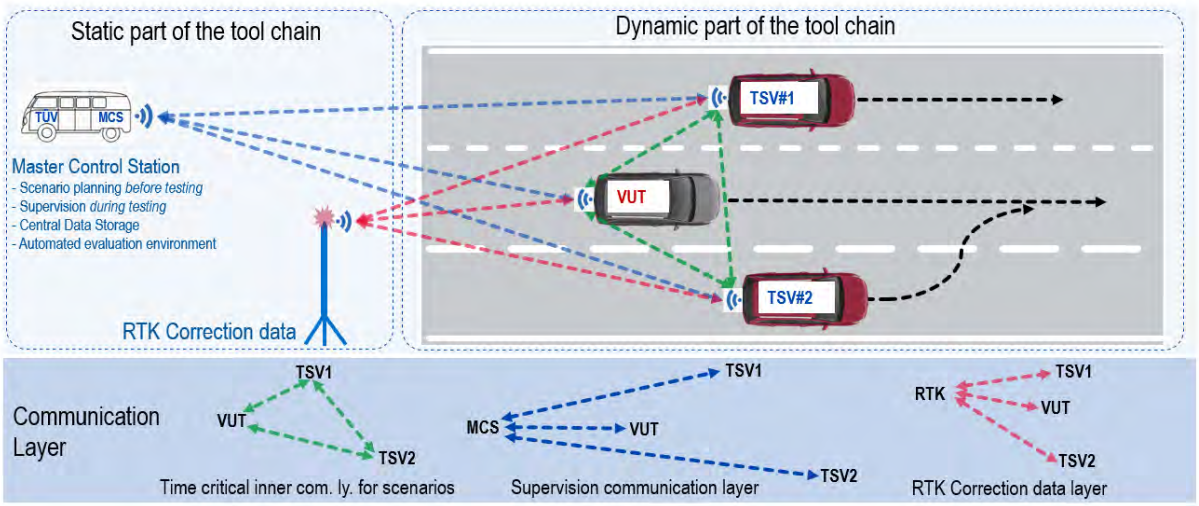


Abbildung 58 Übersicht über statische/dynamische Teile der Werkzeugkette sowie Kommunikationsebenen

Die Kommunikation der statischen und dynamischen Komponenten kann mit drei Ebenen beschrieben werden.

- Grün: Eine zeitkritische Kommunikationsebene zwischen den am Test beteiligten Fahrzeugen, die auf kurze Latenzzeiten angewiesen ist.
- Blau: Die Überwachungsebene zwischen den am Test beteiligten Fahrzeugen und dem Leitstand.
- Rot: Die RTK-Korrekturdatenebene, die Korrekturdaten für die in den dynamischen Elementen der Werkzeugkette verwendete inertiale Messtechnologie.

Verkehrssimulationsfahrzeug

Die Verkehrssimulationsfahrzeuge (TSV) (siehe Abbildung 59) spielen für den szenariobasierten Prüfansatz eine wichtige Rolle. Dank der exakten Steuerung und Positionierung des TSV im Szenario kann das VUT immer wieder in der gleichen, reproduzierbaren Situation getestet werden. Nur wenn der Test präzise und wiederholbar ist, können die Pass/Fail-Kriterien mit Gewissheit für eine verlässliche Bewertung evaluiert werden. Zusätzlich zu den IMU und WiFi-Einheiten sind die TSVs mit einer programmierbaren, longitudinalen und lateralen Steuereinheit ausgestattet. Dies ist notwendig, um sicherzustellen, dass wiederholte Testfälle vergleichbare Resultate ergeben. Das Fahrzeugkontrollsystem, das zur Kontrolle der internen Aktoren für die longitudinale und laterale Fahrzeugführung verwendet wird, kann über eine Schnittstelle konfiguriert werden. Wie in *PEGASUS* geschehen, kann die Fahrzeugführung durch Kontrolle der internen Aktoren implementiert werden oder aber konventionell mithilfe von Fahrrobotern für Lenkung, Bremse und Gaspedal.

Das Sicherheitskonzept erfordert, dass ein Sicherheitsfahrer physisch im Fahrzeug anwesend ist, um im Falle eines Fehlers eingreifen zu können. Während der Testfalldurchführung betätigt dieser konstant einen Totmannschalter, der sich direkt auf dem Lenkrad befindet. Wenn der Fahrer den Schalter loslässt, wird die automatisierte Fahrzeugführung sofort abgeschaltet.

Über ein Tablet oder einen Laptop wird der Sicherheitsfahrer kontinuierlich über den aktuellen Teststatus informiert. Um die aktuelle Position des TSV zu erhalten, muss eine hochpräzise IMU (Ortungstechnologie) oder eine vergleichbare Technologie im Fahrzeug installiert sein. Die IMU bestimmt jederzeit die Position des TSV mithilfe von GPS-Daten und D-GPS-Korrekturdaten. Eine externe WiFi(-Mesh)-Antenne wird für die Kommunikation mit den anderen Testteilnehmern und dem Leitstand genutzt. Als Alternative zur D-GPS-Korrektur können Korrekturdaten auch über Mesh-Informationen erhalten werden. Um eine permanente Energieversorgung der Messtechnologie und des Echtzeitrechners zu gewährleisten, muss eine von der Elektrik unabhängige Energiebereitstellung sichergestellt werden. Des Weiteren müssen alle am Test beteiligten Fahrzeuge sowie der Leitstand mit leistungsstarker Synchronisationssoftware und -hardware ausgerüstet sein (Echtzeitrechner).

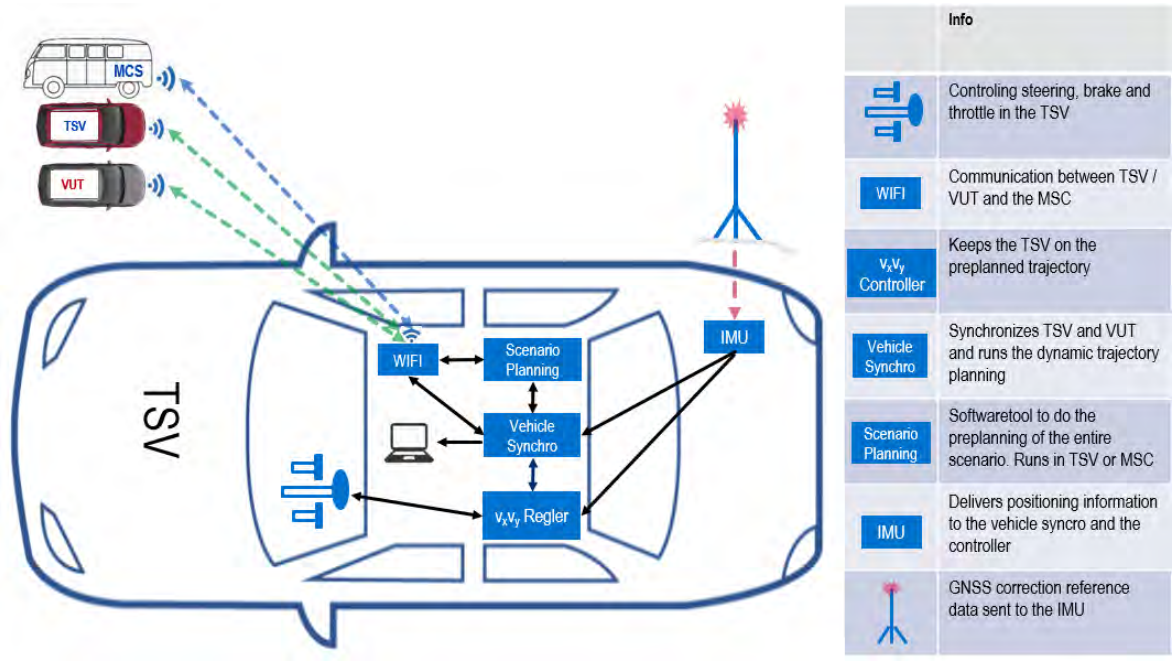


Abbildung 59 Überblick über Komponenten im TSV

Prüffahrzeug

Das Prüffahrzeug (VUT) (siehe Abbildung 60) nimmt als dynamisches, ortsvariables Objekt, das auch eine nicht-deterministische Fahrstrategie anwenden kann, eine besondere Stellung ein. Wie das TSV muss auch das VUT mit Software und Hardware für die Synchronisation ausgerüstet sein, da es in gewissen Szenarien undefinierbare Zustände erreichen kann, die wiederum definierte TSV-Manöver auslösen.

Da das VUT nur beobachtet wird, wird hier auf die Schnittstelle zur Kontrolle der internen Aktoren verzichtet. Um verschiedene Szenarien durchführen zu können, muss die exakte Position des VUT allerdings den TSVs zur Verfügung stehen. Dies geschieht wie bei den TSVs mithilfe einer IMU, die wiederum jederzeit die Position des VUT über D-GPS und duale GPS-Antennen bestimmt. Zur Übermittlung der Information an die anderen Testteilnehmer wird ein WiFi(-Mesh) genutzt. Um alle Testfahrzeuge miteinander mit niedriger Latenz zu verbinden, erfordert das Setup einen leistungsstarken Rechner mit entsprechender Software. Das VUT muss zudem von einer zuverlässigen Stromquelle versorgt werden. Der Sicherheitsfahrer erhält Informationen über ein Tablet/einen Laptop. Der Sicherheitsfahrer kann den Test in kritischen Situationen immer unterbrechen und das Testnetzwerk auflösen, indem er den Notausschalter betätigt.

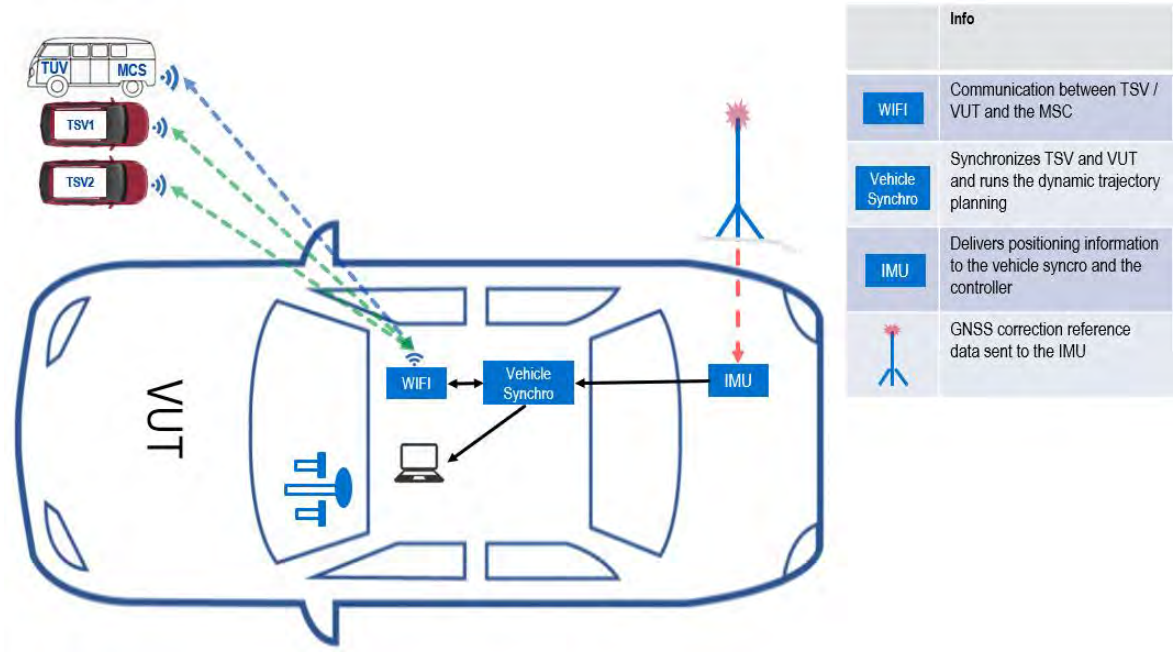


Abbildung 60 Überblick über Komponenten im VUT

Übergeordneter Leitstand

Die übergeordnete Leitstand (Master Control Station, MCS) ist die zentrale Stelle zur Überwachung der Leistungen in Prüfgeländetests (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**Abbildung 61). Sie wird vom Testmanager genutzt, um alle Testteilnehmer zu koordinieren und die korrekte Durchführung des Tests zu überprüfen. Zu diesem Zweck ist die MSC über die Überwachungs-Kommunikationsebene mit den dynamischen Teilen der Werkzeugkette verbunden.

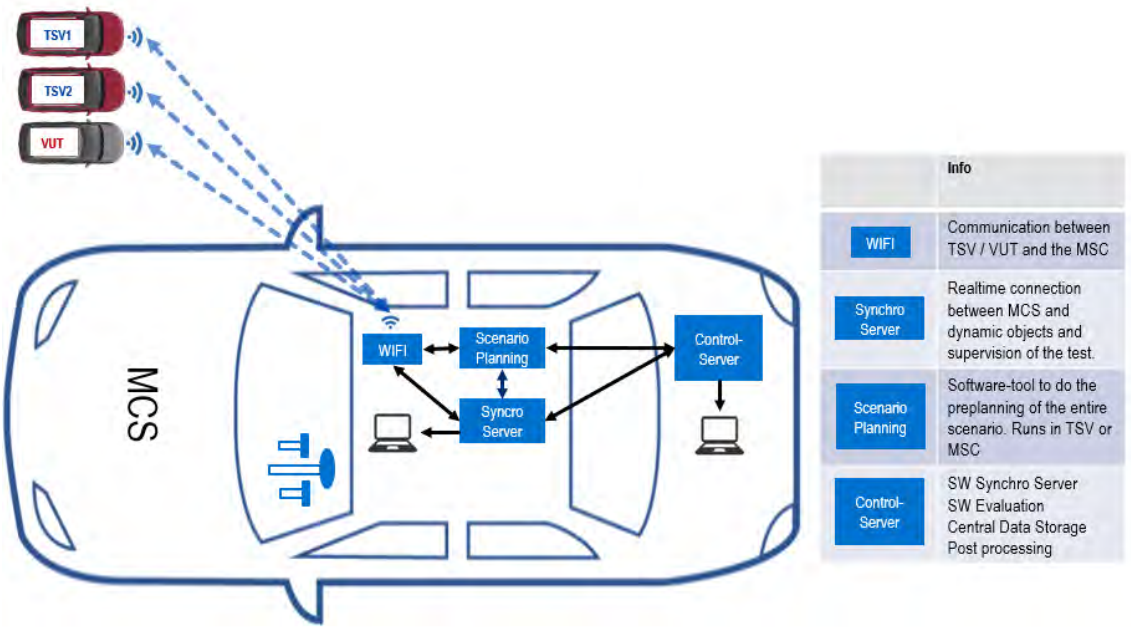


Abbildung 61 Überblick über Komponenten im MCS

Der Leitstand kann stationär in einem Gebäude oder aber mobil in einem Fahrzeug eingerichtet werden, wie es in der *PEGASUS*-Werkzeugkette der Fall ist. Der Ort des Leitstands auf dem Testgelände muss vom Testbetreuer so gewählt werden, dass eine gute Übersicht über den Bereich der Szenariodurchführung gewährleistet ist und die Zu- und Ausfahrten des Bereichs überwacht werden können. Der Betreuer erhält alle Informationen von den Fahrzeugen in Echtzeit über die Überwachungssoftware. Darüber hinaus bietet die Software eine Funktionalität zur Unterbrechung des Tests mittels eines Software-Notausschalters. Falls der Ort des Leitstands dem Testmanager nicht den erforderlichen Überblick über das Testgelände erlaubt, kann stattdessen Videoüberwachung eingesetzt werden.

Zusätzlich zur Überwachungsaktivität kann der Leitstand auch Daten evaluieren und mithilfe eines leistungsstarken Rechners Simulationen durchführen.

Methodik der Vorabtests und des Haupttests

Nach Erhalt des Testfalls wird mithilfe von Expertenwissen eine übergeordnete Beschreibung des zu fahrenden Szenarios erzeugt. Unter Verwendung geeigneter Software wird diese Beschreibung dann in ein automatisch ausführbares Szenario konvertiert. Die Sicherheitsfahrer, die Teil des Sicherheitskonzepts sind, führen die ersten Vorabtests bei reduzierter Geschwindigkeit durch. Nach einigen Wiederholungen und Anpassungen der Automationsparameter wird der Haupttest mehrmals durchgeführt. Die generierten Messdaten werden zur Evaluation des VUT im Hinblick auf Pass/Fail-Kriterien verwendet und der *PEGASUS*-Datenbank zur Verfügung gestellt. Der erste Teil der Werkzeugkette, der in Abbildung 62 zu sehen ist, zeigt die Testvorbereitung bis zum Haupttest mit den generierten Daten.

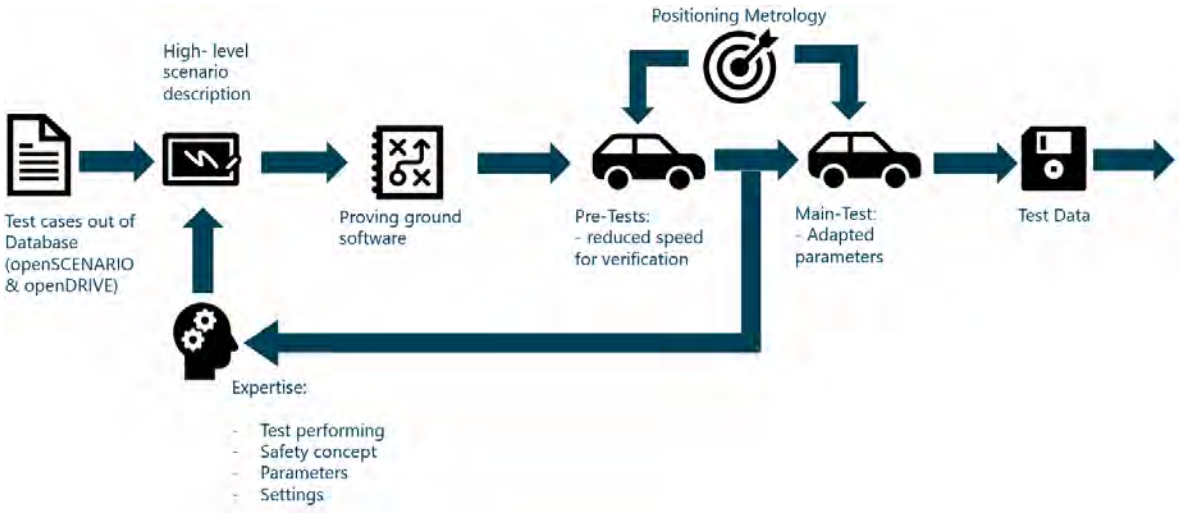


Abbildung 62 Methodik der Vorabtests und des Haupttests

Das Expertenwissen umfasst Fachwissen zur Testausführung, zu Testparametern, zur Einstellungsdetails für die Messtechnologie und vor allen Dingen zum Sicherheitskonzept.

Die folgenden Regeln müssen streng befolgt werden, um die Sicherheit während der Versuchsdurchführung zu gewährleisten:

- Bei allen Tests, in denen die longitudinale und/oder laterale Führung der Testfahrzeuge durch Fahrroboter oder Steuergeräte erfolgt, sind Sicherheitsfahrer zur Notfallabsicherung in allen Fahrzeugen anwesend.
- Die Fahrer müssen speziell geschult sein und über eine anerkannte Fahrerlaubnis für Testfahrten verfügen. Am Testtag müssen alle Fahrer separat über die Risiken der jeweiligen Szenarien informiert werden und Reaktionsstrategien für den Fall eines Szenarioabbruchs vereinbaren. Die für jedes Szenario durchgeführte Risikobewertung dient hierbei als Hilfe.
- Falls die Risikobewertung auf ein gesteigertes Risiko für Sicherheitsfahrer und/oder andere beteiligte und unbeteiligte Personen hindeutet, muss der Experimentator die Tests ablehnen. Die Zustimmung des Testbetreuers wird außerdem verweigert oder zurückgenommen, falls während der Umsetzung auf dem Testgelände weitere primäre Bedenken (Feedback von den Sicherheitsfahrern) oder sekundäre Bedenken (ungeeignetes Wetter, Reibungskoeffizienten, Mitnutzer auf Prüfgelände, Eignung für den Test, etc...) aufkommen.
- Vor jedem Testtag muss der Testleiter prüfen, ob alle Sicherheitsfahrer im Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis für die entsprechende Fahrzeugklasse sind und einen entsprechenden Beleg vorlegen können (Führerschein). Falls ein Testfahrer aufgrund eines Fahrverbots keinen Führerschein vorlegen kann, den Besitz einer Fahrerlaubnis aber mithilfe anderer anerkannter Dokumente belegen kann, so kann dies für die Tests auf dem Testgelände akzeptiert werden (nach Absprache mit dem Betreiber des Testgeländes).
- Während des Tests muss die Audiokommunikation zwischen den Sicherheitsfahrern in den TSVs, dem VUT und dem Testbetreuer im Leitstand jederzeit gewährleistet sein.
- Alle Szenarien werden im Vorfeld der physischen Testfalldurchführung simuliert, um eine bessere Einschätzung der potenziellen Kollisionsrisiken zu ermöglichen. Alle Manöver werden zudem im Vorfeld bei niedrigen Geschwindigkeiten getestet (< 30 km/h). Die Geschwindigkeit wird dann erhöht, wobei die Geschwindigkeits-

erhöhungen in jedem Szenario von den Sicherheitsfahrern in einem gemeinsamen Dialog nach ihrem jeweiligen Ermessen festgelegt werden.

- Selbst wenn ein Szenario bereits vorher getestet wurde, wird es zu Beginn eines neuen Testtags zunächst erneut bei niedriger Geschwindigkeit durchlaufen. Dies liegt ebenfalls im Ermessen der Sicherheitsfahrer.
- Bevor ein neues Szenario getestet wird, müssen die in die Szenariobeschreibung eingegebenen Daten geprüft werden. Die entsprechenden Benutzerschnittstellen der Leitstandumgebung oder der Fahrzeuge müssen die Möglichkeit zur Durchführung der erforderlichen Überprüfungen bieten. Besondere Aufmerksamkeit muss dabei den physikalischen Grenzen aller Fahrzeuge gewidmet werden (erforderliche vs. mögliche longitudinale und laterale Beschleunigungen, etc.) Falls keine unplausiblen Werte vorliegen, kann das Szenario mit niedrigen Geschwindigkeiten durchgeführt werden.
- Vor Testbeginn muss die Hardware und Software an jedem Testtag auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft werden. Erst wenn alle Komponenten getestet wurden, eine sichere Datenkommunikation zwischen den Fahrzeugen etabliert wurde und die Sicherheitsfahrer die Kommunikation untereinander geprüft haben, können die Tests gestartet werden.
- Alle Fahrzeuge einschließlich des Leitstands müssen mit einem Verbandskasten nach DIN 13157 ausgestattet sein.
- Alle am Test beteiligten Fahrer oder zumindest 3 Sicherheitsfahrer und ein Leitstandbediener müssen alle zwei Jahre an einem Erste-Hilfe-Kurs teilnehmen (2 Tage oder 16 Schulungseinheiten).
- Die Checklisten müssen an jedem Testtag vollständig abgearbeitet werden (s. Tabelle 10, Tabelle 11, Tabelle 12, Tabelle 13).

Tabelle 10 Checkliste VUT / TSV

Hinsichtlich VUT / TSV zu prüfende Punkte	Erfüllt?
Alle Räder sind in einwandfreiem Zustand	
Alle Reifendrucke sind im Hinblick auf Herstellerspezifikationen und den Lastzustand angepasst	
Die Funktion der Betriebsbremsanlage ist uneingeschränkt	
Die Fenster bieten dem Testfahrer eine gute Sicht	
Alle Beleuchtungen funktionieren ordnungsgemäß	
Keine losen Gegenstände im Fahrzeug (vor jeder Fahrt!)	
Erste-Hilfe-Ausrüstung im Fahrzeug	
Notrufnummer des Testgeländes (oder der nächstgelegenen Feuerwehr/Polizei) deutlich sichtbar im Fahrzeug angebracht	

Tabelle 11 Checkliste für Automationssystem

Hinsichtlich des Automationssystem zu prüfende Punkte	Erfüllt?
Alle im Fahrzeug installierten Komponenten sind gut befestigt (Steuergerät, Messtechnologie, Tablets/Laptops, Notausschalter/Totmannschalter)	
Alle elektrischen Verbindungen (einschließlich Datenkabel) sind gut befestigt	
Funktion des Totmannschalters/Notausschalters überprüft	
Falls verfügbar, Bewegungsfreiheit und korrekte Installation der Fahrroboter überprüfen	
Korrekte Positionierung und festen Sitz der Dachstrukturen (Antennen) überprüfen	
Ladezustand der Pufferbatterie ausreichend	

Tabelle 12 Checkliste Sicherheitsfahrer

Hinsichtlich des Sicherheitsfahrers zu prüfende Punkte	Erfüllt?
Fahrer ist im Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis und ist für Tests im mittleren Dynamikbereich sowie für Maximalgeschwindigkeiten geschult worden	
Der Fahrer ist am Testtag frei von geistigen oder physischen Beeinträchtigungen	
Der Fahrer wurde im Umgang mit dem Automationssystem geschult	
Der Fahrer trägt die notwendige Schutzausrüstung (Handschuhe, Schuhe, Helm, Anzug ...) beim Test nach eigenem Ermessen	
Erste-Hilfe-Ausbildung liegt vor	

Tabelle 13 Checkliste allgemeine Sicherheit

Hinsichtlich der allgemeinen Sicherheit zu prüfende Punkte	Erfüllt?
Beim Aufenthalt außerhalb des Fahrzeugs muss auf dem Testgelände stets eine Warnweste getragen werden.	
Immer mit eingeschaltetem Licht fahren.	
Es muss immer ein Funktelefon getragen werden, um einander und den Testleiter kontaktieren zu können.	
Mit anderen Teilnehmern auf der Strecke sprechen	
Tests sollten nur bei guten Witterungsbedingungen und guten Sichtverhältnissen durchgeführt werden (trockene Straße (wasserfrei), kein bis leichter Wind, kein Nebel).	
Funkdisziplin und präzise Funkkommunikation muss auf dem Testgelände eingehalten werden.	

- Den Sicherheitsfahrern stehen weitere Hard- und Softwarefunktionen zur Steigerung der Sicherheit zur Verfügung, welche im folgenden Absatz detaillierter beschrieben werden:
  - Virtuelle Zäune
  - Kollisionswarnung
  - Vorherige Simulation des Szenarios
  - Annäherung an Zielgeschwindigkeiten
  - Risikobewertung des Szenarios
  - Evaluation des Testgeländes inkl. kooperativer Tests

Robotergesteuerte Fahrzeuge haben sowohl hardware- als auch softwaregestützte Sicherheitsmerkmale. Die primäre Verantwortung für die Sicherheit des Fahrzeugs und der umgebenden Fahrzeuge/Fußgänger liegt beim Sicherheitsfahrer. Die eingebauten Werkzeuge für zusätzliche Sicherheit sind:

- Hardware (VUT und TSV):
  - Totmannschalter - das Loslassen des nahe am Lenkrad platzierten Aktivierungsschalters gibt den Sicherheitsfahrern in den TSV die volle Kontrolle und maximale Sicherheit. Im VUT, welches lediglich beobachtet wird, ist immer ein Notausschalter in Reichweite, mit welchem der Versuch abgebrochen und das gesamte System abgeschaltet werden kann.
  - Notausschalter, auch vom Beifahrersitz aus erreichbar.
  - Federkraft-Sicherheitsbremse, die von einem elektromechanischen Getriebe gehalten wird; nur für fahrerlose Tests (nicht in der *PEGASUS*-Werkzeugkette eingesetzt)
- Software (VUT und TSV):
  - Lenkwinkel, Geschwindigkeit und Beschleunigung können für die Pfadverfolgung eingeschränkt werden.
  - Testabbruch, falls die Regelabweichung der einzelnen Achsen (Gaspedal, Bremse, Lenkung) einen festgelegten Wert überschreitet.
  - Die Genauigkeit der IMU wird überwacht. Falls sie einen Schwellenwert unterschreitet oder die Verbindung abbricht, wird der Test abgebrochen.
  - Es können Fehlergrenzwerte für die Pfadsequenz festgelegt werden. Wird der eingestellte Wert erreicht, so wird der Test abgebrochen.
  - Es können Fehlergrenzwerte für die Geschwindigkeitskontrolle festgelegt werden. Wird der eingestellte Wert erreicht, so wird der Test abgebrochen.
  - Virtuelle Leitplanken können verwendet werden, um die Fehlergrenzwerte für die Bahnführung und die Geschwindigkeitskontrolle innerhalb definierter Pfadsegmente zu ändern.
  - Abbruchparameter stellen sicher, dass eine vorher definierte Reaktion erfolgt, wenn ein Test abgebrochen wird (z.B. Bremsen, Information an alle Fahrzeuge).
  - Kritische Abschnitte können so konfiguriert werden, dass sie während eines Testabbruchs eine definierte Kontrolle der Lenkung, der Bremse und des Gaspedals erlauben.
- Kommunikations- und Überwachungssoftware (VUT, TSV und Leitstand):
  - Tests werden mit vollsynchronisierten Fahrzeugen durchgeführt. Diese passen ihre aktuelle Geschwindigkeit und ihren Pfad auf Grundlage von Fehlern des Referenzfahrzeugs an.
  - Tests können von jedem Fahrzeug aus abgebrochen werden, indem der Notausschalter gedrückt wird.

- Jedes Fahrzeug kennt die Position der anderen Fahrzeuge.
- Parameter in Relation zu anderen Fahrzeugen können zum Auslösen eines Testabbruchs verwendet werden.
- Die Konfigurationsdaten für synchronisierte Fahrzeuge werden überprüft, um sicherzustellen, dass sie alle das gleiche Koordinatensystem und die gleiche Uhr verwenden (GPS-Zeit).
- Mit jedem Testprotokoll kann ein Code definiert werden, um sicherzustellen, dass alle Fahrzeuge das gleiche Szenario absolvieren.
- Die Positionen aller Fahrzeuge auf dem Testgelände werden dem Teilnehmer angezeigt.
- Der Leitstand führt einen Kollisionscheck durch, der Fahrzeuge stoppen kann, falls nötig.
- Der Leitstand kann alle Fahrzeuge anhalten.
- Der Leitstand sendet einen Echtzeit-Watchdog an jedes Fahrzeug. Wird diese Übermittlung gestoppt oder geht das Signal verloren, so hält das Fahrzeug an.

Wenn die Gefährdungen des konkreten Szenarios bewertet wurden und das Risiko minimiert wurde, wird das eigentliche Hauptexperiment unter Verwendung des geplanten Fahrszenarios mit korrekten, spezifikationsgemäßen Rahmenbedingungen durchgeführt (OpenSCENARIO). Über die Anwendung des Sicherheitskonzepts (siehe oben) und die Durchführung der Szenarioschulung für Sicherheitsfahrer hinaus müssen einige weitere technische Aspekte von den Testern berücksichtigt werden. Der eigentliche Haupttest muss unmittelbar nach Testende auf Validität geprüft werden. Es sind mindestens drei valide Wiederholungen des Haupttests erforderlich, damit er als abgeschlossen gelten kann. Der Test ist valide, wenn die erforderlichen Toleranzen aus der OpenSCENARIO-Datei eingehalten werden. Falls diese nicht genau genug beschrieben wurden oder technisch und physisch nicht implementiert werden können (aufgrund von Messunsicherheiten und Fehlerpropagation), so können die folgenden Referenzwerte verwendet werden (siehe Tabelle 14). Diese Referenzwerte werden im Zuge der praktischen Anwendung der Testwerkzeugkette empirisch bestimmt. Ein stabiler Betrieb der Werkzeugkette ist möglich, wenn diese Werte eingehalten werden.

Tabelle 14 erlaubte Abweichung physikalischer Werte im Hauptexperiment

Physikalischer Wert	Erlaubte Abweichung (Unterschied zwischen Ziel- & tatsächlichem Wert)
Position in Querrichtung	± 0,1 m
Position in Längsrichtung	± 0,3 m
Abstand zwischen zwei beweglichen Entitäten in Querrichtung	± 0,2 m
Abstand zwischen zwei beweglichen Entitäten in Längsrichtung	± 0,6 m
Geschwindigkeit	± 1/3,6 m/s
Relative Geschwindigkeit zwischen zwei in Bewegung befindlichen Entitäten	± 2/3,6 m/s
Gierwinkel	± 0,5 °
Relativer Gierwinkel zwischen zwei in Bewegung befindlichen Entitäten	± 2 °

Um die Abweichung zu evaluieren, ist es notwendig, die entsprechenden Größen aufzuzeichnen. Zusätzlich müssen Kanäle für die spätere Evaluation des VUT und anderer Variablen als informative Kanäle aufgezeichnet werden (Tabelle 15). Es wird empfohlen, dass alle Fahrzeugdaten der teilnehmenden Fahrzeuge entlang der gleichen Zeitachse aufgezeichnet werden (z.B. GPS-Zeit).

Tabelle 15 Im Hauptexperiment aufzuzeichnende Messkanäle

Messkanal
Position im Weltkoordinatensystem (X, Y, Z)
Geschwindigkeit im Weltkoordinatensystem (X, Y, Z)
Beschleunigung im Weltkoordinatensystem (X, Y, Z)
Ruck im Weltkoordinatensystem (X, Y, Z)
Nick-, Wank- und Gierwinkel (in Fahrtrichtung) aller Fahrzeuge
Nick-, Wank- und Giergeschwindigkeit aller Fahrzeuge
Relative Positionen aller Fahrzeuge im Weltkoordinatensystem (X, Y, Z)
Relative Geschwindigkeiten aller Fahrzeuge im Weltkoordinatensystem (X, Y, Z)
Relative Beschleunigungen aller Fahrzeuge im Weltkoordinatensystem (X, Y, Z)
Relativer Gierwinkel (in Fahrtrichtung) aller Fahrzeuge
Alle Auslösebedingungen (0 und 1)

Nachdem der Test durchgeführt wurde, werden die Daten weiterverarbeitet. Die vom Datenrekorder generierten Daten werden in das *PEGASUS*-Dateiformat konvertiert und im Hinblick auf Pass/Fail-Kriterien evaluiert. Abbildung 63 Methodik der Datennachbearbeitung bietet eine Übersicht des Prozesses.

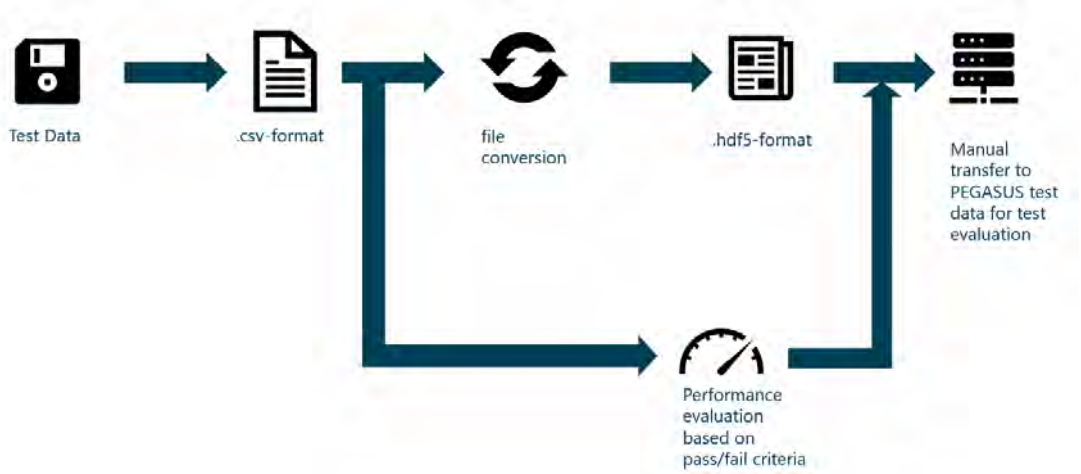


Abbildung 63 Methodik der Datennachbearbeitung

Nachdem die notwendigen Aktivitäten durchgeführt worden sind, werden die Resultate manuell in die *PEGASUS*-Datenbank übertragen.

Testfahrt im Realverkehr

Feldtests sind eine Testplattform zur Erprobung der HAF-Funktion in einer echten Verkehrsumgebung mit unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, jedoch ohne konkrete Testfälle.

Test der HAF-Funktion im Realverkehr (Langzeiterprobung):

- Identifizierung von spezifischen Einzelsituationen im Rahmen der ereignisbasierten Simulation (unbekanntes Verhalten, neue Szenarien und/oder neue Parameter, Verstoß gegen Pass-Kriterien)
- Identifizierung von Fehlern/Beeinträchtigungen des Systems aufgrund von Umwelteinflüssen, die gegenwärtig nicht direkt mithilfe von Modellen simuliert werden können, da noch keine geeigneten Physikmodelle zur Verfügung stehen.
- Durchführung spezieller „Bestehens"-Bewertungen (z.B. Risiko beim Überholen oder Folgen anderer Fahrzeuge)

Der Feldtest findet auf öffentlichen Straßen statt und nutzt bestehende Infrastruktur (z.B. Testfeld A9, geodätisch vermessene Strecken innerhalb des PEGASUS-Projekts) Gegebenenfalls müssen Vorgaben für Strecke und Tageszeiten in Betracht gezogen werden, um herausfordernde Bedingungen zu schaffen (z.B. starkes Verkehrsaufkommen, Tunnel oder Wetter).

Input sind globale Vorgaben für Bedingungen (z.B. im Hinblick auf die Strecke, Witterungsbedingungen, Tageszeit, Woche oder Monat, besondere Umgebungen wie z.B. Tunnel, besondere Kurven ...), Pass-Kriterien, Originalfahrzeug als Testfahrzeug.

Der Output ist eine evaluierte Realverkehr-Testfahrt, Messdaten als Input für die Datenbank (Rückfluss in die Datenbank). Dies bedeutet: Messdaten im OEM-Format, Messdaten im PEGASUS-Format als Datenbankinput, die Datenanalyse findet in der Datenbank statt. Erwartete Ergebnisse sind beispielsweise evaluierte Testfahrtdaten, neue Szenarien und/oder neue Parameter für existierende Szenarien, Input für Replay2Sim.

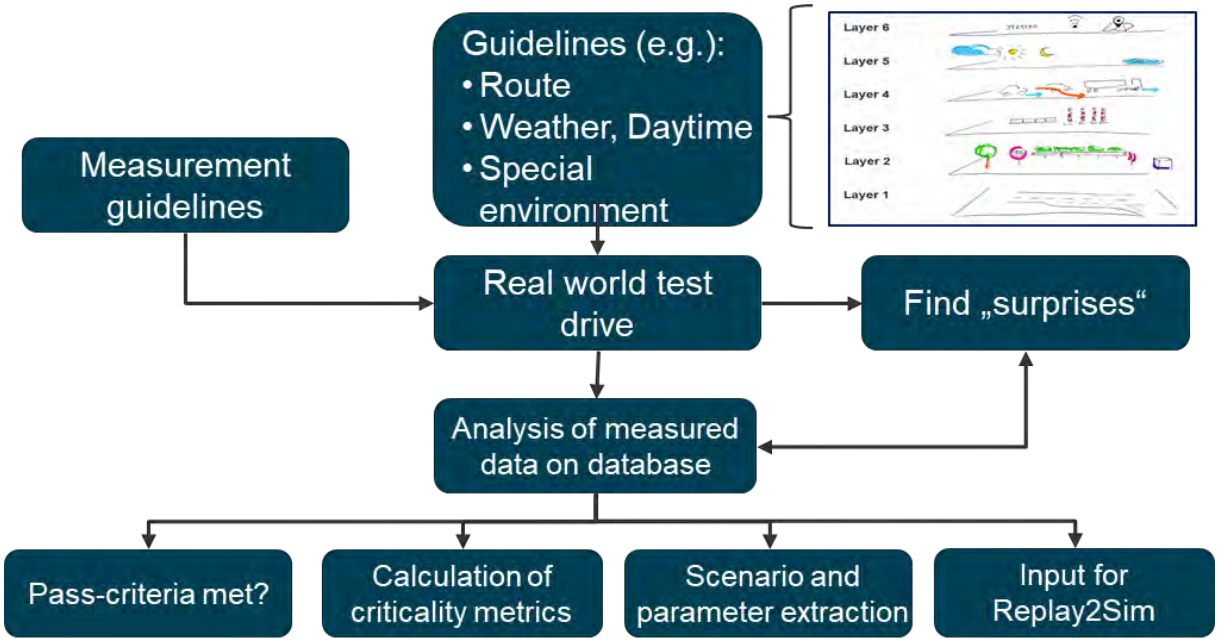


Abbildung 64 Die Gesamtarchitektur des Feldtests

Abbildung 65 Beispiele für PASS/FAIL-Kriterien für den Feldtest

(15) Testdaten

Der Container mit den Messdaten beinhaltet im Allgemeinen die obligatorischen *PEGASUS*-JSON-Signale. Die Daten aus Simulationstests und Prüfgeländetests liegen jeweils in einem eigenen Datenbeschreibungsformat vor, abhängig von der angewandten Messtechnologie, Simulationsarchitektur oder den angewandten Werkzeugen sowie der Bus-Architektur des Testobjekts. Um die Behandlung der Testdaten zu standardisieren, wurde im *PEGASUS*-Projekt ein allgemeines Testdatenformat definiert. Dieses Testdatenformat sollte die folgenden harten Kriterien erfüllen:

- in der Lage sein, das getestete Szenario vollständig zu beschreiben
- Metriken können auf die Testdaten angewandt werden

Es sollte zudem die folgenden weichen Kriterien erfüllen:

- einfache Nutzbarkeit als Input für die PEGASUS-Methode, besonders für echte Testfahrten

Die harten Kriterien entsprechen vollständig den Anforderungen der PEGASUS-Szenariendatenbank. Deshalb wurde beschlossen, die PEGASUS-JSON-Formatbeschreibung zu nutzen, was den Vorteil bietet, dass Datenbankskripts leicht auf die Testdatensätze angewandt werden können. Der einzige Unterschied zwischen diesem Container und dem Container in Schritt 7 ist die Tatsache, dass die das Ego-Fahrzeug beschreibenden Signale von einem Fahrzeug mit aktivierter Fahrfunktion geliefert werden (Closed Loop). Im Datencontainer von Schritt 7 ist es möglich, dass Ego-Signale durch ein Fahrzeug ohne automatisierte Fahrfunktion geliefert werden, z.B. mit Open-Loop oder manuellem Fahren.

Um unterschiedliche Testdatensätze aus unterschiedlichen Testinstanzen zu vergleichen, muss ein Konverter implementiert werden, der die gemessenen Signale und ihr Format in das *PEGASUS*-JSON-Format umwandelt. Dieser Konverter kann in der Simulation, auf dem Prüfgelände und in Realverkehrtests genutzt werde, so lange die Eingangssignale sorgfältig ausgewählt werden. Er sichert ebenfalls die Vergleichbarkeit der Testergebnisse aus unterschiedlichen Testinstanzen und ermöglicht es so eine gegenseitige Verifizierung der Ergebnisse.

Die Testdaten aus der Simulation, vom Prüfgelände und aus Fahrten im Realverkehr können auch als Input für eine zweite Iteration der *PEGASUS*-Methode genutzt werden. Daher sollte ein Konverter implementiert werden, um die Ergebnisdaten in das gemeinsame Inputformat der Datenbank zu konvertieren.

Dank der standardisierten Schnittstelle können die Testdaten leicht in die *PEGASUS*-Datenbank hochgeladen werden, einschließlich eines Kennzeichens, das deren jeweilige Ursprungstestinstanz anzeigt. Dieses Kennzeichen muss beim Hochladen vom Simulations- oder Prüfgeländedaten aktiviert werden, um die berechneten Verteilungen nicht zu stören. Die in der Datenbank berechneten Parameterverteilungen müssen die Realität widerspiegeln. Die in der Simulation und auf dem Prüfgelände geprüften kritischen Szenen können diese Verteilungen jedoch "virtuell" beeinflussen und dürfen nicht vermengt werden. Dagegen sollten reale Testfahrten immer in die Szenariodatenbank hochgeladen werden, um die berechneten Parameter und Szenarioverteilungen zu verbessern.

(16) Evaluation und Klassifizierung

Die „Testevaluation“ ist der letzte Prozessschritt in der Sequenz zur Definition der Testmethode. Innerhalb des Prozessschritts *Evaluation der Testergebnisse* werden die Testdaten kategorisiert und zu unterschiedlichen Zwecken evaluiert. Die Ergebnisse werden zusammengefasst und je nach Zweck möglicherweise an eine Testinstanz zurückgegeben, um einem weiteren iterativen Bewertungsschritt unterzogen zu werden. Sofern die Resultate bestimmte Kriterien erfüllen, bricht der iterative Bewertungsprozess ab und die Ergebnisse werden an den nächsten Prozessschritt weitergegeben, wobei es sich um die übergeordnete Risikobewertung handelt.

Der iterative Bewertungsprozess dient mehreren Hauptzwecken (s. Abbildung 66):

- iterative Bewertung innerhalb der Simulation, um kritische Szenario-Teilräume zu finden
- Kontrolle von PASS/FAIL-Kriterien
- Identifizierung der konkreten Szenarien (FAIL-Kriterien erfüllt), für welche eine (manuelle) Bewertung erstellt werden musste (Leistung im konkreten Szenario entspricht der eines Menschen oder nicht)
- Identifizierung der konkreten Szenarien, welche die PASS-Kriterien erfüllt haben
- Weitergabe von Testresultaten konkreter Szenarien an andere Testinstanz zur vergleichenden Verifizierung
- Kontrolle des „Testende-Kriteriums“

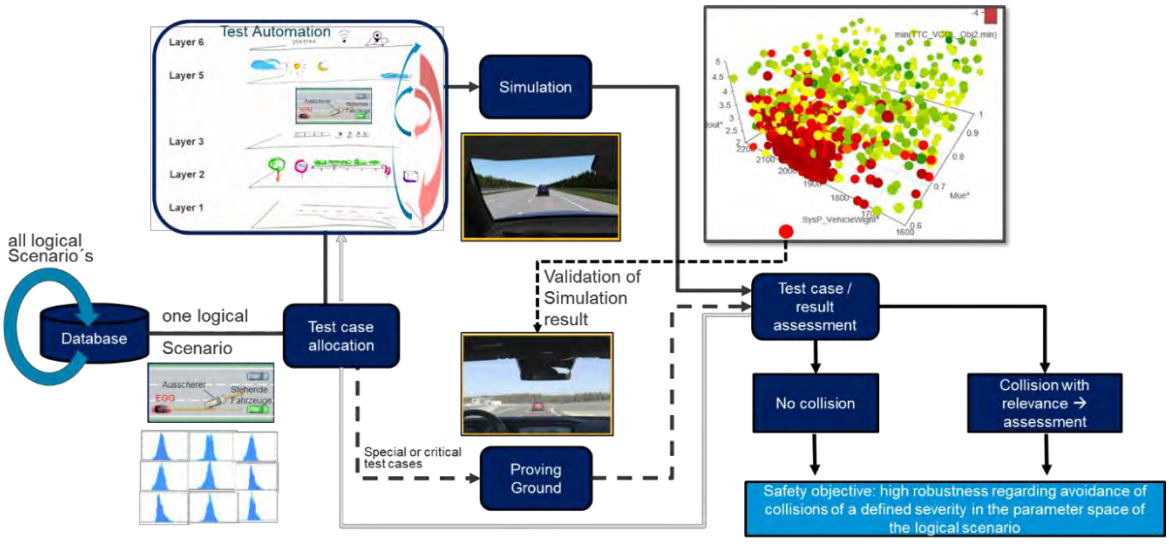


Abbildung 66 die Gesamtarchitektur der Testmethode für ein logisches Szenario

Zunächst findet eine Evaluation der Einzeltestergebnisse jedes einzelnen konkreten Szenariotests statt, der entweder vom Prüfgelände oder aus der Simulation stammt. Im iterativen Bewertungsprozess der Simulation (siehe Schritt 12) wird es innerhalb eines logischen Szenarioraums Gruppen von Testergebnissen geben, die im Hinblick auf die Suche nach kritischen Szenario-Teilräumen evaluiert werden. Falls ein solcher Teilraum nicht ausreichend beschrieben werden kann, werden die Ergebnisse inklusive der stochastischen Variation zur weiteren Bewertung an die Testautomation zurückgegeben.

Ein anderer Zweck der Zurückgabe von Testergebnissen ist der verifizierende Quervergleich, z.B. falls ein Testresultat eines konkreten Szenarios aus der Simulation in einer echten, aber klinischen Testumgebung verifiziert werden muss.

Bezüglich des Testende-Kriteriums für ein logisches (oder konkretes) Szenario wird auf Schritt (12) im Kapitel Testkonzept verwiesen. Das Testende-Kriterium für einen Satz logischer Szenarien ist erfüllt, wenn das jeweilige Testende-Kriterium für jedes logische Szenario erfüllt wurde.

(17) Testergebnisse

Das Ziel der Testmethode (siehe Testkonzept) ist die Identifizierung von sicherheitskritischen Parametern oder Parameterräumen in der ODD des L3-Systems. Die Testergebnisse variieren je nach Input der Testmethode: konkretes Szenario (Sonderszenario), logisches Szenario oder ein Satz logischer Szenarien.

Für jedes konkrete Szenario:

- Die Bewertung (bestanden / nicht bestanden) erfolgt durch die Evaluation der Testergebnisse mit den entsprechenden Kritikalitätsmetriken für jedes konkrete Szenario.

Für jedes logische Szenario:

- Bewertung als „bestanden“ oder „nicht bestanden“, berechnet durch Evaluation der Testergebnisse mit der entsprechenden Kritikalitätsmetrik, zu jedem analysierten konkreten Szenario (durch das Testautomationsverfahren generiert).

oder

- Beschreibung des Parameterteilraums, in dem eine Kritikalitätsmetrik einen Sicherheitsverstoß meldet, einschließlich Näherungswert für Ausmaß und Wahrscheinlichkeit.

(18) Risikobewertung

Die Bewertung der Verhaltenssicherheit (Behavioral Safety Assessment) im Rahmen von *PEGASUS* fokussiert sich auf die Bewertung der HAF-Funktion in einzelnen Testfällen. Dabei werden für jeden einzelnen Testfall unterschiedliche Metriken angewandt, um zu bestätigen, dass die HAF-Funktion vordefinierte Verhaltenskriterien erfüllt. Im spezifischen *PEGASUS*-Kontext sind diese vordefinierten Kriterien (a) das Einhalten angemessener Sicherheitsabstände, (b) keine Kollisionen zu verursachen und (c) Kollisionen abzumildern, falls möglich. Diese entsprechen dem in Schritt 12 beschriebenen Testkonzept. Während der BSA wird für jedes dieser Kriterien evaluiert, ob die HAF-Funktion es erfüllt hat oder nicht. Auf Grundlage des Ergebnisses für jedes Kriterium wird eine Methode vorgeschlagen, um zu bestimmen, ob ein einzelner Testfall bestanden oder nicht bestanden wurde.

Darüber hinaus diskutiert die BSA die notwendigen Informationen für die Extrapolation des Ergebnisses eines einzelnen Testfalls auf sein semi-konkretes Szenario und sein logisches Szenario sowie auf die übergeordnete Operation Design Domain, um aussagekräftigere Ergebnisse abzuleiten.

Mehrstufige Bewertung der Verhaltenssicherheit

Der erste Teil der BSA nimmt die Bewertung einzelner Testfälle in den Fokus. Dabei wird angenommen, dass die Testfälle aus unterschiedlichen Fokusbereichen (z.B. Unfallanalyse, Automationsrisiken, FOT-Daten und Simulation) von (18) in einem vereinheitlichten Format bereitgestellt werden, wie oben beschrieben. Abbildung 67 zeigt die verschiedenen Stufen der BSA. Die erste Stufe befasst sich mit der Frage, ob die HAF-Funktion die erforderlichen Sicherheitsabstände auf Grundlage von Metriken wie Time-To-Collision oder dem RSS-Modell (Shalev-Shwartz, Shammah, & Shashua, 2017).

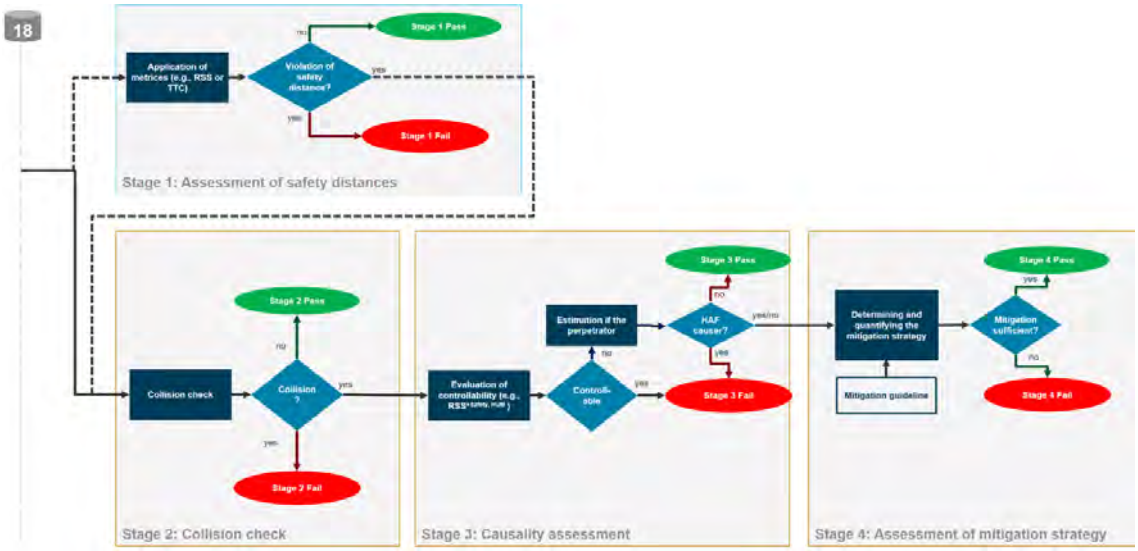


Abbildung 67 Mehrstufige Bewertung der Verhaltenssicherheit für einen einzelnen Testfall

Wird ein Sicherheitsabstand nicht eingehalten, ist Stufe 1 nicht bestanden, andernfalls ist sie bestanden. Hier ist zu beachten, dass an diesem Punkt nicht unterschieden wird, ob die HAF-Funktion oder ein anderer Verkehrsteilnehmer den Verstoß gegen die Vorgaben verursacht hat. Stufe 1 kann je nach Testkonzept überflüssig sein, was durch die gestrichelte Linie hervorgehoben wird.

Während Stufe 2 den eigentlichen Kollisionscheck beinhaltet, wird auf Stufe 3 die Kausalitätsbewertung durchgeführt. Stufe 3 ist von großer Wichtigkeit, da bis hierher nicht bestimmt werden kann, ob die HAF-Funktion oder jemand anders ein mögliches Versagen auf den Stufen 1 oder 2 verursacht hat. Deshalb wird zuerst evaluiert, ob die Situation für die HAF-Funktion zu beherrschen gewesen wäre. In *PEGASUS* ist diese Beherrschbarkeitsevaluation auf die Beurteilung der physikalischen Grenzen des Fahrens im Hinblick auf die Kollisionsvermeidung beschränkt. Wäre die HAF-Funktion nicht in der Lage gewesen, die zur Kollision führende Situation zu beherrschen und wurde die Kollision durch die HAF-Funktion verursacht, so wird eine zusätzliche Untersuchung vorgenommen.

Während Stufe 3 im *PEGASUS*-Projekt eine wichtige Rolle spielt, kann es unter Umständen schwierig sein, die Kausalität für alle relevanten Szenarios automatisch zu bewerten. Auch wenn es möglich sein kann, die fahrerischen Grenzen mit einem gewissen Unsicherheitsfaktor zu beurteilen, kann es sich als kompliziert erweisen einzuschätzen, wer den Unfall verursacht hat, da dazu für alle möglichen Szenarien generische Regeln abgeleitet werden müssten. Das RSS-Modell (Shalev-Shwartz, Shammah, & Shashua, 2017) enthält allerdings bereits ein Kausalitätsmodell, welches eine signifikante Zahl von Situationen abdeckt. In Zukunft können in diesem Bereich weitere Fortschritte erwartet werden. Bis dahin könnte das Urteil einer Expertengruppe herangezogen werden.

Zuletzt wird in Stufe 4 ermittelt, ob die HAF-Funktion die Kollision auf angemessene Weise abgemildert hat (z.B. durch Anwendung einer angemessenen Bremskraft). Dabei ist es irrele-

vant, ob die HAF-Funktion die Kollision verursacht hat oder nicht. Das ist der Fall, weil das *PEGASUS*-Projekt davon ausgeht, dass die HAF-Funktion die Kollision in jedem Fall abzumildern versuchen sollte, falls dies physikalisch möglich ist.

Nach Evaluation aller Stufen wird bestimmt, ob der Testfall bestanden wurde oder nicht. Der in *PEGASUS* verwendete Ansatz wird in Abbildung 68 dargestellt. Die erste Zeile zeigt ein umfassendes Versagen an, weil die HAF-Funktion den Sicherheitsabstand nicht eingehalten hat, eine Kollision verursacht hat und diese nicht angemessen gemildert hat. Die zweite Zeile zeigt einen Fall, in dem die HAF-Funktion die Sicherheitsabstände nicht eingehalten hat, aber keine Kollision geschehen ist. In diesem Fall kann das Gesamtergebnis „PASS-“ lauten, da das Verhalten der HAF-Funktion selbst ohne Kollision kritisch ist. Das Ergebnis in der dritten Zeile variiert in Abhängigkeit davon, ob die HAF-Funktion die Kollision verursacht hat (Stufe 3: 0) oder nicht (Stufe 3: 1), was die Wichtigkeit der Kausalitätsstufe verdeutlicht.

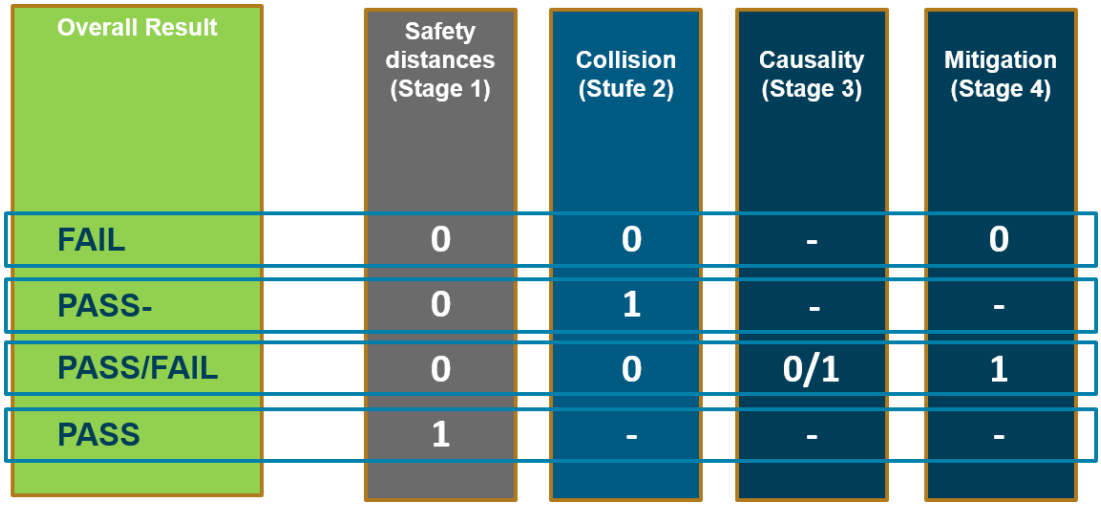


Abbildung 68 Beispiel für Gesamttestfallbewertung auf Grundlage der 4 vorgeschlagenen Stufen. 0 und 1 zeigen an, ob eine Stufe bestanden oder nicht bestanden wurde

Extrapolation von individuellen Testfallergebnissen

Eine zentrale Frage der Bewertung der Verhaltenssicherheit ist, welche Schlüsse daraus für das individuelle Testergebnis von **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gezogen werden können. Die fundamentalste Folgerung besteht darin, ob ein Testfall bestanden wurde oder nicht, und wenn nicht, aus welchem Grund. Dieses Ergebnis kann zum Beispiel für den Vergleich zweier Versionen von HAF-Funktionen verwendet werden, wenn während der BSA die gleichen arbiträr ausgewählten Testfälle genutzt werden.

Es können aussagekräftigere Schlüsse gezogen werden, wenn zusätzliche Informationen zum Kontext des Testfalls verfügbar sind, wie in Tabelle 16 gezeigt.

Tabelle 16 Beispiel für die Skalierung des Ergebnisses eines Einzeltestfalls auf sein logisches Szenario und die durchschnittliche Fahrleistung eines Jahres.

Untere Zeile: Grundergebnis Andere Zeilen: Spezifikationen für zusätzliche Inputs erforderlich, um aussagekräftigere Ergebnisse abzuleiten

Input für die Bewertung der Verhaltenssicherheit	Ergebnis
Anteil kritischer Szenarien in F_a.	Häufigkeit ($\frac{\mathrm{e_s}}{\mathrm{km}}$) inakzeptabler Szenarien $\mathrm{e_s}$.
Anteil der kritischen Verkehrssituationen während der durchschnittlichen Fahrleistung eines Jahres $\mathrm{F_a}$. Durch das überprüfte semi-konkrete/logische Szenario repräsentiert	Anteil [%] der von der HAF-Funktion gelösten kritischen Situationen, die in $\mathrm{F_a}$ enthalten sind.
Wichtigkeit des Testfalls π_i^R [%] im überprüften semi-konkreten/logischen Szenario, mit $\sum_{i=0}^{N_R} \pi_i^R = 1$. $N_R$ist die Gesamtzahl der Testfälle, die das Szenario repräsentieren	„Bestanden“-Anteil [%] im überprüften Szenario
Ergebnisse für die 4 Stufen eines einzelnen Testfalls	Gesamtergebnis des Testfalls wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

Eine Möglichkeit besteht in der Auswahl der Testfälle durch abstandsgleiches Sampling des Parameterraums eines logischen Szenarios (siehe Tabelle 16 zweite Zeile von unten). In diesem Fall wird die Wichtigkeit π_i^R des Testfalls durch die Gesamtzahl ausgewählter le N_R als $\pi_i^R = \frac{1}{N_R}$ definiert. Das Ergebnis ist der Anteil der Abschlüsse des überprüften logischen Szenario als „bestanden“. Des Weiteren zeigt Tabelle 16 Möglichkeiten auf, Schlüsse im Hinblick auf das Verhalten der HAF-Funktion während der durchschnittlichen Fahrleistung eines Jahres zu ziehen. Auch wenn solche Extrapolationen der individuellen Testfallergebnisse theoretisch möglich sind, stehen die dafür zusätzlich benötigten Inputparameter möglicherweise erst nach ausgiebigen Tests im Realverkehr zur Verfügung.

(19) Beitrag zur Sicherheitsaussage

Dieser Schritt enthält die Ergebnisse der Bewertung der Verhaltenssicherheit wie in Schritt (18) dargestellt sowie Informationen, welche die Identifizierung des zugehörigen logischen Szenarios erlauben. Inhalt dieser Datentonne ist die Verhaltenssicherheitsbewertung aus Schritt (18) und eine Datei, welche die ID des Testfalls und die ID seines logischen Szenarios enthält, ebenso wie das Ergebnis der multiplen Stufen von Schritt (18) und, falls verfügbar, die extrapolierten Ergebnisse, wie in Tabelle 16 von Schritt (18) beschrieben.

(20) Beitrag zur Sicherheitsargumentation

Die *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation ist als konzeptueller Rahmen zur Unterstützung der Sicherung und Freigabe von höheren Automationsstufen durch Strukturierung, Formalisierung, Kohärenz, Integrität und Relevanz zu verstehen. Sie wird durch die Einführung von fünf Ebenen strukturiert. Bereits etablierte Formalisierungen werden soweit möglich stets genutzt, um die Elemente jeder Ebene zu beschreiben. Diese Elemente werden über die Ebenen hinweg miteinander verknüpft, um eine kohärente Argumentation zu bilden. Zudem wird angeregt, die Integrität jedes Elements zu evaluieren, um eine zuverlässige Sicherheitsargumenta-

tion zu erarbeiten. Die Bewertung jedes Elements auf seine Relevanz hin empfiehlt sich ebenfalls als nützliche Maßnahme. Dieser Rahmen ist ein Vorschlag für die Integration von Forschungen zum Thema Technologieakzeptanz, existierenden Leitlinien oder Standards, die zu berücksichtigen sind, wenn HAF-Funktionen auf den Markt gebracht werden, und der logischen Struktur, mithilfe derer ein Sicherheitsnachweis erbracht wird. Die zentrale Annahme der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation lautet wie folgt: Wenn eine Kette von Argumenten, die unter Berücksichtigung des vorgeschlagenen Rahmens der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation erstellt wurde, einer kritischen Untersuchung standhält, stützt dies die Sicherung und Freigabe höherer Automationsstufen.

5 Fragen, 5 Paradigmen, 5 Ebenen

Es wird davon ausgegangen, dass eine Sicherheitsargumentation für HAF-Funktionen im Großen und Ganzen die folgenden fünf Fragen beantworten muss:

1. Wie wird die notwendige Einhaltung aller für die Homologation relevanten Standards und Vorschriften gewährleistet?
2. Welche Elemente sollte eine ausreichende Sicherheitsargumentation enthalten?
3. Wie kann eine Sicherheitsargumentation durch Evidenz gestützt werden?
4. Wie kann eine HAF-Funktion während ihres gesamten Lebenszyklus überwacht werden?
5. Was erwartet die Bevölkerung von hochautomatisierter Mobilität im größeren Zusammenhang?

Die erste Frage wird größtenteils durch die Etablierung von Qualitätsmanagementprozessen adressiert. Hält ein Produkt relevante Richtlinien oder Standards ein, so wird angenommen, dass es auch die Produktsicherheitsanforderungen erfüllt, soweit jene von den Richtlinien oder Standards abgedeckt werden.

Die Frage danach, welche Gestaltungsprinzipien bei der Entwicklung von HAF-Funktionen berücksichtigt werden sollten, wird zurzeit noch auf unterschiedliche Weisen beantwortet. Hier bietet sich Raum für die Standardisierung, um eine vereinheitliche Sicht darauf zu entwickeln, welche Prinzipien relevant sind und wie diese definiert werden. Vorausgesetzt, dass diese Gestaltungsprinzipien einen positiven Effekt auf die Sicherheit einer HAF-Funktion haben, scheint die Anwendung von dem neuesten Stand entsprechenden Prinzipien eine zentrale Voraussetzung dafür zu sein, dass hinreichende Bedingungen für die Sicherung und Freigabe höherer Automationsstufen geschaffen werden können. Dies kann als praktikabler erster Schritt der Operationalisierung der allgemeinen Ziele gesehen werden, die zum Beispiel von der deutschen Ethik-Kommission empfohlen werden: Falls eine generell positive Risikobilanz im Vergleich zur menschlichen Fahrleistung angenommen werden kann, stehen technisch unvermeidbare Restrisiken einer Markteinführung nicht entgegen (Ethics Commission Automated and Connected Driving appointed by the German Federal Minister of Transport and Digital Infrastructure, 2019).

Antworten auf die dritte Frage zu finden, ist eine der Haupttriebkräfte des *PEGASUS*-Projekts, wie in den vorherigen Abschnitten dieses Dokuments beschrieben. Die in *PEGASUS* entwickelten Methoden und Werkzeuge haben alle zum Ziel, Evidenz für eine Sicherheitsargumentation zu erbringen. Für die Sicherung der HAF-Funktionen ist es unerlässlich, die obengenannten Gestaltungsprinzipien und die abgeleiteten Sicherheitsziele mit Resultaten zu verknüpfen, die durch die Anwendung von Aktionen, Methoden und Werkzeugen wie jenen, die von den Mitgliedern des *PEGASUS*-Projekts entwickelt wurden, erzielt wurden. Nur wenn es eine logische Verknüpfung zwischen Gestaltungsprinzipien und den durch die Anwendung von Aktionen, Methoden und Werkzeugen erzielten Ergebnissen gibt, können diese Ergebnisse im Sinne einer Sicherheitsargumentation als evident betrachtet werden.

Die vierte Frage bezieht sich auf die systematische Überwachung der Markteinführung und während des gesamten Produktlebenszyklus. Es wird angenommen, dass das Produkt während seines Lebenszyklus mit besonderem Fokus auf Mängeln und unerwartetem Verhalten überwacht werden muss. Da es noch nicht möglich ist, einen statistisch validen Nachweis einer positiven Risikobilanz einer HAF-Funktion vor Markteinführung zu erbringen, sollte diesem Aspekt besondere Beachtung geschenkt werden (Philipp Junietz, 2019). An dieser Stelle bedarf es einer weiteren Klärung bezüglich einer einheitlichen Herangehensweise.

Die fünfte Frage versucht, eine Sicherheitsargumentation in den breiteren Kontext der Technologieakzeptanz einzubetten. Die Annahme lautet, dass ein sicheres Produkt notwendig ist, damit eine bestimmte Technologie akzeptiert wird, aber es scheint sehr wahrscheinlich, dass dies nicht alles ist. Die Beantwortung dieser Fragen dient mehr als nur der Sicherung von HAF-Funktionen. Sie dient vielmehr dem besseren Verständnis der Bedürfnisse der Menschen in Bezug auf HAF-Funktionen und soll es ermöglichen, die richtigen Schlüsse für die Entwicklung der hochautomatisierten Mobilität zu ziehen.

Als konzeptueller Rahmen möchte die *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation die zuvor genannten Fragen methodisch angehen: kurz gesagt, schlägt die *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation dafür fünf Ebenen vor, auf denen sich Elemente befinden. Ebene 0 bettet eine Sicherheitsargumentation in den breiteren Kontext der Technologieakzeptanz ein. Auf Ebene 1 werden übergeordnete Sicherheitsziele definiert, die erreicht werden müssen. Ebene 2 verknüpft Elemente über Ebenen hinweg, um einen Sicherheitsnachweis aufzubauen. Auf Ebene 3 werden Aktionen, Methoden und Werkzeuge entwickelt und implementiert, um Ergebnisse zu erzielen. Diese Ergebnisse werden evident (Ebene 4), wenn sie zu einem Sicherheitsziel auf Ebene 1 zurückverfolgt werden können.

Daher ist es das übergeordnete Ziel, auf strukturierte und formalisierte Weise eine relevante, kohärente und daher verifizierbare Sicherheitsargumentation mit Integrität zu schaffen. Handlungsleitend sind hier die fünf erwähnten Paradigmen: Strukturierung, Formalisierung, Kohärenz, Integrität und Relevanz.

Strukturierung bezeichnet hier die Organisation der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation auf fünf Ebenen. Diese Struktur soll mehr Klarheit in die weiteren Diskussionen zur Sicherheit und Freigabe höherer Automationsstufen bringen. Es muss zwischen zwei Arten von Ebenen unterschieden werden: Zum einen Ebenen außerhalb des Fokus von *PEGASUS*, die in den vorgeschlagenen Rahmen gesetzt werden können, um *PEGASUS* in einem größeren Zusammenhang zu verorten (Ebene 0), und zum anderen Ebenen und zugehörige Elemente, die direkt zur Beantwortung der Frage beitragen, wie sich die Sicherheit und Zuverlässigkeit nachweisen lässt (Ebenen 1-4).

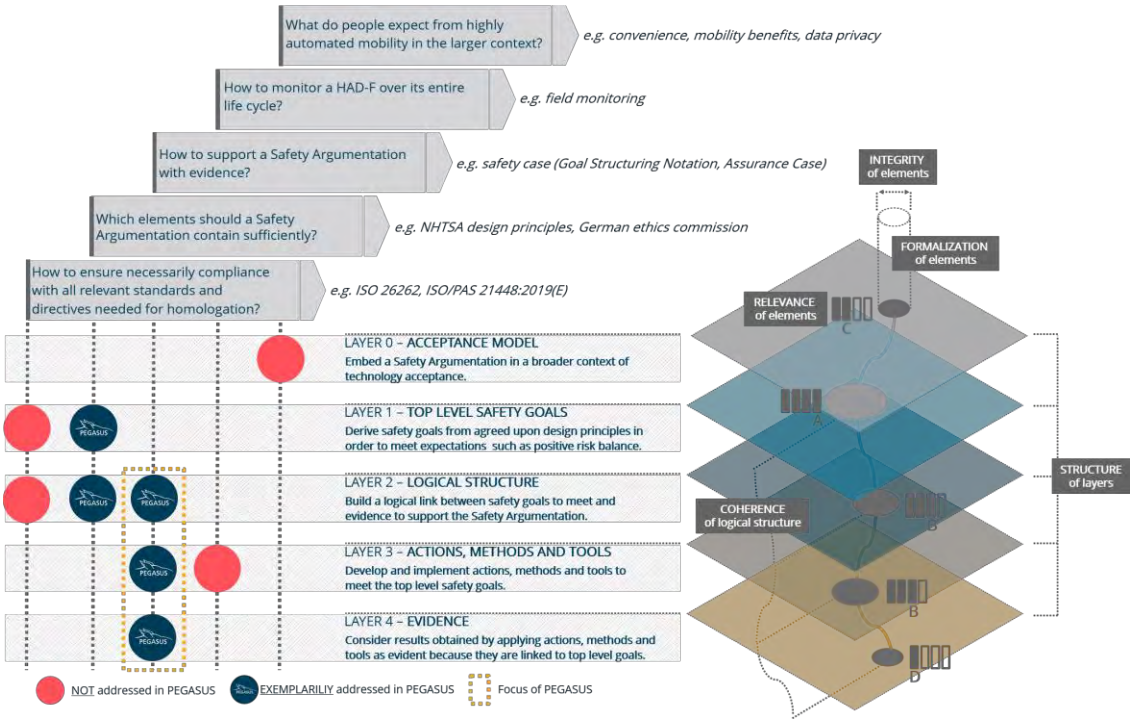


Abbildung 1: 5 Fragen, 5 Paradigmen, 5 Ebenen

Formalisierung bedeutet im Rahmen der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation, dass die einzelnen Elemente einer Ebene mittels einer definierten, standardisierten und idealerweise etablierten Notation explizit gemacht werden. Die Wahl der Notation ist hierbei abhängig von der Ebene und den darin enthaltenen Elementen, die es zu formalisieren gilt.

Kohärenz ist als die Verknüpfung einzelner Elemente innerhalb einer der postulierten fünf Ebenen der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation sowie über Ebenen hinweg definiert. Erst wenn es gelingt, Elemente über Ebenen hinweg sinnvoll miteinander zu verknüpfen, kann gezeigt werden, wie sich Sicherheit und Zuverlässigkeit nachweisen lassen und wie sich in einem größeren Kontext für gesellschaftlich akzeptierte, hoch automatisierte Mobilität argumentieren lässt.

Integrität im Sinne der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation ist als Qualitätskriterium der einzelnen Elemente der fünf Ebenen zu verstehen. Diese orientieren sich an den Qualitätskriterien empirischer Forschung. Grundsätzlich sind verschiedene Stufen der Integrität für die unterschiedlichen Ebenen und deren Elemente vorstellbar.

Tabelle 17 Integrität

	Ebene	Integrität
0	Akzeptanzmodell	Validität
1	Übergeordnetes Sicherheitsziel	Vollständigkeit, Stimmigkeit
2	Logische Struktur	Rückverfolgbarkeit
3	Aktionen, Methoden und Werkzeuge	Adäquatheit, Zuverlässigkeit, Reproduzierbarkeit
4	Evidenz	Korrektheit, Repräsentativität

Relevanz kann ebenfalls als Qualitätskriterium betrachtet werden, ist aber trotz Integrität unter Umständen nicht auf alle fünf Ebenen anwendbar. Relevanz ist insbesondere mit den Elementen von Ebene 2 verknüpft. Mit ihr soll zum Ausdruck gebracht werden, welchen „Reifegrad“ das jeweilige Element hat. Beispielsweise ist eine Methode, die zwecks Erzeugung von Evidenz zur Anwendung kommt und peer-reviewed veröffentlicht wurde, auf einer Ordinalskala höher einzustufen, als eine unveröffentlichte Methode. Die Integrität muss nicht zwingend mit der Relevanz korrelieren, jedoch kann erwartet werden, dass ein Element mit hoher Relevanz auch eine hohe Integrität aufweist.

Tabelle 18 Relevanz

Relevanz	Definition	Beispiel
D	unveröffentlicht	proprietäre bewährte Verfahrensweisen
C	veröffentlicht	Branchen-Weißbuch
B	peer-reviewed veröffentlicht	Artikel in wissenschaftlicher Zeitschrift
A	öffentlich verfügbarer Standard oder Vergleichbares	ISO-Standard

Ebene 0 – Akzeptanzmodell

Ebene 0 bettet *PEGASUS* in einen größeren Zusammenhang ein. Die Einzelheiten liegen nicht im Fokus von *PEGASUS.* Das Schlüsselelement dieser Ebene ist ein wissenschaftliches Modell, dass die Abhängigkeit der individuellen oder gesellschaftlichen Akzeptanz von HAF-Funktionen von mehreren Faktoren beschreibt. Eine zentrale Prämisse ist hier, dass individuelle oder gesellschaftliche Akzeptanz nicht monokausal erklärt werden kann. Diese Prämisse entspricht etablierten Modellen zur individuellen Technologieakzeptanz, wie etwa dem Technology Acceptance Model (TAM) (Davis, A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-user information systems: Theory and Results, 1985), (Davis, Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology, 1989) der Theory of Planned Behavior (TPB) (Ajzen, 1991), und der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) (Venkatesh, Morris, Davis, & Davis, 2003). Je nach Modell werden verschiedene Faktoren postuliert. Rahman et al. untersuchten die Tauglichkeit der erwähnten Modelle zur Beschreibung der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen (FAS) und geben einen Überblick über Studien, welche auf den erwähnten Modellen aufbauen (Rahmana, Lesch, Horrey, & Strawderman, 2017). Rahman et al. kommen zu dem Schluss, dass prinzipiell alle drei Modelle im Kontext der Akzeptanz von FAS eingesetzt werden können. Jedoch sind weitere Arbeiten notwendig, um die Theorien und Modelle an die Domäne anzupassen, weiterzuentwickeln und einen größeren Anteil der Varianz zu erklären (vgl. (Madigan, Louw, Wilbrink, Schieben, & Merat, 2017), (J.Haboucha, Ishaq, & Shiftan, 2017)).

Ebene 1 – Übergeordnete Sicherheitsziele

Gegenwärtig gibt es verschiedene Vorschläge dazu, wie dieses Thema anzugehen ist. Erstausrüster, Zulieferer, Verbände, Forschungsinstitute sowie nationale und internationale Regulierungsbehörden und Gesetzgeber haben alle ihre eigene Sicht darauf, welche Punkte berücksichtigt werden müssen, um das Versprechen einer gesteigerten Verkehrssicherheit durch die Einführung von HAF-Funktionen zu erfüllen. Je nach Autor werden diese zum Beispiel als Gestaltungsprinzipien, (prioritäre) Sicherheitskonzeptelemente, Leitlinien oder (ethische) Regeln bezeichnet. Sie alle streben gemeinsam Technologiesicherheit im Bereich der autonomen Fahrzeuge an. Eine Ver-

schmelzung dieser Herangehensweisen zur Etablierung einer vereinheitlichten und vollständigen Perspektive erscheint vernünftig. Nach bestem Wissen des Verfassers ist dies Gegenstand andauernder Diskussionen. Im Rahmen der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation werden 13 übergeordnete Sicherheitsziele, die direkt aus dem Bericht der deutschen Ethik-Kommission für automatisiertes und vernetztes Fahren (G_01) abgeleitet wurden, sowie die 12 prioritären, von der NHTSA (NHTSA, 2017) (G_02 – G_13) vorgeschlagenen Gestaltungselemente beispielhaft verwendet.

Hier wird argumentiert, dass die Erfüllung von G_02 bis G_13 einen positiven Einfluss auf die Erfüllung der allgemeineren Anforderung hat, die mit G_01 verbunden ist. Für die Zwecke von *PEGASUS* ist G_05 „Prozess und Vorgehensweise für die Erprobung und Validierung der HAF-Funktionen in der vorgeschriebenen ODD wird dokumentiert und berücksichtigt“ von besonderem Interesse, da es im Einklang mit den übergeordneten Projektzielen ist.

Ebene 2 – Logische Struktur

Beim Sicherheitsargument im Sinne der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation geht es um die Herleitung der notwendigen Schritte, um aus übergeordneten Zielen einen Nachweis der Sicherheit und Zuverlässigkeit erbringen zu können. Die logische Struktur der Argumentation wird explizit gemacht, um die folgende Frage zu beantworten: Warum ist ein bestimmtes erzieltes Ergebnis relevant für den Nachweis der Sicherheit und Zuverlässigkeit? Prinzipiell sind hierfür verschiedene Formalisierungen anwendbar: Ein Beispiel ist ISO 15026-2 (ISO, 2011) oder aber die Goal Structuring Notation (GSN) (Kelly & Weaver, 2004) (Origin Consulting (York), 2011), welche auch im weiter unten gegebenen Beispiel verwendet wird. Beide Ansätze formulieren handlungsleitende Ziele, die gewissermaßen als Erfolgskontrolle in der Argumentationskette dienen. Mittels einer standardisierten graphischen Notation werden Sicherheitsziele als Elemente der zweiten Ebene definiert sowie Strategien und Lösungen zur Erreichung dieser Sicherheitsziele erarbeitet. Darüber hinaus können weitere Informationen zu Rechtfertigungen, Annahmen und Kontext hinterlegt werden.

Wie bereits früher erwähnt, wird vorgeschlagen, die einzelnen Elemente der logischen Struktur des Sicherheitsarguments anhand einer Relevanz-Skala zu ordnen.

Ebene 3 – Methoden und Werkzeuge

Die Leitfrage für Ebene 3 der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation lautet: Wie kann nachgewiesen werden, dass die konkreten Sicherheitsziele aus Ebene 2 erreicht wurden? Dafür benötigt man Ergebnisse aus erster Hand. Als Teil der *PEGASUS*-Gesamtmethode wird in den vorhergehenden Kapiteln dieses Dokuments eine durchgängige und flexible Werkzeugkette beschrieben. All diese Aktionen, Methoden und Werkzeugen könnten mit spezifischen Sicherheitszielen verknüpft werden. Dies wird im Folgenden noch beispielhaft dargestellt.

Ebene 4 – Evidenz

Durch die Anwendung von auf Ebene 3 verorteten Aktionen, Methoden und Werkzeugen werden Ergebnisse erzeugt. Die Herausforderung besteht nun darin, diese einzuordnen und ihren Beitrag zur Erreichung eines konkreten Sicherheitszieles zu bewerten. Erst durch diesen Schritt kann ein Ergebnis zu Evidenz im Sinne der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation werden. Die Leitfrage für Ebene 4 ist daher: Kann ein Ergebnis als Evidenz für die Erreichung eines konkreten Sicherheitsziels betrachtet werden? Der entscheidende Unterschied zwischen den Begriffen „Ergebnis“ und „Evidenz“ im Sinne der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation ist daher, wie sie konkreten Sicherheitszielen zugeordnet werden können.

Die auf Ebene 3 beschriebenen Methoden und Werkzeuge können ebenso unterschiedlich sein wie die zu erreichenden konkreten Sicherheitsziele. Dies kann zu heterogenen Ergebnissen und Formaten, in denen Evidenz vorliegen kann, führen. Eine einheitliche Formalisierung kann daher nicht sinnvoll für alle Ergebnisse aus Ebene 4 vorgeschlagen werden.

An dieser Stelle erreichen wir einen zentralen Punkt der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation – die kritische Überprüfung der Argumentationsketten. Halten die Argumentationsketten, welche die einzelnen Elemente der Ebenen miteinander verbinden, einer kritischen Evaluation stand, so kann eine Freigabeempfehlung ausgesprochen werden.

Beispiel

Nach der obigen Vorstellung der *PEGASUS*-Sicherheitsargumentation folgt nun eine knappe Demonstration ihrer Anwendung. Das Beispiel wird in graphischer Form gegeben und bedient sich vorgeschlagener Formalisierungen. Hierbei ist zu beachten, dass dieses Beispiel nicht den Anspruch erhebt, eine vollständige oder ausreichend detaillierte Argumentationskette zu zeigen. Stattdessen soll es illustrieren, wie die – theoretisch beschriebenen – Ebenen in der Praxis angewandt werden könnten.

Ebene 0 zeigt ein Modell, dass auf UTAUT basiert, dieses Modell aber leicht abgewandelt und aus Gründen der Übersichtlichkeit ohne moderierende Effekte darstellt. Die zur Visualisierung der latenten Variablen verwendeten Ellipsen sollten nicht mit Elementen verwechselt werden, die für GSN genutzt werden (die Formalisierung stützt sich hier auf das Structural Equation Modelling (SEM), ein Ansatz aus der multivariaten Statistik.) Für die Forschung zur Technologieakzeptanz könnte die Relevanz im Prinzip mit B bewertet werden, da es umfangreiche Forschungen zu diesem Thema gibt. Nichtsdestotrotz mangelt es dem hier dargestellten konkreten Modell an Validität (Integrität), vor allem aus zwei Gründen: Es wurde durch den Verfasser abgewandelt und wurde für individuelle Technologieakzeptanz entworfen, nicht für gesellschaftliche Akzeptanz.

Auf Ebene 1 werden die übergeordneten Sicherheitsziele G_01 – G_13 adressiert. Strategie S_01 spiegelt das Argument wider, dass G_02 – G_13 die Erfüllung des übergeordneten Ziels G_01 unterstützen. Dieses Beispiel konzentriert sich auf G_05.

Ebene 2 adressiert vor allem die Operationalisierung von G_05. S_02 soll die bereits vorgestellte vierte Leitfrage widerspiegeln: Wie kann eine HAF-Funktion während ihres gesamten Lebenszyklus überwacht werden? G_14 (frühe Forschung und Entwicklung), G_15 (Produktentwicklung) und G_16 (Sekundärmarkt) zielen darauf ab, Prozesse und Verfahrensweisen für die Erprobung und Validierung der HAF-Funktionalität in der vorgeschriebenen ODD zu adressieren. Sie unterscheiden sich darin, mit welcher Phase des Produktlebenszyklus sie sich befassen. Dadurch kommt zum Ausdruck, dass es abhängig vom Lebenszyklus unterschiedlicher Prozesse und Verfahrensweisen bedarf. Dieses Beispiel konzentriert sich auf G_15: Prozess und Verfahrensweise für die Erprobung und Validierung der HAF-Funktionalität in der vorgeschriebenen ODD sind dokumentiert und werden im Hinblick auf die Markteinführung von HAF-Funktionen berücksichtigt.

Die Strategie S_03 beschreibt die übergeordneten Projektziele von PEGASUS zur Absicherung von HAF-Funktionen für die Markteinführung. An diesem Punkt wird deutlich, wo PEGASUS die Sicherung und Genehmigung höherer Automationsstufen unterstützen kann.

Die PEGASUS-Gesamtmethode wird durch G_17 – G_20 widergespiegelt. Diese entsprechen den vier Hauptclustern der PEGASUS-Methode, nämlich der Datenverarbeitung (G_17), Anforderungsdefinition und Konvertierung für Datenbank (G_18), Szenariensammlung und Datenbank (G_19) und Bewertung der hochautomatisierten Fahr-

funktion (inkl. Mensch) (G_20). Wie bereits erwähnt können die innerhalb dieser Cluster entwickelten Methoden zur Erfüllung von Ziel G_05 zurückverfolgt werden und sind daher für dieses konkrete Sicherheitsziel evident.

Das Beispiel konzentriert sich auf G_20 und insbesondere auf die Komposition einer Sicherheitsaussage nach G_21. Dies wurde in einem der vorgehenden Abschnitte detailliert erläutert. S_05 drückt die Grundannahme dieses Ansatzes aus, die Sicherheitsaussage in vier Einzelwertungen (Stufen) zu dekomponieren. Die Integrität könnte für Ebene 2 als hoch bewertet werden, da der vorgeschlagene Ansatz Rückverfolgbarkeit bietet. Die Relevanz könnte mit C-B bewertet werden.

Die Anwendung dieser konkreten Methode wie in Schritt (18) beschrieben ist auf Ebene 3 verortet. Da diese vorgeschlagene Methode noch nicht vollständig als Algorithmus implementiert wurde, mangelt es ihr an Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit, was die Integrität beeinträchtigt. Die Relevanz könnte in Abhängigkeit von der Stufe mit C-B bewertet werden. Durch die Anwendung dieser Methode erzielte Ergebnisse können als evident gelten, da sie mit dem übergeordneten Sicherheitsziel verknüpft sind und auf Ebene 4 verortet sind.

Tabelle 19 Zusammenfassung einer beispielhaften Sicherheitsargumentation

Element	Definition	Relevanz	Integrität
G_01	HAF-Funktion reduziert die Schadensschwere bis hin zu einer vollständigen Schadensvermeidung (positive Risikobilanz).	A	hoch, nicht im Widerspruch mit anderen Zielen auf dieser Hierarchieebene
S_01	Für die Erreichung von G_01 zu befolgende Prinzipien definieren (dekomponieren)	C	hoch, Dekomposition erscheint sinnvoll und entspricht dem NHTSA-Ansatz für das Beispiel
G_05	Prozess und Verfahrensweise für die Erprobung und Validierung der HAF-Verhaltensleistung in der vorgeschriebenen ODD sind dokumentiert und werden berücksichtigt	A	mittel, sofern es keine vereinbarte Liste von Sicherheitszielen auf dieser Hierarchieebene gibt, ist ein gewisser Grad an Überschneidungen unter den Zielen auf dieser Hierarchieebene wahrscheinlich
S_02	Prozess und Verfahrensweise für die Verifizierung und Validierung der Verhaltensleistung von HAF-Funktionen in der vorgeschriebenen ODD an die Stadien des Lebenszyklus der HAF-Funktion anpassen.	C	hoch, es erscheint sinnvoll, den gesamten Lebenszyklus eines Produkt zur Sicherung abzudecken
G_15	Anpassung an Produktentwicklung	C	mittel, hier kann eine weitere Klarstellung der Lebenszyklusstadien beziehungsweise besonderer Anforderungen erforderlich sein
S_03	Unterteilung des Prozesses und der Verfahrensweise für die Verifizierung und Validierung der Nennleistung der HAF-Funktion in der vorgeschriebenen ODD in Unterprozesse und Unterverfahrensweisen für die Produktentwicklung	C	hoch, es gibt einen praktischen Bedarf an Dekomposition, um Prozesse und Verfahrensweisen operationalisieren zu können
G_20	Bewertung der Verhaltensleistung der HAF-Funktion in der vorgeschriebenen ODD	C	hoch, eines der Hauptziele von PEGASUS
…	…	…	…
E_01	Sicherheitsabstände werden eingehalten (im konkreten Testfall)	C	mittel, Prüfung auf Sicherheitsabstandsverstöße kann implementiert werden, weitere Klarstellung könnte erforderlich sein
E_02	Keine Kollision (im konkreten Testfall)	C	hoch, Kollisionsprüfung ist praktikabel
E_03	Kollision nicht durch HAF-Funktion verursacht	C	niedrig, es fehlt eine implementierbare Definition der Ursächlichkeit
E_04	HAF-Funktion hat Kollision abgemildert	C	mittel, weitere Klarstellung der zu bewertenden Milderungsstrategie kann erforderlich sein

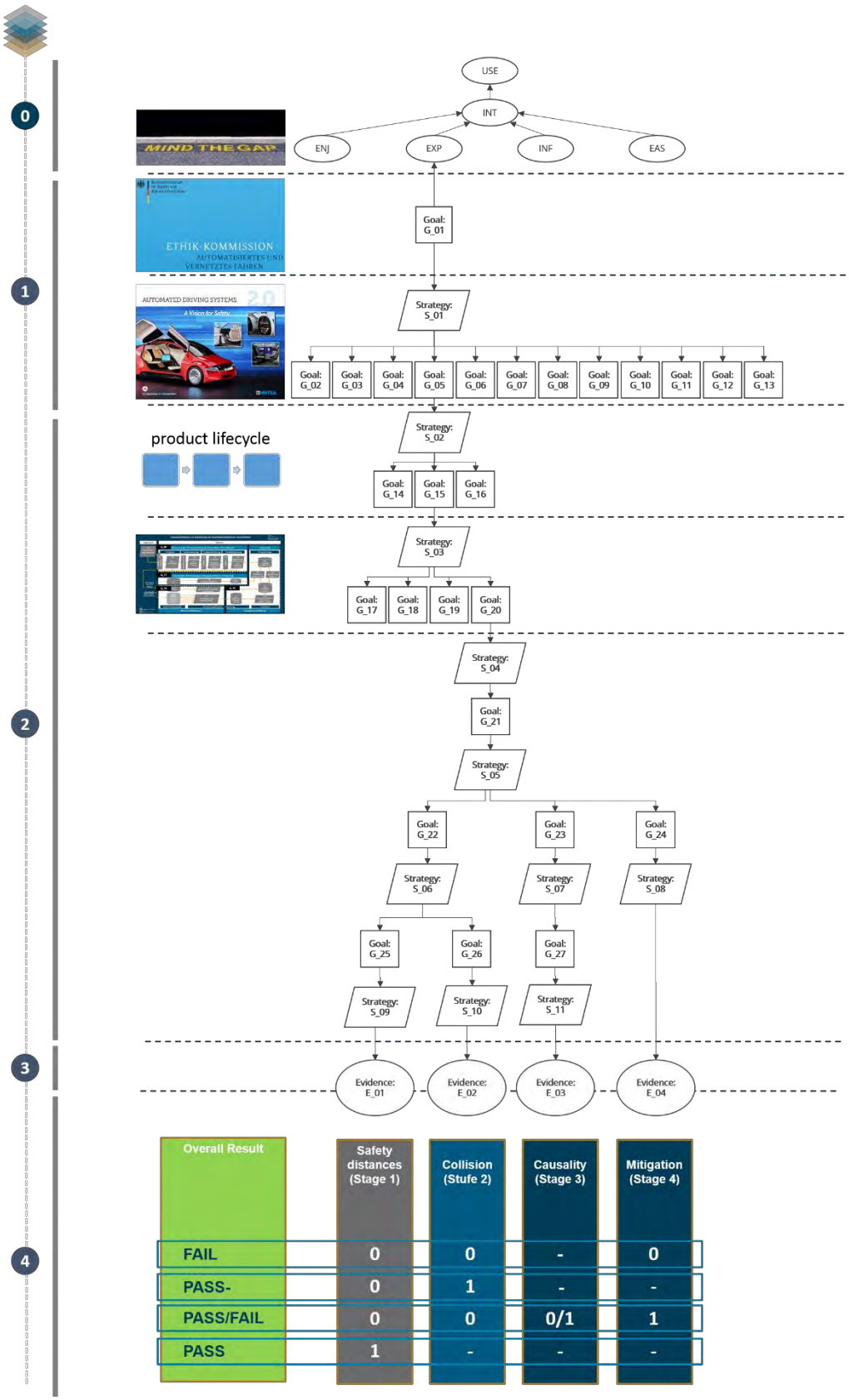


Abbildung 69 Beispielhafte Sicherheitsargumentation

2.4 Notwendigkeit der Förderung

Mit dem Erfolg des Projektes PEGASUS ist es insbesondere der deutschen Automobilindustrie und den Zulieferern im weltweiten Wettbewerb gelungen das Wissen im Bereich der Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen zu vertiefen und gemeinschaftlich eine Methode zur Absicherung zu erarbeiten. Dies soll im besten Fall eine frühere Markteinführung gegenüber der Konkurrenz ermöglichen.

Das Projekt war die konsequente Weiterführung/Umsetzung einer Reihe von öffentlich geförderten Projekten im Bereich der aktiven Sicherheit. Durch die frühzeitige Zusammenarbeit im Bereich Assistenzsysteme und aktive Sicherheit zählen die Automobilfirmen und die Zulieferindustrie aus Deutschland zu den Technologieführern weltweit. Diese Position sollte durch die Aktivitäten im Projekt PEGASUS gemeinsam mit wissenschaftlichen Partnern in ein vorwettbewerblichen Gemeinschaftsvorhaben gestärkt werden.

Der Erfolg der Marktfähigkeit von HAF-Systemen in den Fahrzeugen der deutschen Automobilindustrie wird bestimmt durch den gemeinsamen Erfolg.

Die im Projekt PEGASUS erarbeiteten Werkzeuge und Methoden zur Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen werden zügig und nachhaltig zur politischen und wirtschaftlichen Zielsetzung beitragen, Deutschland zum Technologieführer für Produkte zum hochautomatisierten Fahren zu machen. Sie sind der Schlüssel zu einer Form der Straßenmobilität, die für Wirtschaft und Gesellschaft mehr Komfort und Sicherheit bei höherer Wirtschaftlichkeit schafft.

Durch den ganzheitlichen, skalierbaren und flexiblen Testansatz konnte gezeigt werden, dass in kurzen Durchlaufzeiten valide Ergebnisse entstehen. Das stärkt in besonderem Maße die Wettbewerbsfähigkeit der Automobilindustrie. Zudem werden die im Projekt konkret aufgebauten Testprozesse und -Werkzeuge als Referenz dienen, um bei Herstellern, Zulieferern und Prüfstellen weitere Testeinrichtungen umzusetzen. Dadurch wird sich auch deren Wettbewerbsfähigkeit im internationalen Umfeld steigern.

Die Wettbewerbsfähigkeit bezieht sich dabei nicht mehr nur auf die bisherigen klassischen Mitwettbewerber, die unmittelbar aus der Automobil- und Zulieferindustrie stammen. Inzwischen treten Internet- und IT-Unternehmen wie Google und Apple in den Markt ein und entwickeln eigene Pläne zum automatisierten Fahren. Sie setzen auf methodischen Ansätzen aus ihrer Industrie auf und ziehen dabei große Vorteile aus ihren bestehenden Infrastruktursystemen aus riesigen Datenbanken und Serverfarmen. So können sie ihre fehlende Expertise im Automobilbau in hohem Maße kompensieren und mittelfristig den Markt mitbestimmen. Die Motivation solcher Unternehmen unterscheidet sich dabei noch aktuell deutlich von denen der klassischen Fahrzeughersteller. So hat z.B. Google offenkundig großes Interesse daran, umfassende Daten über Fahrten und Nutzer zu sammeln, um daraus Angebote in digitalen Bereichen, wie z.B. dem Smartphone, zu verbessern. Die Antragsteller sahen diese Entwicklung in jeder Hinsicht als kritisch und riskant, insbesondere für den Wirtschaftsstandort Deutschland und für die Sicherheit der im Prozess gesammelten Fahrzeug- und Nutzerdaten gegenüber Dritten.

Die Notwendigkeit zur Durchführung eines Projektes wie PEGASUS am Wirtschaftsstandort Deutschland mit einer sehr starken Automobil- und Automobilzulieferbranche war aus Sicht der Antragsteller in dem beschrieben umfangreichen Rahmen evident. Ein OEM im Premium-Segment wird in Zukunft nicht mehr ohne hochautomatisierte Fahrfunktionen und nicht mehr gegenüber dem starken Wettbewerb aus dem Ausland und aus der IT-Branche bestehen können. Mit der Einbindung von kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) in das Projekt, wurden Schlüsseltechnologien im Bereich von speziellen Softwarelösungen und Prüfmethoden zum Testen erarbeitet, die eine Stärkung der Marktfähigkeit dieser Unternehmen ermöglicht. Mit den Ergebnissen aus PEGASUS wird somit eine gezielte Weiterentwicklung sowie Vorbereitung neuer Produkte ermöglicht, welches insbesondere den KMU eine Chance auf Wachstum bietet.

Gleichzeitig ist die Einführung von hochautomatisierten Fahrfunktionen wirtschaftlich riskant. Das wirtschaftliche Risiko liegt dabei vor allem in den erforderlichen hohen Investitionskosten

für eine umfassende Absicherung der Funktionen; der hohe Umfang ist nur durch die verstärkte Einführung des virtuellen Testens, also der Absicherung der Funktionen auf simulativer Basis, zu stemmen. Gleichzeitig besteht ein wirtschaftliches Risiko bezüglich der Frage, welcher Absicherungsumfang notwendig und hinreichend ist. Beide Risiken wurden in dem Projekt PEGASUS adressiert, da im Rahmen des Projektes ein mit Experten aller relevanten Bereiche abgestimmter neuer Stand der Technik etabliert wurde. Dies gilt sowohl für die Ansätze zur Validierung von neuen Absicherungsmethoden als auch für die Festlegung eines wirtschaftlich vertretbaren und mit konventioneller und neuer Methodik gemeinsam abzudeckenden Absicherungsumfangs. Durch das gemeinsam bearbeitete Förderprojekt entstand für alle Partner eine verbesserte Sicht auf die Sicherheit bei der Anwendung der Tests und bzgl. des Absicherungsumfangs, um hochautomatisierte Fahrfunktionen in kurzer Zeit marktfähig zu entwickeln.

Hochautomatisiertes Fahren und dessen Entwicklung wurden und werden auch im Ausland zum Teil stark gefördert (NHTSA, 2016), (SAKURA, 2019). Um einen Wettbewerbsnachteil der deutschen Automobilindustrie zu vermeiden, war die Unterstützung von Projekten wie dem vorliegenden Vorhaben notwendig. So wird ein Wettbewerbsnachteil vermieden und die Chance auf das Einnehmen der Innovationsführerschaft gewahrt.

Neben den wirtschaftlichen Risiken, die ein zu langsames und nicht gemeinschaftlich umgesetztes Konzept im Markt des hochautomatisierten Fahrens mit sich bringen würde, adressiert das vorgeschlagene Projekt bestehende erhebliche technische Risiken, die mit der Durchführung des Projektes signifikant reduziert werden sollten, denn PEGASUS verfolgt einen technisch hochkomplexen Ansatz:

- Die hochautomatisierte Fahrfunktion muss den gesamten Fahrbetrieb abdecken und sicherstellen. Das bedingt die Beherrschung einer enorm hohen Anzahl von möglichen Verkehrsszenarien und von möglichen Fehlerfällen. Um ein hohes und robustes Sicherheitsniveau zu gewährleisten, ist eine extreme Testanzahl bzw. Testtiefe notwendig, bezogen sowohl auf die realen als auch die virtuell gefahrenen Kilometer.
- Die Beherrschung des neuen, sehr großen Testraumes einer hochautomatisierten Fahrfunktion macht neue, innovative Simulations- und Realtestkonzepte notwendig. Diese sind auf dem dazu notwendigen, deutlich höheren Niveau als heute, nicht innerhalb der Automobilindustrie etabliert. Benötigte methodische Ansätze finden sich in der IT-Industrie - und helfen im Bereich hochautomatisierte Fahrfunktion aktiven IT-Unternehmen im Wettbewerb mit deutschen Automobilbauern (siehe Beispiel Google).
- Das Ziel eines effizienten virtuellen Testens solch komplexer hochautomatisierter Fahrfunktionen macht eine wirtschaftliche Beherrschung des komplexen Test- & Absicherungsprozesses unerlässlich.
- Ein gemeinsamer, OEM-übergreifender Standard ist notwendig, um einen ausreichenden Sicherheitsnachweis von hochautomatisierten Fahrfunktionen führen zu können.

Dieser Punkt ist auch im Hinblick auf juristische und gesellschaftliche Diskussionen wichtig. Nur mit einem breit anerkannten Vorgehen lässt sich glaubhaft argumentieren, dass die neuen Fahrfunktionen sicher sind. Und nur so werden sie eine genügend hohe Akzeptanz und Marktdurchdringung finden.

Das Verbundprojekt mit all seinen Herausforderungen und Risiken bietet aber vor allem einen vielfachen Nutzen für Bund, Wirtschaft und Gesellschaft, den der Bund mit ausschließlich eigenen öffentlichen Einrichtungen nicht in der notwendigen Zeit, dem notwendigen Umfang und der entsprechenden Nachhaltigkeit erreichen könnte.

Aus dem Verbundprojekt lassen sich für den Bund, sowie den Gesetzes- und Verordnungsgeber Empfehlungen für gesetzliche und normative Anforderungen an die Freigabe von hochautomatisierten Fahrfunktionen sowie für Standardisierungen und Normen ableiten.

2.5 Nutzen und Verwertbarkeit

Das folgende Kapitel beschreibt die Reflexion des PEGASUS-Projekts. Der Aufbau des Konsortiums, das Arbeitsmodell innerhalb des Projekts sowie die Projektergebnisse werden reflektiert. Darüber hinaus wird die Verbreitung und Nutzung diskutiert. Anschließend werden ein Ausblick und eine Empfehlung für weitere Aktivitäten gegeben.

2.5.1 Reflexion der Zusammensetzung des Konsortiums und des Arbeitsmodells

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde deutlich, dass die Überprüfung und Validierung auf der Ebene der Sicherheitsziele nicht nur eine Frage der jeweiligen Fahrzeughersteller ist, sondern eine allgemeine Akzeptanz und Koordination erfordert. Um dies zu gewährleisten, unterstützte und förderte PEGASUS einen vorwettberwerblichen Austausch zwischen Fahrzeugherstellern und Zulieferern, um Diskussionen zu Themen einzuleiten, die zuvor noch nie im Fokus solcher Projekte standen. Aufgrund des Aufbaus der Konsortiums, bestehend nicht nur aus Fahrzeugherstellern und Zulieferern, wurde gemeinsam mit kleinen und mittelständigen Unternehmen sowie Forschungseinrichtungen und Bundesbehörden dazu beigetragen, die interdisziplinäre Diskussion zwischen den Projektpartnern zu fördern. Der nationale Diskurs hat die komplexen Diskussionen dabei vereinfacht. Der Fokus aller Partner lag während der kompletten Projektlaufzeit auf einer realisierbaren und umsetzbaren technischen Lösung für einen gemeinsamen Ansatz zur Verifizierung und Validierung hochautomatisierter Fahrfunktionen. Bei unüberbrückbaren Differenzen bot der Steuerkreis ein Mittel zur Eskalation, um eine Entscheidung zu treffen, und lud Experten zu ausführlichen Diskussionen ein.

Die Diskussionen innerhalb des Projekts waren jedoch in erster Linie technischer Natur mit dem Ziel einer objektiven Sicherheitsvalidierung durch das Testen. Ein interdisziplinärer Austausch mit Sicherheits- oder Rechtsexperten war im Projekt nicht geplant. Im Nachhinein wird jedoch empfohlen, dass für weitere Forschungsprojekte zum Thema Verifikation und Validierung eine Integration solcher Experten zu einer ganzheitlichen interdisziplinären Diskussion beiträgt. Eine Lösung könnte eine Erweiterung der PEGASUS-Methode auf eine allgemeine V&V-Architektur sein, um die oben genannten Disziplinen mit den vorhandenen PEGASUS V&V-Aktivitäten zu kombinieren.

Ein weiterer Punkt, der sich während des Projekts zeigte, war das bemerkenswerte nationale und insbesondere internationale Interesse an dem Projekt. Das Projekt war transparent für nationale / internationale Interessenten innerhalb des Korsetts eines national finanzierten Projekts. Jedoch benötigte der Wunsch nach Transparenz unerwartete Ressourcen von den PEGASUS-Partnern. Ein Beispiel hierfür war der ungeplante Overhead aufgrund doppelter Dokumentation in Englisch und Deutsch. Es ist daher ratsam, in der Vorbereitungsphase weiterer Projekte einen starken Fokus auf die internationale Verbreitung zu legen.

Die Arbeiten innerhalb des Projekts wurden in vier Teilprojekte gegliedert. Dies ermöglichte die Arbeit an relevanten Themen unabhängig voneinander: Prozesse, Systemdefinition und -analyse, Testausführung und Ergebnisreflexion. Darüber hinaus ermöglichte die Struktur die Generierung von Expertengruppen, wie zur stochastischen Variationen, für Sensormodelle oder zu Sicherheitsargumentation. Die Ergebnisse konnten innerhalb der Teilprojekte zunächst vorabgestimmt werden. Die Zuordnung verschiedener Unternehmen und Disziplinen zu Teilprojekten förderte dabei die Zusammenarbeit und sorgte auch für eine sehr hohe Interaktion zwischen den Partnern über die Unternehmensgrenzen hinweg. Ein weiterer positiver Aspekt des Arbeitsmodells wurde bei der Halbzeitveranstaltung deutlich. Hier wurden die aktuell vorhandenen Ergebnisse an Ständen präsentiert, die in PEGASUS-Themen organisiert und strukturiert waren, und nicht an firmenspezifischen Ständen. So hatten die Expertengruppen die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form eines gemeinsamen Projektansatzes neutral zu präsentieren.

Andererseits unterstützte die vordefinierte Teilprojektstruktur keinen konsistenten Workflow zwischen Projektteilen über die gesamte Projektdauer. In dem öffentlich finanzierten Projekt wurden die einzelnen Arbeitspakete mit den erforderlichen Arbeitskräften und erwarteten Ergebnissen während der Projektstartphase vordefiniert und in einer Projektbeschreibung (VHB) festgelegt. Während des laufenden Projekts wurde es in mehreren Fällen notwendig, die ursprüngliche Strategie aus der VHB zu adaptieren oder neu auszurichten. Im trivialsten Fall lag eine unterschiedliche Interpretation der Arbeitspakete durch die Partner vor. In den meisten Fällen, wo eine Adaption nötig war, erfolgte diese jedoch auf Basis neuer Erkenntnisse. Aufgrund der stark miteinander vernetzten Arbeitspakete führten diese Änderungen zu zeitlichen Verschiebungen der betroffenen und zusammenhängenden Arbeitspakete sowie der Budgets einiger Partner. Dies war nicht nur für das Projektmanagement eine gewisse Herausforderung, sondern insbesondere für kleinere Unternehmen und Universitäten.

In einigen Fällen waren die Ergebnisse oder der Status von Expertengruppen innerhalb der Teilprojekte nicht so transparent wie für andere Teilprojekte erwartet. Beispielsweise führten zwei relevante Schnittstellen zwischen Teilprojekt 1 und Teilprojekt 3 des Öfteren zu herausfordernden Diskussionen. Darüber erarbeitete das Teilprojekt 2 viele Ergebnissen, die nur teilweise in die PEGASUS-Methode integriert werden konnten. Schließlich führte die Trennung von Teilprojekt 4 von den Teilprojekten 1-3 zu Herausforderungen für die Ausführung der geplanten Ergebnisreflexion.

Aus rein technischer Sicht könnte eine Lösung für die skizzierten Herausforderungen ein agilerer Ansatz für die Projektorganisation sein. Andere Bereiche zeigen, dass Projekte mit hohen Unsicherheiten in den Fragen „Was ist zu erreichen?“ Und „Wie erreicht man es?“ Einen agilen Ansatz (vgl. Stacey Matrix) mit unterstützenden Tools wie Ticket-, Wiki-System und Revisionskontrolle als Organisationsform verwenden. Dies könnte helfen auf Änderungen im Projekt zu reagieren, die durch Forschungsergebnisse oder allgemeine Änderungen verursacht werden. Für die Realisierung eines agilen Ansatzes innerhalb des Projekts ist zu Beginn des Projekts eine Gesamtarchitektur, wie die PEGASUS-Methode, erforderlich, um die Arbeitspakete in ein Gesamtbild zu sortieren. Zusätzlich zu dieser Architektur ist ein „technischer Hauptverantwortlicher“ für die Architektur erforderlich, der die Aufgabe hat, die Architektur in einem iterativen Prozess anzupassen, wenn dies erforderlich ist. Eine weitere wichtige Aufgabe eines solchen Hauptverantwortlichen würde den Teilprojektteams bei der technischen Koordination innerhalb des Projekts helfen. Ungelöst von einem solchen Ansatz bleiben die rechtlichen Aspekte eines öffentlich finanzierten Projekts, bei dem die erwarteten Beiträge jedes Partners bereits zu Beginn des Projekts in einer Projektbeschreibung (VHB) benannt werden müssen.

2.5.2 **Reflexion der Projektergebnisse**

PEGASUS-Methode

Die PEGASUS-Methode zeigt Teilergebnisse des Projekts aggregiert in einer Gesamtarchitektur. Mit dieser Methode kann die Komplexität der Bewertungsaufgabe einer hochautomatisierten Fahrfunktion durchgeführt und erklärt werden. Darüber hinaus zeigt und drückt die Methode aus, wie die für die Bewertung erforderlichen Elemente voneinander abhängen und in einer Prozesskette miteinander wirken. Darüber hinaus bietet dieser Top-Down-Ansatz die Möglichkeit, die Wechselwirkungen und Einzelmethoden verschiedener Elemente der Gesamtmethode zu betonen, wodurch fehlende Schnittstellen oder ein unterschiedliches Verständnis der Elemente direkt erkannt werden können. Andererseits besteht weiterhin ein gewisses Risiko, dass die Bewertungsaufgabe durch nicht transparente Teile wie die Befähigung- und Validierung für Werkzeuge in dieser vorgeschlagenen Prozesskette zu stark vereinfacht sind.

Die Darstellung der PEGASUS-Methode legt einen linearen schrittweisen Ansatz nahe. Die verschiedenen Blöcke haben jedoch unterschiedliche Lebenszyklen, und nicht nur benachbarte Blöcke können Abhängigkeiten aufweisen. Ein Beispiel ist die Sicherheitsargumentation und der Beitrag der einzelnen Schritte zu dieser Sicherheitsaussage. Die Datenbank muss

immer verfügbar sein und ständig mit aktuellen Informationen aus sich ändernden Anforderungen sowie Szenarioerweiterungen gefüllt sein. Während der Bewertungsteil eines Fahrzeugentwicklungsprojekts zeitlich mit der Bewertung verbunden ist und mehrere Instanzen umfasst, muss die Datenbank eine einheitliche Basis haben, um allen Anforderungen zu jeder Zeit zu genügen.

Zusammenfassend zeigt die Methode auf der höchsten Abstraktionsebene die wichtigen Ergebnisse des PEGASUS-Ansatzes:

1. Beweise erfordern eine Argumentation.
2. Die Datenbank ist kein statisches Konstrukt, sondern entwickelt sich zirkulär.
3. Die Ausgabe ist ein Bereich logischer Testfälle und KEINE Liste konkreter Testfälle.
4. Das Testkonzept hat einen iterativen / suchenden Charakter.
5. Einige Elemente des Gesamtprozesses sollen zentralisiert werden, andere nicht.

Zum Abschluss des Projektes wurde die Methode anhand eines Beispiels für einen ersten Proof of Concept validiert. Zusätzlich wurde die Konformität der Methode mit bestehenden Unternehmensprozessen analysiert und die Überprüfung der Integration durchgeführt. Der Proof of Concept für eine Serienanwendung steht noch aus und wird derzeit nicht implementiert. Darüber hinaus wurde die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle (Domäne, Automatisierungsgrad) nicht vollständig nachgewiesen. Weitere Projekte sollten daher die PEGASUS-Methode für zusätzliche Anwendungsfälle wie andere Bereiche der ODD oder andere Automatisierungsstufen evaluieren.

Anforderungsermittlung

Innerhalb des Projekts wurden verschiedene Informationsquellen (z. B. Richtlinien, Standards, Regeln, ethische und soziale Anforderungen) analysiert, um Anforderungen für das Testobjekt (den Autobahn-Chauffeur) zu ermitteln. Durch die Definition des Testobjekts als Black Box ohne detaillierte funktionale Architektur wie „Sense-Plan-Act“ mussten die Sicherheitsanforderungen auf hoher Ebene definiert werden. Dies hat einerseits den Vorteil, dass der PEGASUS-Methodenansatz zur Definition von Anforderungen auf andere automatisierte Blackboxen innerhalb der definierten Anwendungsfälle anwendbar sein sollte. Andererseits bietet dieser Black-Box-Ansatz keine Komponentenanforderungen, die auf einer funktionalen Systemarchitektur basieren. Aus diesem Grund deckt die PEGASUS-Methode keine niedrigeren Funktionsebenen oder „Sence“ und „Plan“ ab. Für weitere Projekte könnte es erforderlich sein, eine detailliertere Funktionsarchitektur wie Sense-Plan-Act als Testobjekte zu verwenden, um Anforderungen auf einer detaillierteren Ebene innerhalb der drei Teile zu definieren.

Eine Hauptanforderung für eine hochautomatisierte Fahrfunktion ist die von der Öffentlichkeit akzeptierte Fehlerrate, da perfekte technische Systeme nicht realisiert werden können. Um einen ersten Vorschlag für akzeptable makroskopische Zahlen von z.B. Unfällen / Todesfällen abzuleiten, wurden verschiedene Informationsquellen in parallelen Anwendungsfeldern, wie Eisenbahn oder Flugzeug, analysiert. Derzeit besteht eine noch offene Herausforderung darin, eine Möglichkeit oder einen Ansatz zu identifizieren, um diese makroskopischen Zahlen mit singulären Testergebnissen zu verbinden. Um einen Schritt in Richtung eines ersten Ansatzes zu machen, wurden mikroskopische Anforderungen definiert, um Testfälle (bestanden / nicht bestanden) für eine Sicherheitsaussage zu bewerten. Um Sicherheitsziele, wie beispielsweise keine Kollision zu definieren, wurde innerhalb des Projekts ein fachkundiger Ansatz angewendet. In weiteren Projekten muss eine umfassende Validierung der Sicherheitsziele evaluiert werden. Die begonnenen Diskussionen über Sicherheitsziele sollten fortgesetzt und auf eine Überprüfung durch nationale und internationale Gremien ausgedehnt werden.

Szenarienermittlung

Für die Szenarienermittlung wurden verschiedene Systematiken, wie Ontologie- und Automatisierungsrisiken sowie datengesteuerte Ansätze angewendet, um relevante Szenarien basierend aus verschiedenen Informationsquellen zu identifizieren. Der Stand der Technik für die Szenariomodellierung wurde dabei auf sechs Ebenen (s. Abbildung 16) zur Beschreibung der Szenarien erweitert. In PEGASUS wurde hauptsächlich die 1. Ebene mit den Straßennetzen sowie die 4. Ebene mit dynamischen Objekten im Rahmen der PEGASUS-Methode mit einem szenarienbasierten und datengesteuerten Ansatz modelliert und untersucht. Um diesen datengesteuerten Ansatz zu ermöglichen, wurden verschiedene Informationsquellen verwendet und verfügbare Daten in ein gemeinsames Datenbankformat zu konvertieren. Für die automatisierte Konvertierung mussten alle datenbereitstellenden Partner entsprechende Konverter implementieren, Referenzvideos erzeugen und dabei den Datenschutz (z. B. DSGVO) einhalten. Für neue Projekte empfiehlt es sich hier vorab die Datenlieferanten bereits während der Projektierung festzulegen. Auf diese Weise sollten Aufwand und Ressourcen für die Generierung und Konvertierung von Daten für eine gemeinsame Szenariendatenbank geplant werden.

Neben dem datengetriebenen Ansatz wurden zwei weitere systematische Ansätze entwickelt:

1. Identifizierung von Automatisierungsrisiken sowie die Erstellung logischer Szenarien, die auch in die Datenbank integriert werden können.
2. Modellierung und Anwendung einer Ontologie, zur Definition des Inhalts der Ebenen 1-5. Der ontologiebasierte Ansatz generiert direkt logische Szenarien für die Datenbank.

Die Integration von Automatisierungsrisiken wurde implementiert und die bisherigen Ergebnisse wirken vielversprechend. Eine vollständige Integration in die PEGASUS-Methode wurde bis zum Ende des Projekts jedoch nicht durchgeführt. Entsprechend muss Einfluss dieser Szenarien innerhalb der Tests und die Verwendung für die Sicherheitsbewertung noch endgültig erörtert werden.

Datenbank

Die Datenbank ist ein zentrales Element in der PEGASUS-Methode, da die Datenbank den vorbereitenden Teil mit dem Ausführungsteil der Methode verbindet. Um dies zu erreichen, muss die Datenbank den Datenaustausch aus verschiedenen Quellen ermöglichen und abwickeln. Eine Herausforderung bestand darin, dass jeder Projektpartner zu Beginn des Projekts direkt mit der Datenbankeingabe und -ausgabe arbeiten wollte, während die eigentlichen Algorithmen der Datenbank noch in der Forschung und Entwicklung waren. Für weitere Projekte mit einer zentralen Datenbank könnte es daher wichtig sein, auf den bestehenden Ansätzen und Lösungen aufzusetzen, um in einem frühen Stadium des Projekts bereits Schnittstellen und Beispieldaten definieren zu können. Arbeitspakete, die auf der Datenbank basieren, sollten möglichst früh mit einer gezielten Diskussion starten.

Neben der Datenverarbeitung wurde ein Prozess implementiert, um Szenarien und deren Parameterverteilungen anhand der bereitgestellten Messdaten zu identifizieren. Diese Daten werden zur Bewertung der Testfallvariationen verwendet. Hierbei besteht in der Datenbank auch die Möglichkeit solche Szenarien zu kennzeichnen, die auf Automatisierungsrisiken und Unfällen basieren. Eine offene Forschungsfrage ist die Identifaktion unbekannter Szenarien für relevante „Corner Cases“, die noch nicht in das vordefinierte Szenario-Template passen.

Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion

In der PEGASUS-Methode umfasst die Bewertung die Testdurchführung und -bewertung mittels Simulation, Prüfgelände- und Feldtests. Für die Simulation wurden verschiedene Ansätze von Parametervariationen im Raum logischer Testfälle implementiert. Erste Auswertungen des Parameterraums wurden dabei auf ausgewählte spezielle Testfälle angewendet, jedoch wurde keine vollständige Parametervariation mit erweiterten Parametersätzen, wie z. B. Parametern für mehrere Sensormodelle, oder mit einer Reihe mehrerer Szenarien in PEGASUS realisiert. Darüber hinwurde noch nicht abschließend nachgewiesen, dass die definierten Testfälle alle erforderlichen Nachweise für die definierten Sicherheitsziele liefern.

Um realitätsnahe Ergebnisse in der Simulation zu erzielen, wurden u.a. verschiedene Sensormodelle implementiert. Um diese Modelle und auch die Szenarien übergreifend nutzbar zu machen, wurden Formate zur Beschreibung der Szenarien, wie OpenDRIVE und OpenSCENARIO sowie Schnittstellen (Open Simulation Interface -OSI) zu einem gemeinsamen Standard weiterentwickelt und an die Standardorganisation ASAM übertragen. Erste Ansätze zur Validierung der Simulationen und Sensormodelle wurden dabei ebenfalls entwickelt, jedoch wurde die umfassende Validierung der Modelle nicht innerhalb des Projektes durchgeführt. Die Prüfgeländetests wurden durch die Implementierung koordinierter Tests mit selbstfahrenden Verkehrssimulationsfahrzeugen verbessert. Für eine direkte Ausspielung der Testfälle aus der Simulation heraus wurden erste Schritte für eine automatisierte Anpassung der Simulationsformate (OpenDRIVE und OpenSCENARIO) an die Prüfgelände-Werkzeuge durchgeführt. Die Implementierung zur vollständigen Unterstützung der Formate erfolgt über die Projektlaufzeit hinaus.

Die praxisnahe Erprobung der in PEGASUS erarbeiteten Werkzeuge hat gezeigt, dass viele vielversprechende Ansätze entwickelt wurden, aber Forschungsfragen zur Durchführung und Bewertung von Testfällen noch nicht abschließend beantwortet sind. Um diese Herausforderungen offener Forschungsfragen zu bewältigen, sollten weiterführende Projekte Teile der PEGASUS-Methode verfeinern, indem man sich auf einzelne Forschungsfragen in diesem Bereich konzentriert.

Sicherheitsargumentation

Der letzte Schritt der PEGASUS-Methode umfasst die Sicherheitsargumentation. Die bekannte Notation, die die Sicherheitsargumentation formalisiert, wurde in PEGASUS erweitert, um die individuelle und gesellschaftliche Wahrnehmung der Sicherheit von automatisierten Fahrfunktionen zu modellieren. Dabei ist die in PEGASUS erarbeitete Sicherheitsargumentation, ein Baustein für die Gesamtargumentation zur Absicherung des Gesamtfahrzeugs und gliedert sich in ein Gesamtbild ein, welches Tests, Sicherheit, Recht, etc. umfasst. Für das Anwendungsbeispiel Autobahn-Chauffeur wurde im Projekt eine entsprechende Argumentationskette definiert und es konnte eine internationale Diskussion über die Struktur begonnen werden. Ziel ist dabei die Schaffung eines gemeinsamen internationalen Ansatzes in diesem Bereich. Die endgültige Struktur der Sicherheitsargumentation ist jedoch nicht abgeschlossen, da die Sicherheitsargumentation ein lebendiges Dokument darstellt. Daher sollte das Dokument in einem agilen Prozess in weiteren nationalen oder internationalen Projekten weiter ausgearbeitet werden, um eine abschließende Argumentation für ein Sicherheitsniveau zu entwickeln, zu demonstrieren und anzuwenden. Die Arbeit an der Sicherheitsargumentation hat zwei wichtige Ergebnisse gezeigt:

1. Die fortlaufende Entwicklung der Sicherheitsargumentation und die Festlegung eines Sicherheitsniveaus sind weiterhin ein relevantes Forschungsthema
2. Die Sicherheitsargumentation kann, ausgehend von der Argumentationskette, Projekte gezielt in der Strukturierung der Arbeitspakete unterstützten

Es wird empfohlen, dass weitere Projekte sehr früh im Projekt mit der Sicherheitsargumentation beginnen, um den Beitrag jedes einzelnen Arbeitspakets zur Argumentationskette für die Sicherheitsaussage festzulegen.

2.5.3 Reflexion der Ergebnisverbreitung

Die Einführung des automatisierten Fahrens ist eines der großen globalen Themen und umfasst neben der Frage nach individuellen Mobilitätslösungen auch die Nutzung von automatisierten Systemen im öffentlichen Verkehr. Regierungen, Unternehmen und akademische Einrichtungen arbeiten mit Hochdruck an Lösungsmöglichkeiten um die bestehenden Herausforderungen des heutigen Verkehrs mit Hilfe des automatisierten Fahrens zu optimieren. PEGASUS hat zunächst in diesem Kontext eine Diskussion auf nationaler Ebene begonnen, wie automatisiertes Fahren sicher umgesetzt werden kann. Die Fokussierung auf die nationale Ebene zu Projektbeginn erfolgte, um zunächst schnelle erste Ergebnisse zu erzielen, die anschließend in der internationalen Diskussion genutzt werden können.

Die PEGASUS-Partner sehen die grundlegende Diskussion über Sicherheit und die Generierung der erforderlichen Nachweise für einen sicheren Einsatz nicht als wettbewerbsdifferenzierendes Thema. Aus diesem Grund suchten die PEGASUS-Partner aktiv nach einem Austausch zu ausgewählten Themen auf nationaler und internationaler Ebene. Beginnend mit der Halbzeitveranstaltung in Aachen in 2017 fanden zwei internationale PEGASUS-Symposien sowie fünf internationale Experten-Workshops in Deutschland, Österreich, den USA und Japan statt. Darüber hinaus präsentierten die PEGASUS-Partner den Status und die Ergebnisse des Projekts auf verschiedenen Konferenzen, Tagungen sowie in verschiedenen Gremien. Die folgende Abbildung 70 zeigt einen Ausschnitt der internationalen Aktivitäten.

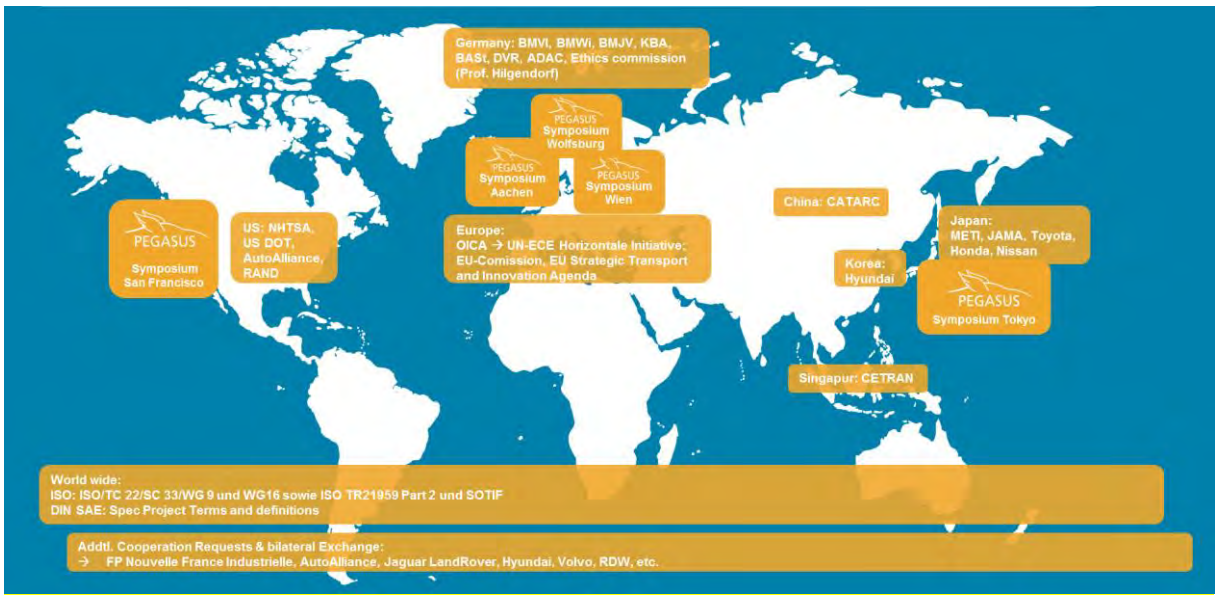


Abbildung 70 Überblick über die internationalen Aktivitäten

Das nationale sowie internationale Feedback war hauptsächlich positiv und es wurde vielmals die transparente Darstellung und Diskussion von (Zwischen)Ergebnissen gelobt. Im Rahmen der komplexen Herausforderung zur Absicherung des automatisierten Fahrens war es PEGASUS insbesondere innerhalb der zweiten Projekthälfte möglich Lösungsansätze international zu diskutieren und zu verbreiten. Aufbauend auf den internationalen Diskussionen wurden erste PEGASUS-Ergebnisse ebenfalls in Standardisierungsaktivitäten eingebracht, die sich aktuell noch in der Umsetzung befinden (u.a. ASAM und ISO). Ausgehend von dem internationalen Austausch ergab sich für PEGASUS die Möglichkeit auch Rückmeldungen direkt aufzunehmen und in die weitere Projektarbeit einfließen zu lassen (z.B. im Bereich der Szenariodefinitionen, Sicherheitsargumente und Metriken).

Neben diesen positiven Effekten führten die Verbreitungsaktivitäten während der Projektlaufzeit zu ungeplanten und nicht vorab absehbaren Anstrengungen für die Projektpartner. Insbesondere wurde die Komplexität aufgrund des zusätzlichen Inputs von außerhalb der Projektgrenzen erhöht.

Die Erkenntnis aus diesen Aktivitäten und Schlussfolgerung für zukünftige Projekte besteht darin, dass mehr Aufwände für die Diskussion und Ergebnisverbreitung einzuplanen sind. Das PEGASUS-Projekt hat während der Laufzeit ein breites, mit Experten besetztes, internationales Netzwerk aufgebaut, welches für weiterführende Aktivitäten als Ausgangspunkt verwendet werden kann. Dieses Netzwerk ermöglicht insbesondere einen Austausch auf internationaler Ebene im Bereich V&V für das automatisierte Fahren und kann dabei Themen diskutieren, für die es aktuell noch keine internationale Gemeinschaft / Aktivitäten gibt.

2.5.4 **Reflexion der Verwertung**

Normalerweise beginnt die Nutzung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten mit den Ergebnissen am Ende eines Projekts. Dies gilt auch für PEGASUS. Es gab jedoch bereits während der Laufzeit und es bestehen auch weiterhin ein großes Interesse und ein ständiger Bedarf an Lösungen für die von PEGASUS gestellten und fokussierten Forschungsfragen.

Aus diesem Grund wurde das Projekt so konzipiert, dass die Ergebnisse von Anfang an so früh wie möglich in die Partnerunternehmen / -institutionen eingebettet werden können. Dies hatte positive Auswirkungen, da beispielsweise die PEGASUS-Methode entwickelt wurde, um eine bestimmte Basis der Aktivitäten kommunizieren zu können. Unternehmensinterne Stakeholder mussten entsprechend identifiziert und während der Projektlaufzeit aktiv angesprochen werden. Dabei wurde ein frühes Feedback sowohl auf Unternehmensebene als auch im PEGASUS-Projekt generiert. Nicht-PEGASUS-Perspektiven wurden dabei ebenfalls eingeholt und für die Diskussion im Projekt gesammelt. Die Halbzeitpräsentation sowie Abschlusspräsentation konnten und wurden direkt von den internen und externen Stakeholdern genutzt.

Für die frühzeitige Nutzung der Ergebnisse gilt das Gleiche wie für die frühzeitige Verbreitung. Denn es entstand ein entsprechender und nicht vorher absehbarer Overhead. Aus diesem Grund ist die Frage, wann und wie die Verwertung der Projektergebnisse effizient erfolgen kann, da einerseits die Ergebnisse so früh wie möglich verwendet werden sollen und andererseits genügend Zeit für die Beantwortung offener Fragen bleibt.

Entsprechend sollten auch für die Verwertung in Nachfolgeprojekten ausreichende Ressourcen eingeplant werden, die es den Teilprojekten ermöglicht eine offene Diskussion zu führen.

Dabei liegt es im Ermessen der Projektpartner zu entscheiden, wie die Ergebnisse genutzt werden sollen.

2.5.5 **Ausblick**

Der Ausblick beschränkt sich auf nationale Initiativen, unter dem Wissen, dass auch andere Nationen, internationale Projekte und internationale Unternehmen dieses Thema weiter vorantreiben und hoffentlich von den Lehren aus PEGASUS profitieren können.

PEGASUS hatte eine Pionierrolle im Bereich der V&V-Forschung für das SAE Level 3, da es das erste nationale Projekt war, das sich ausschließlich mit V&V-Themen befasste. Obwohl eine Vielzahl von Forschungsfragen beantwortet wurde, sind weitere Aktivitäten notwendig, die mit PEGASUS zusammenhängen und den erfolgreichen Weg fortführen müssen.

Ausgehend von der VDA-Leitinitiative für automatisiertes Fahren gingen in den vergangenen Jahren mehrere Vorschläge an die Ministerien, um nationale Forschungs- und Entwicklungsprojekte zu finanzieren und zu ermöglichen. Die Hauptmotivation besteht in dem Anspruch eine sichere und automatisierte Mobilität zu ermöglichen, um den Herausforderungen des zukünftigen Verkehrs zu begegnen. Erste auf PEGASUS aufbauende Projekte sind bereits bewilligt oder befinden sich im Vorschlagszustand und zielen darauf ab unterstützende Me-

thoden, Werkzeuge und Rahmenbedingungen für das automatisierte Fahren zu arbeiten. Die Projekte agieren dabei u.a. in der PEGASUS-Projektfamilie und arbeiten entsprechend eng zusammen.

SETLevel4to5 begann im März 2019 mit der Projektarbeit und konzentriert sich auf eine Simulationsplattform, um die Effizienz beim Testen automatisierter Fahrsysteme zu steigern. Es basiert auf der Simulationsumgebung von PEGASUS und erweitert den Anwendungsfall von Autobahnen (PEGASUS) auf andere Bereiche (z. B. Stadtkreuzungen) sowie höhere Automatisierungsgrade (Level 4-5).

Das Projekt Verification & Validation (V & V)-Methoden startete im Juli 2019 und zielt auf den innerstädtischen Anwendungsfall für Level 4-Systeme. Ausgangsbasis ist auch für dieses Projekt die Ergebnisse aus PEGASUS. Neben dem Anwendungsfall ist ein Hauptunterschied zwischen V & V-Methoden und PEGASUS der zusätzliche Fokus auf Fahrzeugsystemkomponenten, wie Wahrnehmungs- und Planungskomponenten. Mit dem Ansatz nicht nur das Gesamtsystem, sondern auch modular Teilkomponenten zu bewerten wird eine Methode erwartet, die noch einmal eine Effizienzsteigerung ermöglicht.

Ein weiteres wichtiges Thema, um ein sicheres automatisiertes Fahren zu ermöglichen, ist die Handhabung und Nutzung von fortschrittlicher Künstlicher Intelligenz (KI) in einem automatisierten Fahrzeug. Entsprechende Projekte (z.B. KI-Absicherung, KI-DeltaLearning, KI-Datentooling) sind oder werden zeitnah gestartet und beschäftigen sich intensiv mit neuen Forschungsfragen im Bereich der KI mit Fokus auf automatisiertes Fahren.

Die Empfehlung von PEGASUS ist die dauerhafte Etablierung einer Community, die als primäres Ziel hat V & V-Ansätze zu analysieren, optimieren und neue Ideen zu generieren sowie zu publizieren. Geförderte Projekte sind hierfür ein guter Ausgangspunkt. Darüber hinaus dürfen die beteiligten Unternehmen Sicherheit nicht als wettbewerbsdifferenzierend betrachten und müssen ihren Mitarbeitern den Austausch und die Verbesserung eines internationalen Ansatzes ermöglichen. Eine akzeptierte, sichere und effiziente Mobilität mit geeigneten Automatisierungsgraden soll dabei das Ergebnis sein.

2.6 Bekannt gewordener Fortschritt

PEGASUS hat ein außergewöhnliches Ziel angestrebt. Als erstes (dem Konsortium bekanntes) Forschungs- und Entwicklungsprojekt in der Automobilindustrie strebte PEGASUS einen gemeinsamen und akzeptierten Ansatz zur Verifikation und Validierung einer hochautomatisierten Fahrfunktion an. Die Gültigkeit eines solchen Ansatzes kann dabei noch nicht nachgewiesen werden, bevor die ersten Fahrzeuge bestimmungsgemäß eingesetzt wurden. PEGASUS hat jedoch Antworten auf wesentliche Fragen vorgeschlagen. Es ist daher die Aufgabe der Community, diese Antworten zu analysieren, anzuwenden oder den vorgeschlagenen Ansatz zu adaptieren und zu verbessern.

Derzeit agieren weltweit eine Vielzahl von Unternehmen, Gremien und Organisationen im Bereich des automatisierten Fahrens. Neben den Einzelaktivitäten zur Produktgestaltung zielen eine Vielzahl der aktuell laufenden Absicherungsbestrebungen darauf ab Regeln und Standards zur Einführung des automatisierten Fahrens zu erstellen. Dieser Bereich wird dabei als hoch relevant eingestuft, da die entstehenden Ergebnisse nicht nur einen Stand der Technik beschreiben, sondern oftmals auch verbindlich für die Einführung von (hoch)automatisierten Fahrzeugen werden können.

Die Abbildung 71 zeigt einen Ausschnitt von aktuell international laufenden Aktivitäten sowie exemplarisch die Vielfalt der mittlerweile laufenden Projekte. PEGASUS hat im Rahmen der Ergebnisverbreitung sich stets in einer Vielzahl von Gremien und Kommissionen engagiert, um sicherzustellen, dass die dort laufenden Arbeiten konform zu den PEGASUS-Arbeiten sind.

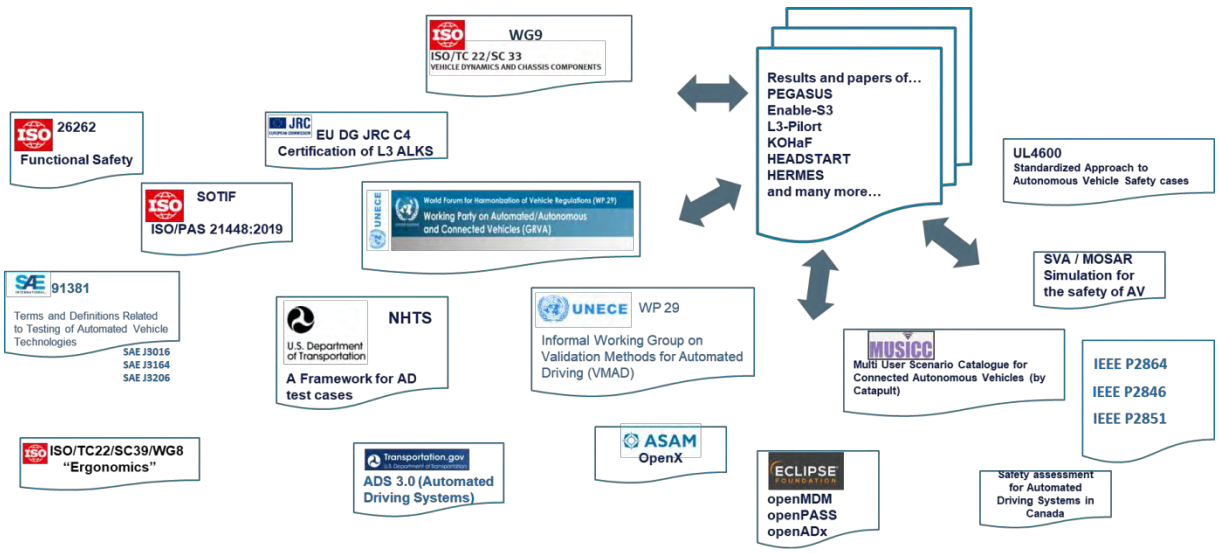


Abbildung 71 Überblick über internationalen Aktivitäten zu Regelung und Standardisierung

Die aktuell laufenden und neu entstehenden Aktivitäten gilt es weiterhin eng zu begleiten sowie fortlaufend die Ergebnisse aus den Forschungsprojekten einzubringen. Die einzelnen Aktivitäten gilt es dabei so miteinander zu verbinden, dass im Idealfall ein ganzheitliches und widerspruchsfreies Gesamtbild entsteht. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) sieht hier ebenfalls einen hohen Bedarf und hat bereits zur Laufzeit von PEGASUS die Arbeiten in diesem Bereich aktiv unterstützt und führt dieses Engagement auch im Rahmen der PEGASUS-Familie im größeren Maßstab fort.

3 Veröffentlichungen

Nr.	Datum	Veranstaltung/Veröffentlichung	Ort	Titel	Autoren
1	25.11.2015	7. Tagung Fahrerassistenz (25.-26.11.2015)	München	Requirements on tools for assessment and validation of assisted and automated driving systems	Udo Steininger (TÜV SÜD), Dr. Hans-Peter Schöner (Daimler), Dr. Mark Schiementz (BMW)
2	11.02.2016	AAET 2016 (10.-11.02.2016)	Braunschweig	Wie gut müssen automatisierte Fahrzeuge fahren – PEGASUS	Prof. Dr. Frank Köster (DLR), Prof. Dr. Thomas Form (Volkswagen), Prof. Dr. Karsten Lemmer (DLR), Jens Plättner (DLR)
3	23.02.2016	EMV Messe (23.-25.02.2016)	Düsseldorf	Automatisches Fahren, Quo Vadis?	Prof. Dr. Thomas Form (Volkswagen)
4	29.02.2016	BMWi-Monatsbericht Schlaglichter der Wirtschaft – März 2016	-	Forschungsprojekt PEGASUS Wie automatisierte Fahrzeuge schnell und sicher marktreif werden	Jens Plättner (DLR)
5	19.04.2016	Deutscher Mobilitätskongress – Neue Technologien für die Mobilität von morgen (18.-19.04.2016)	Frankfurt	PEGASUS – Was müssen automatisierte Fahrzeuge im Straßenverkehr leisten?	Prof. Dr. Thomas Form (Volkswagen)
6	19.04.2016	crash.tech 2016 (19.-20.04.2016)	München	Validation of assisted and automated driving systems	Udo Steininger (TÜV SÜD), Dr. Hans-Peter Schöner (Daimler), Dr. Mark Schiementz (BMW), Jens Mazzega (DLR)
7	09.05.2016	Ross trifft Bär: Zukunft des Fahrens – Ein Impuls aus Niedersachsen	Berlin	Fahrzeuge fahren automatisch – Bedeutung für einen Automobilkonzern	Prof. Dr. Thomas Form (Volkswagen)
8	26.05.2016	Expertenaustausch automatisches Fahren	Wolfsburg	Introduction of Automatic Driving Activities at Volkswagen Group	Prof. Dr. Thomas Form (Volkswagen)
9	19.07.2016	Automated Vehicles Symposium 2016 (18.-22.07.2016)	San Francisco	Safety Assurance Based on an Objective Identification of Scenarios – One Approach of the PEGASUS-Project	Walther Wachenfeld (FZD) Philipp Junietz (FZD) Philipp Themann (fka) Andreas Pütz (fka) Hermann Winner (FZD)
10	20.07.2016	Automated Vehicles Symposium 2016 (18.-22.07.2016)	San Francisco	Safety Assurance for Highly Automated Driving: The PEGASUS Approach	Prof. Dr. Hermann Winner (FZD)

Nr.	Datum	Veranstaltung/Veröffentlichung	Ort	Titel	Autoren
11	01.10.2016	ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 10/2016	-	Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen	Jens Mazzega (DLR) Frank Köster (DLR) Prof. Dr. Karsten Lemmer (DLR) Prof. Dr. Thomas Form (Volkswagen)
12	20.10.2016	VDI-Tagung E/E im PKW 2016 ELIV-Marketplace (19.-20.10.2016)	Baden-Baden	Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen – Erarbeitung von Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien im Gemeinschaftsprojekt PEGASUS	Dr. Philipp Themann (fka) Andreas Pütz (fka) Dr. Holger Schmitt (Daimler)
13	26.10.2016	6. AutoTest Fachkonferenz (26.-27.10.2016)	Stuttgart	Absicherung von Systemen für das (hoch)automatisierte Fahren	Matthias Stiller (Continental Teves)
14	27.10.2016	Aktive Sicherheit und Automatisiertes Fahren - Methodenentwicklung im Expertendialog (26.-27.10.2016)	Essen	Wie PEGASUS die Lücke im Bereich Testen und Freigabe von automatisierten Fahrzeugen schließt	Jens Mazzega (DLR) Dr. Hans-Peter Schöner (Daimler)
15	22.11.2016	Fachtagung BMWi und BMBF „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ (21.-22.11.2016)	Berlin	Was müssen hochautomatisierte Fahrzeuge im Straßenverkehr leisten (PEGASUS)?	Prof. Dr. Thomas Form (Volkswagen)
16	08.01.2017	TRB Annual Meeting	Washington	Safety Assurance for Highly Automated Driving – The PEGASUS Approach	Prof. Dr. Hermann Winner (FZD)
17	09.02.2017	AAET 2016 (08.-09.02.2016)	Braunschweig	Absicherungs- und Bewertungsmethoden für kooperative hochautomatisierte Fahrzeuge	Sven Hallerbach (Opel) Dr. Ulrich Eberle (Opel) Prof. Dr. Frank Köster (DLR)
18	21.02.2017	The Hansen Report on Automotive Electronics 02/2017	-	Standardization Efforts on Autonomous Driving Safety Barely Under Way	Interview mit Prof. Dr. Thomas Form (Volkswagen)
19	08.03.2017	Automotive meets Electronics - AME 2017	Dortmund	The challenges of releasing cooperative and highly automated vehicles – a look beyound functional requirements	Sven Hallerbach (Opel) Dr. Ulrich Eberle (Opel) Prof. Dr. Frank Köster (DLR)
20	31.03.2017	11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren (29.-31.03.2017)	Walting	Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen	Gerrit Bagschik (TU BS) T. Menzel (TU BS) A. Reschka (TU BS) Prof. Dr. Markus Maurer (TU BS)

Nr.	Datum	Veranstaltung/Veröffentlichung	Ort	Titel	Autoren
21	31.03.2017	11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren (29.-31.03.2017)	Walting	Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und –szenarien	Philipp Junietz (FZD) Prof. Dr. Hermann Winner (FZD)
22	31.03.2017	11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren (29.-31.03.2017)	Walting	Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen mithilfe einer Datenbank relevanter Szenarien	Andreas Pütz (fka) Dr. Adrian Zlocki (fka) Prof. Dr. Lutz Eckstein (RWTH Aachen)
23	03.04.2017	1st European Conference on Connected and Automated Driving (03. – 04.04.2017)	Brüssel	Securing Automated Driving - The Database Approach in PEGASUS	Dr. Adrian Zlocki (fka)
24	05.04.2017	1st European Conference on Connected and Automated Driving - Side Event (05.04.2017)	Brüssel	Research project PEGASUS Effectively ensuring automated driving.	Dr. Adrian Zlocki (fka)
25	06.04.2017	19. VDA Technischer Kongress (05.-06.04.2017)	Berlin	PEGASUS: Automatisiertes Fahren effektiv absichern	Prof. Dr. Karsten Lemmer (DLR) Jens Mazzega (DLR)
26	08.06.2017	25th Enhanced Safety of Vehicles Conference (05.-08.06.2017)	Detroit	Database approach for the sign-off process of highly automated vehicles	Andreas Pütz (fka) Dr. Adrian Zlocki (fka) Jörg Küfen (fka) Julian Bock (RWTH Aachen) Prof. Dr. Lutz Eckstein (RWTH Aachen)
27	21.06.2017	Autonomous Vehicle Test & Development Symposium 2017 (20.-22.06.2017)	Stuttgart	Test Specifications for Highly Automated Driving Functions: Highway Pilot	PD Dr. Hardi Hungar (DLR) Prof. Dr. Frank Köster (DLR) Jens Mazzega (DLR)
28	21.06.2017	Autonomous Vehicle Test & Development Symposium 2017 (20.-22.06.2017)	Stuttgart	Database of relevant traffic scenarios for highly automated vehicles	Dr. Adrian Zlocki (fka) Andreas Pütz (fka) Julian Bock (RWTH Aachen) Prof. Dr. Lutz Eckstein (RWTH Aachen)
29	10.06.2017	Zukunftskonferenz 2017	Rüsselsheim	Smart Mobility	Dr. Ulrich Eberle (Opel) Bruno Praunsmändel (Opel)
30	14.06.2017	Assistiertes und Autonomes Fahren	Bingen	Das Auto von morgen - Stand der Technik und Herausforderungen beim automatisierten Fahren	Bruno Praunsmändel (Opel) Dr. Ulrich Eberle (Opel)

Nr.	Datum	Veranstaltung/Veröffentlichung	Ort	Titel	Autoren
31	22.06.2017	12th ITS European Congress (19.-22.06.2017)	Straßburg	System validation of highly automated vehicles with a database of relevant traffic scenarios	Dr. Adrian Zlocki (fka) Andreas Pütz (fka) Julian Bock (RWTH Aachen) Prof. Dr. Lutz Eckstein (RWTH Aachen)
32	11.07.2017	Automated Vehicles Symposium 2017 (10.-14.07.2017)	San Francisco	PEGASUS - First Steps for Safe Introduction of Automated Driving	Prof. Dr. Hermann Winner (FZD)
33	28.09.2017	Praxiskonferenz Autonomous Emergency Breaking	Ingolstadt	Szenario-basierte Risikobewertung für hochautomatisiertes Fahren im PEGASUS Projekt	Dr. Mark Schiementz (BMW)
34	21.11.2017	VDI-Fachtagung Der Fahrer im 21. Jahrhundert (21.-22.11.2017)	Braunschweig	Menschliche Leistungsfähigkeit als Gütekriterium für die Zulassung automatisierter Fahrzeuge: Methode zur Ermittlung der Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit	Katharina Preuk (DLR) Dr. Caroline Schießl (DLR)
35	23.11.2017	8. Tagung Fahrerassistenz (22. – 23.11.2017)	München	Generischer Ansatz für Prüfgeländetests von Hochautomatisierten Fahrzeugen	Thomas Ponn (TU München) Dr. Frank Diermeyer (TU München) Dr. Ondřej Vaculín, (TÜV SÜD) Sascha Knake-Langhorst (DLR) Dr. Houssem Abdellatif, (TÜV SÜD)
36	23.11.2017	8. Tagung Fahrerassistenz (22. – 23.11.2017)	München	Funktionale Dekomposition: Ein Ansatz zur Reduktion des Freigabeaufwands für hochautomatisiertes Fahren	Christian Amersbach (FZD) Prof. Dr. Hermann Winner (FZD)
37	23.11.2017	8. Tagung Fahrerassistenz (22. – 23.11.2017)	München	Die Datenbank als Freigabewerkzeug automatisierter Fahrfunktionen im Kreislauf relevanter Szenarien	Andreas Pütz (fka) Dr. Adrian Zlocki (fka) Julian Bock (fka) Prof. Dr. Lutz Eckstein (fka)
38	11.04.2018	SAE – World Congress Experience (WCX) (10. – 12.04.2018)	Detroit	Simulation-based Identification of Critical Scenarios for Cooperative and Automated Vehicles	Sven Hallerbach (Opel) Yiqun Xia (Opel) Ulrich Eberle (Opel) Prof. Dr. Frank Köster
39	07.06.2018	Autonomous Vehicle Test & Development Symposium 2018 (05. – 07.06.2018)	Stuttgart	Chasing critical situations in large parameter spaces	Mugur Tatar (QTronic)

Nr.	Datum	Veranstaltung/Veröffentlichung	Ort	Titel	Autoren
40	Juni 2018	Hanser automotive Special		Effiziente Absicherung von hochautomatisierten Fahrfunktionen	Prof. Dr. Lutz Eckstein (ika) Jan Sauerbier (fka) Julian Bock (ika) Dr. Adrian Zlocki (fka)
41	27.06.2018	29th IEEE Intelligent Vehicle Symposium IV 2018	Chang Shu	Analysis of Real World Sensor Behavior for Rising Fidelity of Physically Based Lidar Sensor Models	Philipp Rosenberger (FZD) Martin Holder (FZD) Marina Zirulnik (FZD) Prof. Dr. Hermann Winner (FZD)
42	Q2/2018	MECCA - Journal of Middle European Construction and Design of CArs		Testing of Automated Driving Systems	Ondřej Vaculín (TÜV SÜD) Michael Gellrich (TÜV SÜD) Robert Matawa (TÜV SÜD) Steffen Witschaß (TÜV SÜD)
43	11.07.2018	Automated Vehicle Symposium	San Francisco	The PEGASUS-Method for HAD Assessment - Status Quo -	Dr. Walther Wachenfeld (Continental)
44	04.09.2018	Symposium „Testen - Automatisiertes und Vernetztes Fahren“	Braunschweig	PEGASUS - Wie sicher ist sicher genug und wie weise ich es nach?	Prof. Dr. Thomas Form (Volkswagen)
45	07.09.2018	Driving Simulation Conference Europe 2018 VR	Antibes, Frankreich	Generation of Highway Sections for Automated Test Case Creation	Ulf Noyer (DLR) Michael Scholz (DLR) Andreas Richter (DLR)
46	18.09.2018	SAFECOMP (18. – 21.09.2018)	Västerås, Schweden	Efficient Splitting of Test and Simulation Cases for the Verification of Highly Automated Driving Functions	Birte Kramer (OFFIS) Eckard Böde (OFFIS) Ulrich Eberle (Opel) Martin Fränzle (OFFIS) Sebastian Gerwinn (OFFIS)
47	26.09.2018	FAS Workshop (26. – 29.09.2018)	Walting	Funktionale Dekomposition - Ein Beitrag zur Überwindung der Parameterraumexplosion bei der Validation von höher automatisiertem Fahren	Christian Amersbach (FZD) Prof. Dr. Hermann Winner (FZD)
48	09.10.2018	Kick-off Workshop ASAM OpenDRIVE	Höhenkirchen	Generation of Highway Sections for Automated Test Case Creation	Ulf Noyer (DLR) Michael Scholz (DLR) Andreas Richter (DLR)
49	24.10.2018	IEDAS – Aktive Sicherheit und automatisiertes Fahren (24. – 25.10.18)	Ingolstadt	Die PEGASUS-Methode zur Absicherung von L3-Fahrfunktionen	Jens Mazzega (DLR)

Nr.	Datum	Veranstaltung/Veröffentlichung	Ort	Titel	Autoren
50	04.-07.11.18	IEEE ITSC 2018	Maui, Hawaii	Evaluation of Different Approaches to Address Safety Validation of Automated Driving	Philipp Junietz (FZD) Prof. Dr. Hermann Winner (FZD) Dr. Walther Wachenfeld (Continental) Kamil Klonecki (Continental)
51	04.-07.11.2018	IEEE ITSC 2018	Maui, Hawaii	Criticality Metric for the Safety Validation of Automated Driving using Model Predictive Trajectory Optimization	Philipp Junietz (FZD) Björn Klamann (FZD) Farid Bonakdar (FZD) Prof. Dr. Hermann Winner (FZD)
52	November 2018	PEGASUS-Workshop	Tokio	PEGASUS Sicherheitsargumentation PEGASUS Safety Argumentation	Alexander Maus (ASTech)
53	13.-15.11.2018	SIP-adus Workshop 2018	Tokio	PEGASUS Method for Assessment of Highly Automated Driving Function	Prof. Dr. Thomas Form (Volkswagen)
54	06.-07.12.2018	BMWi- BMBF-Gemeinschaftstagung „Forschung und Technologie für automatisiertes und vernetztes Fahren“	Berlin	PEGASUS - Wie sicher ist sicher genug und wie weise ich es nach?	Prof. Dr. Thomas Form (Volkswagen)
55	Februar 2019	Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (TRR)	Washington	Macroscopic Safety Requirements for Highly Automated Driving	Philipp Junietz (FZD) Udo Steininger (TÜV SÜD) Prof. Dr. Hermann Winner (FZD)
56	Februar 2019	PHi Haftpflicht international – Recht & Versicherung Sonderdruck aus PHi 1/2019	Köln	Die Bedeutung von Unfallanalysen, Produktbeobachtung und Marktüberwachung für die Akzeptanz von hochautomatisiertem Fahren	Udo Steininger (TÜV SÜD)
57	07.02.2019	AAET 2016 (06.-07.02.2019)	Braunschweig	Identifikation von Automationsrisiken hochautomatisierter Fahrfunktionen in PEGASUS	Matthias Büker (OFFIS) Birte Kramer (OFFIS) Eckard Böde (OFFIS) Sebastian Vander Maelen (OFFIS) Martin Fränzle (OFFIS)
58	10.06.2019	26th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) (10.-13.06.2019)		A framework for definition of logical scenarios for safety assurance of automated driving	Hendrik Weber (ika) Julian Bock (ika) Jens Klimke (fka) Christian Roesner (ika) Johannes Hiller (ika) Robert Krajewski (ika) Dr. Adrian Zlocki (fka) Prof. Dr. Lutz Eckstein (ika)

Nr.	Datum	Veranstaltung/Veröffentlichung	Ort	Titel	Autoren
59	13.06.2019	1st NDS Public Conference	München	PEGASUS	Udo Steininger (TÜV SÜD)
60	16.06.2019	Automated Vehicle Symposium 2019 (15.-18.06.2019)	San Francisco	PEGASUS Results and Future Prospects	Prof. Dr. Lutz Eckstein (fka)
61	17.07.2019	Technical Report	Oldenburg	Identifikation und Quantifizierung von Automationsrisiken für hochautomatisierte Fahrfunktionen	Eckard Böde (OFFIS) Matthias Büker (OFFIS) Werner Damm (OFFIS) Martin Fränzle (OFFIS) Birte Kramer (OFFIS) Christian Neurohr (OFFIS) Sebastian Vander Maelen (OFFIS)
62	08.10.2019	44th NATO Business Panel – Applied Vehicle Technology (AVT) (07.-11.10.2019)	Trondheim	PEGASUS @ AVT-194 Task Group	Jens Mazzega (DLR)

4 Abbildungsverzeichnis

5 Tabellenverzeichnis

6 Literaturverzeichnis

Bock, J., Krajewski, R., Eckstein, L., & Klimke, J. (2017). Data Basis for Scenario-Based Validation of HAD on Highways. *27. Aachen Colloquium - Automobile and Engine Technology.* Aachen.

Bundesanstalt für Straßenwesen. (2012). *Heft F 83 Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung.* Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen.

Yi, B., & et al. (2016). Real time integrated vehicle dynamics control and trajectory planning with MPC for critical maneuvers. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, (S. 584–589).

„Absicherung automatischen Fahrens“, Prof. Dr. H. Winner. 6. FAS-Tagung München, 29.11.2013. (kein Datum).

AAAM. (1998). *The Abbreviated Injury Scale 1990 Revision update 1998.* Association for the Advancement of Automotive Medicine.

AAAM. (2005). *Abbreviated Injury Scale 2005 update 2008.* Association for the Advancement of Automotive Medicine.

Airbus. (2017). *Commercial Aviation Accidents 1958-2016*. Von A Statistical Analysis, 2017. abgerufen

Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 50*(2), 179-221.

Althoff, D., Kuffner, J., Wollherr, D., & Buss, M. (2012). *Safety assessment of robot trajectories for navigation in uncertain and dynamic environments," Auton Robot, vol. 32, no. 3, pp. 285–302* . Von http://dx.doi.org/10.1007/s10514-011-9257-9 abgerufen

ASAM - OpenDRIVE. (kein Datum). *ASAM - OpenDRIVE*. Von https://www.asam.net/standards/detail/opendrive/ abgerufen

ASAM - OpenSCENARIO. (kein Datum). *ASAM - OpenSCENARIO*. Von https://www.asam.net/standards/detail/openscenario/ abgerufen

ASAM - OSI. (kein Datum). *ASAM - OSI*. Von https://www.asam.net/standards/detail/osi/ abgerufen

ASAM. (kein Datum). *ASAM*. Von https://www.asam.net/ abgerufen

Bagschik, G., Mezel, T., & Maurer, M. (2018). Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles. *IEEE Intelligent Vehicle Symposium.* Changsh.

Benmimoun, M. (2015). *Automatisierte Klassifikation von Fahrsituationen.* Aachen: fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH.

Bock, J., Krajewski, R., Eckstein, L., Klimke, J., Sauerbier, J., & Zlocki, A. (2018). Data Basis for Scenario-Based Validation of HAD on Highways. *27. Aachen Colloquium - Automobile and Engine Technology*.

Breuer, J., von Hugo, C., Mücke, S., & Tattersall, S. (2015). Nutzerorientierte Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, & C. Singer, *Handbuch der Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage.* Wiesbaden: Springer Vieweg.

Broadhurst, A., Baker, S., & Kanade, T. (2005). Monte carlo road safety reasoning. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2005*, (S. 319–324).

Bundesamt für Güterverkehr. (2013). *Marktbeobachtung Güterverkehr Bericht Herbst 2013.* Köln.

Bundesamt, S. (2017). *ohortensterbetafeln für Deutschland, Methoden- und Er-gebnisbericht zu den Modellrechnungen für Sterbetafeln der Geburtsjahrgänge 1871 – 2017.*

Daimler. (kein Datum). *Projekt Prometheus*. Von https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Das-Projekt-PROMETHEUS-ab-1986-Vorreiter-des-autonomen-Fahrens.xhtml?oid=13744534 abgerufen

Damerow, F., & Eggert, J. (2014). Predictive risk maps. *IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).*

David, A., Larsen, K., Legay, A., Mikuvcionis, M., Poulsen, D., Van Vliet, J., et al. (2011). Statistical model checking for networks of priced timed automata. In *Formal Modeling and Analysis of Timed Systems* (S. 80-96).

Davis, F. D. (1985). *A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-user information systems: Theory and Results.* Massachussetts Institute of Technology: Doctoral Dissertation.

Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quartely, 13*(3), 319-340.

Dingus, T., Hanowsk , R., & Klauer, S. (2011). Estimating crash risk. In *Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications, vol. 19, no. 4* (S. 8-12).

Eggert, J., & Puphal, T. (2017). Continuous Risk Measures for ADAS and AD. In *FAST-zero '17.*

Eidehall, A., & Petersson, L. (2008). Statistical Threat Assessment for General Road Scenes Using Monte Carlo Sampling. *IEEE Intelligent Transportation Systems 2008*, (S. 137–147).

Ericson, C. A. (2005). *Hazard Analysis Techniques for System Safety.* John Wiley & Sons, Inc.

Ethics Commission Automated and Connected Driving appointed by the German Federal Minister of Transport and Digital Infrastructure. (04. April 2019). *BMVI.* Von www.bmvi.de/SharedDocs/EN/publications/report-ethics-commission.pdf?__blob=publicationFile abgerufen

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (2008). *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen.* Köln: Kirschbaum Verlag GmbH.

Frehse, G., Le Guernic, C., & Donzé, A. (2011). SpaceEx: Scalable verification of hybrid systems. *Proc. 23rd Int. Conf. Comput. Aided Verification*, (S. 1-16).

GIDAS. (kein Datum). Von https://www.gidas.org/ abgerufen

Glauner, P., Blumenstock, A., & Haueis, M. (2012). Effiziente Felderprobung von Fahrerassistenzsystemen. *8. Workshop Fahrerassistenzsysteme* (S. 5-14). Walting: UNI DAS e.V.

Global Spec. (kein Datum). *EN 50126*. Von https://standards.globalspec.com/std/10262901/EN%2050126-1 abgerufen

Hankey, J., Perez, M., & McClafferty, J. (2016). *Description of the SHRP 2 Naturalistic Database and the Crash, Near-Crash, and Baseline Data Sets.* Virginia Tech Transportation Institute.

International Organization for Standardization. (2009). *ISO/DIS 26262-1 - Road vehicles — Functional safety.* International Organization for Standardization / Technical Committee 22 (ISO/TC 22).

International Organization for Standardization. (2019). *ISO/PAS 21448:2019 - Road vehicles -- Safety of the intended functionality.*

ISO. (2011). *ISO/IEC 15026-2:2011 Systems and software engineering – Systems and software assurance – Part 2: Assurance case.*

ISO. (kein Datum). *ISO 26262*. Von https://www.iso.org/standard/43464.html abgerufen

ISO. (kein Datum). *ISO SOTIF*. Von https://www.iso.org/standard/70939.html abgerufen

J.Haboucha, C., Ishaq, R., & Shiftan, Y. (2017). User preferences regarding autonomous vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 78*, 37-49.

Junietz, P., Bonakdar, F., Klamann, B., & Winner, H. (2018). Criticality Metric for the Safety Validation of Automated Driving using Model Predictive Trajectory Optimization. *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, (S. 60-65).

Junietz, P., Schneider, J., & Winner, H. (2017). Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und -szenarien. *11. Workshop Fahrerassistenzsysteme.* Walting.

Junietz, P., Wachenfeld, W., Klonecki, K., & Winner, H. (2018). Evaluation of Different Approaches to Address Safety Validation of Automated Driving. *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC).*

Kalra, N., & Groves, D. (2017). *The Enemy of Good. Estimating the Cost of Waiting for Nearly Perfect Automated Vehicles.*

Kelly, T., & Weaver, R. (2004). *The Goal Structuring Notation – A Safety Argument Notation.* Abgerufen am 18. September 2018 von http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.66.5597&rep=rep1&type=pdf

Lefèvre, S., Vasquez, D., & Laugier, C. (2014). *A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles," (English), Robomech J, vol. 1, no. 1, pp. 1–14*. Von http://dx.doi.org/10.1186/s40648-014-0001-z abgerufen

Leveson, N. (2012). *Engineering a safer world: applying systems thinking to safety.* MIT Press.

M. Junge, T. N. (2013). *On Injury Aggregation.* Stapp Car Crash Journal, Vol. 57.

Madigan, R., Louw, T., Wilbrink, M., Schieben, A., & Merat, N. (2017). What influences the decision to use automated public transport? Using UTAUT to understand public acceptance of automated road transport systems. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 50*, 55-64.

Medizinische Hochschule Hannover (MHH). (2019, January 29). *MHH Verkehrsunfallforschung*. Retrieved from https://mhh-unfallforschung.de/en_GB/

NHTSA. (2016). *Forschungsprogramm der NHTSA*. Von http://www.nhtsa.gov/About+NHTSA/Press+Releases/U.S.+Department+of+Transportation+Releases+Policy+on+Automated+Vehicle+Development abgerufen

NHTSA. (2017). *Automated Driving Systems: A Vison for Safety 2.0.* Abgerufen am 18. September 2018 von https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/13069a-ads2.0_090617_v9a_tag.pdf

NKS. (kein Datum). *Definition KMU*. Von http://www.nks-kmu.de/teilnahme-kmu-definition.php abgerufen

Noyer, U., Richter, A., & Scholz, M. (2018). (2018) Generation of Highway Sections for Automated Test Case Creation. In: Proceedings of the DSC 2018 Europe VR, Seiten. *Driving Simulation Conference Europe 2018 VR*, (S. 171-174). Antibes.

Oguchi, T. (2016). Achieving safe road traffic— the experience in Japan, Comparison of 2013 VMT Fatality Rates in U.S. States and in High-Income Countries, U.S. Department of Transportation NHTSA. In *IATSS research, Vol. 39* (S. 110-116).

Origin Consulting (York). (November 2011). *GSN Community Standard Version 1.* Abgerufen am 18. September 2018 von http://www.goalstructuringnotation.info/documents/GSN_Standard.pdf

Philipp Junietz, U. S. (21. February 2019). Macroscopic Safety Requirements for Highly Automated Driving. *Transportation Research Record: Journal of Tthe TRansportation Research Board*, S. https://doi.org/10.1177/0361198119827910.

Preuk, S. (2017). Menschliche Leistungsfähigkeit als Gütekriterium für die Zulassung automatisierter Fahrzeuge: Methode zur Ermittlung der Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit. *9. VDI-Tagung Der Fahrer im 21. Jahrhundert, VDI-Berichte 2311*, (S. 15).

Rahmana, M. M., Lesch, M. F., Horrey, W. J., & Strawderman, L. (2017). Assessing the utility of TAM, TPB, and UTAUT for advanced driver assistance systems. *Accident Analysis and Prevention, 108*, 361-373.

Risser, R. (1988). *Kommunikation und Kultur des Straßenverkehrs.* Wien: Literas Universitätsverlag.

Risser, R., Zuzan, W. D., Tamme, W., Steinbauer, J., & Kaba, A. (1991). *Handbuch zur Erhebung von Verkehrskonflikten.* Wien: Literas Universitätsverlag.

Rodemerk, C., Habenicht, S., Wenzel, A., & Winner, H. (2012). “Development of a general criticality criterion for the risk estimation of driving situations and its application to a maneuver-based lane change assistance system. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, (S. 264-269).

SAKURA. (2019). *SAKURA - Safety Assurance KUdos for Reliable Autonomous Vehicles*. Von http://www.nhtsa.gov/About+NHTSA/Press+Releases/U.S.+Department+of+Transportation+Releases+Policy+on+Automated+Vehicle+Development abgerufen

Satzoda, R., & Trivedi, M. (2016). Safe maneuverability zones & metrics for data reduction in naturalistic driving studies. *IEEE ntelligent Vehicles Symposium (IV)*, (S. 1015–1021).

Schmidt, C. (2014). *Fahrstrategien zur Unfallvermeidung im Straßenverkehr für Einzel- und Mehrobjektszenarien.* Karlsruhe, Baden: KIT Scientific Publishing.

Schöner, H., Hurich, W., Luther, J., & Herrtwich, R. (2011). Koordiniertes Automatisiertes Fahren für die Erprobung von Assistenzsystemen. *ATZ 2011-01*.

Schöner, H.-P. (2014). Challenges and Approaches for Testing of Highly Automated Vehicle. Paris.

Schreier, M. (2016). *Bayesian environment representation, prediction, and criticality assessment for driver assistance systems.* Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.

Schuldt, F. (2017). *Ein Beitrag für den methodischen Test von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen.* Braunschweig: TU Braunschweig.

Shalev-Shwartz, S., Shammah, S., & Shashua, A. (2017). *On a formal model of safe and scalable self-driving cars.* arXiv: 1708.06374, 2017.

Society of Automotive Engineers. (2014). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. *Surface Vehicle Information Report*(J3016).

Statistisches Bundesamt, W. u. (2012). *Umweltökonomische Analyse des Güterverkehrs 1995 bis 2010.* Wiesbaden.

Straßenwesen, B. f. (2013). *Verkehrs- und Unfalldaten - Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland.* Bergisch Gladbach.

U.S. Department of Transportation Federal. (kein Datum). *FATALITY RATE PER 100 MILLION ANNUAL VMT - 2013*. Abgerufen am 17. 07 2018 von https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics/2013/pdf/fi30.pdf

U.S. Department of Transportation NHTSA. (kein Datum). *Fatality Analysis Reporting System 2017*. Abgerufen am 18. 07 2018 von https://www-fars.nhtsa.dot.gov/Main/index.aspx

Ulbrich, S., & Maurer, M. (2015). Towards tactical lane change behavior planning for automated vehicles. *IEEE Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, (S. 989–995).

Umweltbundesamt. (2013). *Treibhausgasausstoss ind Deutschland 2012.* Dessau.

Union, E. (2009). *Amtsblatt der Europäischen Union - Verordnung (EG) Nr. 661/2009.*

VDA. (2015). Von https://www.vda.de/de/services/Publikationen/situationskatalog-e-parameter-nach-iso-26262-3.html abgerufen

Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly, 27*(3), 425-478.

Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH. (29. January 2019). *GIDAS: German In-Depth Accident Study*. Von https://www.gidas.org/willkommen/ abgerufen

Wachenfeld, W. (2017). *Dissertation.* Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Wachenfeld, W., & Winner, H. (2015). Die Freigabe des autonomen Fahrens. In M. Maurer, J. Gerdes, B. Lenz, & H. (. Winner, *Autonomes Fahren* (S. 439-464). Springer Berlin Heidelberg.

Wachenfeld, W., Junietz, P., Wenzel, J., & Winner, H. (2016). The worst-time-to-collision metric for situation identification. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, (S. 729–734).

Winner, H. (2013). Absicherung automatischen Fahrens. *6. FAS-Tagung München.*

Winner, H., Geyer, S., & Sefati, M. (2013). Maße für den Sicherheitsgewinn von Fahrerassistenzsystemen. *6. Darmstädter Kolloquium Mensch + Fahrzeug.*