

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication)  Final Report	
3. title  <b>PEGASUS</b>  (project for the establishment of generally accepted quality criteria, tools and methods as well as scenarios and situations for the release of highly-automated driving functions)		
4. author(s) (family name, first name(s))  Speh, Philipp Brade, Tino Franeek, Marzena Schön, Helmut Philipp, Christian	5. end of project 30.06.2019	6. publication date
		7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address)  Robert Bosch GmbH Robert-Bosch-Allee 1 74232 Abstatt	9. originator's report no. N/A	10. reference no. 19 A 15012 G
		11. no. of pages 159
12. sponsoring agency (name, address)  Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) 10115 Berlin, Germany	13. no. of references 18	14. no. of tables 38
		15. no. of figures 75
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)  TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln, Germany, 12.12.2019		

18. abstract

In this final report for the project PEGASUS, funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), Robert Bosch GmbHs contribution is briefly summarized. The project PEGASUS aimed to create generally accepted quality criteria, tools and methods as well as scenarios and situations for highly automated driving functions of Level 3 (according to SAE standard J3016) using the example of a highway pilot function.

For this purpose, the project was structured as four workpackages: TP1: Szenario analysis and quality metrics, TP 2: Application processes, TP3: Testing and TP4: Results reflection and implementation. In this project a methodology was developed that allows the creation of evidences used for release of a highly automated driving functions based on a scenario based approach. The methodology relies on common interfaces for models and the description of scenarios as well as the usage of common data.

The main contributions of Robert Bosch GmbH are briefly explained in this report.

19. keywords

20. publisher

21. price

### Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)  Schlussbericht
3. Titel  <b>PEGASUS</b>  (Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Speh, Philipp Brade, Tino Franeek, Marzena Schön, Helmut Philipp, Christian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2019
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Robert Bosch GmbH Robert-Bosch-Allee 1 74232 Abstatt	9. Ber. Nr. Durchführende Institution N/A
	10. Förderkennzeichen 19 A 15012 G
	11. Seitenzahl 159
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 10115 Berlin	13. Literaturangaben 18
	14. Tabellen 38
	15. Abbildungen 75
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln, 12.12.2019	

18. Kurzfassung

In diesem Abschlussbericht zum Projekt PEGASUS, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), wird der Beitrag der Robert-Bosch-GmbH kurz zusammengefasst. Das Projekt PEGASUS hatte das Ziel generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeuge und Methoden sowie Szenarien und Situationen für hochautomatisierte Fahrfunktionen des Level 3 (gemäß SAE Standard J3016) am Beispiel des Autobahnchauffeurs zu entwickeln.

Das Projekt war dabei in 4 Arbeitspakete gegliedert: TP1: Szenarienanalyse und Qualitätsmaße, TP2: Umsetzungsprozesse TP3: Testen und TP4: Ergebnisreflektion und Einbettung. Im Projekt wurde eine Methodik entwickelt mit der Evidenzen für eine Freigabe eines hochautomatisierten Fahrsystems auf Basis eines auf Szenarien basierten Ansatzes generiert werden können. Die Methodik stützt sich dabei u.a. auf gemeinsame Schnittstellen für Modelle und die Beschreibung von Szenarien, sowie auf Nutzung gemeinsamer Daten.

Die wesentlichen Beiträge der Robert Bosch GmbH werden im diesem Bericht kurz beschrieben.

19. Schlagwörter

20. Verlag

21. Preis

## Schlussbericht



### PEGASUS

Projekt zur **Etablierung** von **generell akzeptierten Gütekriterien**,  
**Werkzeugen** und **Methoden** sowie **Szenarien** und **Situationen**  
zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen

*Beitrag des Zuwendungsempfängers:* **Robert Bosch GmbH**  
Robert-Bosch-Allee 1  
74232 Abstatt

*Laufzeit:* 01.01.2016 – 30.06.2019

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 19 A 15012 G gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Version: 1.1  
Stand: 14.08.2020

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Autoren:**

Tino Brade	Robert Bosch GmbH
Christian Philipp	Robert Bosch GmbH
Helmut Schön	Robert Bosch GmbH
Marzena Franek	Robert Bosch GmbH
Philipp Speh	Robert Bosch GmbH

**Geprüft durch:**

Mirko Franke	Robert Bosch GmbH
--------------	-------------------

**Inhaltsverzeichnis**

**0 Zusammenfassung / Summary ..... 10**

**1 Übersicht zur Aufgabenstellung ..... 12**

**1.1 Gesamtziel des Projekts PEGASUS ..... 12**

**1.2 Schwerpunkte für BOSCH ..... 12**

        1.2.1 TP 1 ..... 12

        1.2.2 TP 2 ..... 13

        1.2.3 TP 3 ..... 13

        1.2.4 TP 4 ..... 13

**1.3 Voraussetzungen für das Vorhaben ..... 13**

**1.4 Planung und Ablauf..... 14**

**1.5 Stand der Wissenschaft und Technik auf dem das Projekt aufbaute ..... 15**

**1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ..... 17**

**2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse..... 17**

**2.1 TP 1: Szenarienanalyse und Qualitätsmaße ..... 18**

        2.1.1 Anwendungsszenario und Beschreibung des Autobahnchauffeurs (UAP 1.1.1 und UAP1.3.1 für das erweiterte Szenario) ..... 18

        2.1.2 Sicherheitsniveau hochautomatisierter Fahrfunktionen (UAP 1.2.3) ..... 19

        2.1.3 Abweichungen zur ursprünglichen BOSCH-spezifischen Aufgabenstellung in TP 1  
                26

**2.2 TP 2: Umsetzungsprozesse ..... 26**

        2.2.1 Prozessanalyse bisheriger Prozesse (UAP 2.1.1) ..... 26

        2.2.2 Limitation des Szenario-basierten Ansatzes (UAP 2.2.3) ..... 31

            2.2.2.1 Vorgehen ..... 36

            2.2.2.2 Bewertungskriterien..... 37

            2.2.2.3 Bewertung der Methoden ..... 37

            2.2.2.4 Ontologie ..... 42

            2.2.2.5 Kritikalität ..... 44

            2.2.2.6 Assoziation ..... 45

            2.2.2.7 Relation..... 46

            2.2.2.8 Selektion ..... 48

            2.2.2.9 Variation..... 49

            2.2.2.10 Evaluation ..... 50

            2.2.2.11 Einfluss der Limitationen auf die Sicherheitsargumentation ..... 51

            2.2.2.12 Zusammenfassung ..... 55

        2.2.3 Zuordnung von Tests zu Prüfmethode (UAP 2.2.4) ..... 56

        2.2.4 Identifikation von Automationsrisiken durch Analysemethoden (kein UAP) ..... 59

2.2.5	Abweichungen zur ursprünglichen BOSCH-spezifischen Aufgabenstellung in TP 2	59
<b>2.3</b>	<b>TP 3: Testen</b>	<b>59</b>
2.3.1	Entwicklung relevanter Use Cases (UAP 3.1.1)	59
2.3.2	Systematik der Definition der Test-Cases (UAP 3.1.2)	68
2.3.3	Definition der Anforderungen an Prüfgeländetests (UAP 3.3.1)	80
2.3.3.1	Einführung	81
2.3.3.2	Vorbetrachtungen	81
2.3.3.3	Komponenten zur Umfeldwahrnehmung	82
2.3.3.4	HAF-Testing auf Teststrecken	84
2.3.3.5	Use Cases für Teststrecken	85
2.3.3.6	Test Case	87
2.3.3.7	Anforderungen an die Teststrecke	91
2.3.3.8	Topologie und Elemente der Teststrecke	97
2.3.3.9	Entwurf Teststrecke	102
2.3.3.10	Bewertung	105
2.3.4	Umsetzung mit Versuchsträgern (UAP 3.3.2, 3.3.3 und UAP 3.4.2)	106
2.3.4.1	Fahrzeug-Dauerlauf-1R1V	107
2.3.5	Auswertung der Felddaten (UAP 3.4.3)	108
2.3.5.1	Proof-of-Concept	108
2.3.5.2	Daten für die Testflotte	108
2.3.5.3	PEGASUS Datenkonvertierung	108
2.3.6	Erarbeitung von Sensor-Modellkonzepten (UAP 3.2.1)	110
2.3.7	OSI Sensormodell Schnittstelle (UAP 3.2.1)	111
2.3.7.1	Schnittstellenkonzept	111
2.3.7.2	Sensormodellbezogene Datenfelder	112
2.3.7.3	Sensormodellrelevante Änderungen in OSI 3	115
2.3.8	Sensormodell Radar (UAP 3.2.2)	116
2.3.8.1	Radareffekte	116
2.3.8.2	Modellanforderungen	119
2.3.8.3	Phänomenologisches Sensormodell	121
2.3.8.4	Physikalisches Sensormodell	123
2.3.9	Sensormodell Kamera (UAP 3.2.2)	126
2.3.9.1	Kameraeffekte	126
2.3.9.2	Modellanforderungen	128
2.3.9.3	Phänomenologisches Kamera-Sensormodell	130
2.3.9.4	Physikalisches Kamera-Sensormodell	133
2.3.10	Validierung von Sensormodellen (UAP 3.2.2)	135

2.3.11	Abweichungen zur ursprünglichen BOSCH-spezifischen Aufgabenstellung in TP 3	136
<b>2.4</b>	<b>TP 4: Ergebnisreflektion und Einbettung</b>	<b>136</b>
2.4.1	Methodik der Ergebnisreflektion und Ergebnisreflektion (UAP 4.1.2 und 4.2.1)	136
2.4.1.1	Fragebogen	136
2.4.1.2	Formaler Aufbau des Fragebogens	137
2.4.1.3	Ergebnisreflexion – PEGASUS Newsletter	146
2.4.2	Unternehmensinterne Reflexion (UAP4.2.2)	148
2.4.2.1	Unternehmensinterne Reflexion zur Hälfte des Projektes	148
2.4.2.2	Unternehmensinterne Reflexion zum Projektabschluss	149
2.4.3	Reflexion mit Dritten (UAP 4.1.3)	150
2.4.4	Abweichungen zur ursprünglichen BOSCH-spezifischen Aufgabenstellung in TP 4	151
<b>3</b>	<b>Ergänzende Informationen zum Projekt</b>	<b>152</b>
<b>3.1</b>	<b>Zahlenmäßiger Nachweis</b>	<b>152</b>
<b>3.2</b>	<b>Notwendigkeit der Förderung</b>	<b>152</b>
<b>3.3</b>	<b>Nutzen und Verwertbarkeit</b>	<b>153</b>
<b>3.4</b>	<b>Bekannt gewordener Fortschritt</b>	<b>153</b>
<b>3.5</b>	<b>Veröffentlichungen und Ergebnisverbreitung</b>	<b>153</b>
3.5.1	Erfolgte Veröffentlichungen	153
3.5.2	Geplante Veröffentlichungen	153
<b>4</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>154</b>
<b>5</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>157</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>158</b>

## **0 Zusammenfassung / Summary**

### **Deutsch**

In diesem Abschlussbericht zum Projekt PEGASUS, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), wird der Beitrag der Robert-Bosch-GmbH kurz zusammengefasst. Das Projekt PEGASUS hatte das Ziel generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeuge und Methoden sowie Szenarien und Situationen für hochautomatisierte Fahrfunktionen des Level 3 (gemäß SAE Standard J3016) am Beispiel des Autobahnchauffeurs zu entwickeln.

Das Projekt war dabei in 4 Arbeitspakete gegliedert: TP1: Szenarienanalyse und Qualitätsmaße, TP2: Umsetzungsprozesse TP3: Testen und TP4: Ergebnisreflektion und Einbettung. Im Projekt wurde eine Methodik entwickelt mit der Evidenzen für eine Freigabe eines hochautomatisierten Fahrsystems auf Basis eines auf Szenarien basierten Ansatzes generiert werden können. Die Methodik stützt sich dabei u.a. auf gemeinsame Schnittstellen für Modelle und die Beschreibung von Szenarien, sowie auf Nutzung gemeinsamer Daten. Die Robert-Bosch GmbH war in allen vier Arbeitspaketen vertreten, im Folgenden wird jeweils ein wesentlicher Beitrag der Die Robert-Bosch GmbH hervorgehoben:

- TP1: Für die Ermittlung des Sicherheitsniveaus einer HAD-Funktion wurde der Ansatz des Verursachens in die Funktionsbewertung eingebracht. (Untersuchung des Zusammenhangs des Entstehens einer kritischen Situation und des HAD-Systemverhaltens).
- TP 2: Die Limitationen des in PEGASUS gewählten sogenannten Szenario-basierenden Ansatzes wurden ausführlich untersucht und aufgezeigt. Es wurden drei Hauptkategorien für Limitationen, Assumption Coverage, Unfounded Evidence und Unused Evidence identifiziert und detailliert beschrieben.
- TP 3: RADAR- und Kamera Sensormodelle wurden erstellt und in das Open-Sensor-Interface (OSI) eingebettet. Viele Charakteristika des Sensors können in den Modellen abgebildet werden (z.B: Field-of-View, Verdeckung, Phasenrauschen,...). Ferner wurde ein einfaches physikalisches RADAR-Modell erstellt.
- TP 4: Ergebnisreflektions-Workshops mit Dritten, u.a. der BASt wurden durchgeführt, protokolliert und ausgewertet.

### **English**

In this final report for the project PEGASUS, funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), Robert Bosch GmbHs contribution is briefly summarized. The project PEGASUS aimed to create generally accepted quality criteria, tools and methods as well as scenarios and situations for highly automated driving functions of Level 3 (according to SAE standard J3016) using the example of a highway pilot function.

For this purpose the project was structured as four workpackages: TP1: Scenario analysis and quality metrics, TP 2: Application processes, TP3: Testing and TP4: Results reflection and implementation. In this project, a methodology was developed that allows the creation of evidences used for release of a highly automated driving functions based on a scenario based approach. The methodology relies on common interfaces for models and the description of scenarios as well as the usage of common data. Robert-Bosch GmbH was involved in all four work packages, one important contribution of the Robert Bosch GmbH will be highlighted:

- TP1: For the creation of a Safety level for a HAD function, the idea of causation was introduced. (Analysis of relations between the HAD functions behavior and the development of critical situations)
- TP2: The limitations of the scenario based approach chosen in PEGASUS were analyzed and evaluated. Three main categories for limitations were identified and described in detail, assumption coverage, unfounded evidence and unused evidence.
- TP 3: RADAR- and camera sensor models were created and integrated into the open sensor interface (OSI). Many characteristics of sensors can be reproduced in the models (such as field of view, Obstruction, Phase noise, ...)
- TP 4: Results reflection workshops with third parties such as the BASt were held, documented any evaluated.

## **1 Übersicht zur Aufgabenstellung**

### **1.1 Gesamtziel des Projekts PEGASUS**

In dem Gemeinschafts-Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahr-funktionen (PEGASUS) sollten Lücken in den Bereichen Testen und Freigabe von automatisierten Fahrzeugen geschlossen werden, sodass bereits vorliegende Ergebnisse und Prototypen zeitnah in Produkte überführt werden können.

Ein Hauptziel war es, die zentralen Elemente einer Werkzeugkette zur Absicherung automatisierter Fahrzeuge zu konzipieren und zu entwickeln, um damit zentrale Maßstäbe zu liefern. Die Hauptfrage im Projekt war dabei:

- Wie gut muss das automatisierte Fahrzeug sein?
- Wie lässt sich nachweisen, dass dieser Performance-Level auch erreicht wird?

Die zentralen Fragestellungen dazu, welche im Projekt bearbeitet wurden, waren:

- Vergleich mit dem Menschen: Wie leistungsfähig ist der Mensch / die Maschine? Welche Leistungsfähigkeit kann als akzeptiert werden? Wie können daraus Nachweisgrenzen abgeleitet werden?
- Werkzeuge und Methoden: Welche Werkzeug & Methoden benötigen wir für die Nachweiserbringung. Wo haben bestehende Werkzeug & Methoden ihre Lücken? Wo sind die Lücken des PEGASUS Ansatzes?
- Testfälle: Wie stellen wir sicher, dass sie vollständig sind? Wie sehen die Testkriterien aus? In welcher Testumgebung werden welche Ergebnisse erbracht?
- Gesamtkonzept: Trägt es? Ist es anwendbar?

### **1.2 Schwerpunkte für BOSCH**

Der Schwerpunkt der Robert Bosch GmbH war im Projekt durch die langjährige Erfahrung im Bereich der Sensorik und Aktorik und der Einbringung der entsprechenden Expertise geprägt. Entsprechend lag der Arbeitsschwerpunkt der BOSCH in TP 3. Ein weiteres Fokusthema war die Analyse des Freigabe Konzeptes selbst, um zu verstehen welche Schwächen sowie die offenen Punkte und Fragen bestehen (TP 2).

Die BOSCH sollte ebenso mit einem Bosch-eigenen Versuchsträger Daten aufnehmen und diese dem Projekt zur Verfügung stellen.

#### **1.2.1 TP 1**

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. Am Beispiel des Autobahnchafferus sollte dazu ein umfassendes Szenario für ein hochautomatisiertes Fahrzeug auf der Autobahn erstellt werden. Dabei flossen sowohl technische Analysen als auch Erkenntnisse aus menschenzentrierten Untersuchungen ein. Aus der maschinellen sowie menschlichen Leistungsfähigkeit sollte das notwendige Sicherheitsniveau sowie definierte Kriterien, Qualitäts- und Gütemaße abgeleitet werden.

## 1.2.2 TP 2

Die Identifikation und Erstellung möglichst allgemeingültiger Entwicklungs- sowie Test-Prozesse lag als Querschnittsthema im Fokus des TP 2. Dazu wurden auf Basis der Erkenntnisse aus TP1 Kriterien, Metriken und Prozesse (u.a. beim Nachweis der funktionalen Sicherheit) untersucht, die bereits in der Automobilindustrie etabliert sind. Ergänzend erfolgte im Zusammenwirken mit TP 1 eine Betrachtung innovativer Ansätze und Konzepte zur Analyse neuartiger Automatisierungssysteme.

## 1.2.3 TP 3

Im TP 3 lag der Fokus auf der Umsetzung der Testaufgaben mit Hilfe von konkreten Testmethoden und Testverfahren für die Bereiche Simulation/Labore/Prüfstände, Prüfgelände und Feldtest.

Der Nachweis, dass diese Situationen hinreichend sicher beherrscht werden, sollte mit den erarbeiteten Testmethoden, -verfahren und realen Erprobungen beispielhaft gezeigt werden. Dazu wurden Maße und Methoden aus TP 1 und TP 2 verwendet. Insbesondere wurden Grenzen der Anwendbarkeit von festgelegten Kriterien und Maßen bzw. Prüfmethode sowie Erkenntnissen über die notwendige Prüftiefe untersucht.

## 1.2.4 TP 4

Das TP 4 Ergebnisreflektion und Einbettung lief parallel zu den anderen Teilprojekten und beleuchtete kritisch die Arbeitsergebnisse. Ziel war es, ein Testniveau zu gewährleisten, mit dem Produkte für den Straßenverkehr bzw. zur Nutzung durch Kunden zugelassen werden können. Eine Feedback-Schleife zur Projektlaufzeit sorgte dabei für einen systematischen Informationsrückfluss in PEGASUS hinein, sodass dieser dort entsprechend aufgegriffen und berücksichtigt werden kann. Dazu gehörte auch eine Reflexion der Ergebnisse mit Dritten, also nicht direkt im Projekt eingebundenen Parteien.

## 1.3 Voraussetzungen für das Vorhaben

Das Projekt PEGASUS wurde in einem Verbund aus Automobilherstellern, Zulieferern, öffentlichen Einrichtungen, Forschungseinrichtungen und KMUs bearbeitet. Die Projektkoordination wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) übernommen. Die Gesamtliste der anderen Partner umfasste:

Name	Abkürzung
Adam Opel AG	Opel
AUDI AG	Audi
BMW AG	BMW
Daimler AG	Daimler
Volkswagen AG	Volkswagen
A.D.C. Automotive Distance Control Systems GmbH (ein Unternehmen des Continental Konzerns)	A.D.C.
Continental Teves AG	Continental
TÜV SÜD GmbH	TÜV SÜD

Name	Abkürzung
Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen	fka
iMAR Navigation GmbH	iMAR
IPG Automotive GmbH	IPG
QTronic GmbH	QTronic
TraceTronic GmbH	TraceTronic
VIRES Simulationstechnologie GmbH	VIRES
DLR e.V. – Institut für Verkehrssystemtechnik	DLR
TU Darmstadt – Fachgebiet Fahrzeugtechnik	FZD

*Tabelle 1: Projektpartner (außer Bosch)*

Folgende Voraussetzungen waren bei der Robert-Bosch GmbH gegeben und notwendig bzw. nützlich:

- Erfahrung mit Freigabeargumentationen und deren Fragestellungen für hochautomatisierte Systeme.
- Erfahrung mit dem Themenkomplex SOTIF (safety of the intended functionality)
- Erfahrung mit bestehenden Automotive-Prozessen, insbesondere ISO26262 und ISO PAS 21448.
- Theoretisches Hintergrundwissen zu formalen Ansätzen und Methodiken.
- Know-How und Erfahrung im Bereich Sensorik, insbesondere für Radar- und Kamera-Sensoren.
- Know-how zur Übertragung von Sensoreigenschaften in Modelle.
- Kompetenz und Erfahrung in Bereich Simulation, insbesondere dem Einsatz von Modellen.

#### **1.4 Planung und Ablauf**

Das Projekt startete planmäßig am 01.01.2016. Zum Projektende am 31.12.2018 wurde eine kostenneutrale Verlängerung beantragt, so dass das Projekt am 30.06.2019 endete.

Die BOSCH hatte keine TP-Leitung inne, sondern arbeitete in den jeweiligen TPs mit, wie vom TP Leiter organisiert.

Abgesehen, von der kostenneutralen Verlängerung, wurde die Zeitplanung dabei ohne größere Abweichungen eingehalten und der Projektfortschritt in den zugehörigen Zwischen-Berichten dokumentiert. Fahrversuche konnten von Bosch eigenständig durchgeführt werden, und erforderten keine Koordination mit anderen Partnern. Der Upload der Daten in die Datenbank geschah nach entsprechenden Vorgaben aus dem Projekt.

Nach ungefähr halber Projektlaufzeit wurden Zwischenergebnisse auf dem sogenannten Halbzeitevent am 8. Novemebr 2017 in Aachen präsentiert. Zusätzlich fand zu Projektende

ein Abschlussevent am 13. & 14. Mai 2019 in Ehra-Lessien statt, auf dem schliesslich die Endergebnisse gezeigt wurden. Bei beiden Events gab es auch einen internationalen Publikumstag.

### **1.5 Stand der Wissenschaft und Technik auf dem das Projekt aufbaute**

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 Fahrzeugen 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.

Eine Systematik, um komplexe Verkehrskonstellationen und die sich daraus potenziell entwickelnden Verkehrssituationen systematisch zu analysieren musste dabei nie entwickelt werden. Die Darstellung und Prognose komplexer Situationen und die Gesamtheit aller möglichen Verkehrssituationen ist jedoch für das Testen automatisierter zwingend notwendig.

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 sub-mikroskopischer 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 auch heute sonst keine methodenübergreifenden Darstellungen und Prognosen komplexer Situationen und die Identifikation und Beschreibung der Gesamtheit aller möglichen Verkehrssituationen wurde bisher nicht erforscht.

Zu Projektbeginn bestand eine Forschungslücke im Bereich der Bewertung der Kritikalität von Situationen, selbst in einem beschränkten Betrachtungsgebiet wie der Autobahn. Hierdurch war der Vergleich von menschlicher mit maschineller Leistungsfähigkeit zur Kollisionsvermeidung 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.

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 Gesamtfahrzeug-tests auf komplexen Fahrzeugprüfständen und die Bedienungsabsicherung in Fahrsimulatoren gehören ebenso dazu wie die Funktions-Erprobungen auf Prüfgeländen und schließlich die finale Absicherung durch Felderprobung. All diese Elemente sind jedoch bsher auf einfach Anwendungsfälle ausgelegt gewesen, Teststerckenversuche z.B. beinhalten meistens nur 2 Fahrzeuge während für hochautomatisierte Fahrfunktionen komplexere Darstellungen nötig sind.

Das Projekt PEGASUS baute auf den Ergebnissen von verschiedenen nationalen sowie internationalen Forschungsprojekten auf und nutzt die bestehenden Ergebnisse für eine schnelle und effiziente Durchführung des Projektes. Weitere Details zum Stand der Technik können der Vorhabensbeschreibung entnommen werden.

Die umfangreichen Vorarbeiten der Robert Bosch GmbH im Bereich des hochautomatisierten Fahrens bilden den wissenschaftlich-technischen Stand an den zu Projektbeginn speziell angeknüpft wurde. Im Wesentlichen sind hier fahrbare Prototypen-Fahrzeug mit HAD-Funktionen zu nennen, welche mit seriennaher oder serienreifer Sensorik betrieben wurden. Hieraus erwachsen Erfahrungen über Sensorperformance und deren Auswirkungen auf ein HAD-System. Ferner waren Erfahrungen mit Meßeinrichtungen und Meßtechnik für die Planung und Durchführung der Testfahrten vorhanden. Außerdem sind auch andere zum Thema relevante, öffentlich geförderte Projekte zu nennen, in denen die BOSCH involviert war:

MOTIV, INVENT, AKTIV, simTD, UR-BAN, CONVERGE, Ko-HAF, MecVIEW und RobustSense.

Aus dem Stand der Wissenschaft und Technik stand nur spärlich Material zum Thema Freigabe einer hochautomatisierten Funktion zur Verfügung. Das Ethikpapier der Bundesregierung (ETHICS COMMISSION AUTOMATED AND CONNECTED DRIVING, 2017) und Veröffentlichungen der NHTSA<sup>1</sup> (transportation) wurden während des Projektverlaufes berücksichtigt. Zur Freigabe von Level 1-2 Systemen waren im Hause Bosch diverse Erfahrungen, u.a. zum SOTIF Standard ISO PAS 21448 vorhanden, die in die Projektbearbeitung eingeflossen sind.

Die daraus resultierenden Aufgabenstellungen waren im Wesentlichen:

- TP1: Aufgabe der Robert Bosch GmbH war es in TP 1 die Anwendungsszenarien hinsichtlich technischer Grenzen von Sensorik und Aktorik zu definieren. Ferner sollte an einem Sicherheitsmaß für die hochautomatisierte Fahrfunktion mitgearbeitet werden.
- TP 2: In TP 2 war die Aufgabe der BOSCH in der Analyse der Limitation des gewählten (Szenario-basierten) Ansatzes Informationen aus allen TPs aufzusammeln und den sich daraus ergebenden Ansatz auf u.a. strukturelle Schwachstellen zu untersuchen. Ferner sollten die Grenzen des Ansatzes herausgearbeitet werden, also Bereich in denen der Ansatz wahrscheinlich keine guten Ergebnisse mehr liefern kann.

---

<sup>1</sup> [https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/13069a-ads2.0\\_090617\\_v9a\\_tag.pdf](https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/13069a-ads2.0_090617_v9a_tag.pdf)

- TP 3: Der Fokus der BOSCH in TP 3 lag auf der Einbindung der Sensoren in das Testkonzept. Dazu sollten Limitationen, welche sich durch die Sensorik ergeben, aus Szenarien abgeleitet werden, um dann ein passendes Testkonzept festzulegen. Daraus sollten Anforderungen an Radar- und Kameramodelle erarbeitet werden. Aus diesen Anforderungen sollten Sensor-Modelle prototypisch umgesetzt sowie in der Bosch, sowie auch in der PEGASUS-Simulationsumgebung integriert werden. Abschließend sollten die integrierten Modelle in bestimmten Referenzszenarien getestet werden.
- TP 4: Der Bosch-Schwerpunkt war es, für das PEGASUS Projekt einen Prozess zur Ergebnisreflexion zu entwickeln und diesen im Projektverlauf hinsichtlich Struktur anforderungsgerecht anzupassen. Mit Projektfortschritt wurde der Prozess regelmäßig anhand von Metriken hinterfragt und bewertet. Die Ergebnisreflexion (AP4.1) gliedert sich nach der Anpassung in vier wesentliche Kernelemente auf:
  - UAP 4.1.1 PEGASUS interne Reflexion
  - UAP 4.1.2 Unternehmensinterne Reflexion
  - UAP 4.1.3 Reflexion mit Dritten
  - UAP 4.1.4 Reflexion der Robustheit der Ergebnisse

## **1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die intensive, projektinterne Zusammenarbeit fand, organisiert durch die TP Leiter, in den Arbeitspaketen TP 1-3 statt. Um zusätzlich Inhalte und Arbeitsergebnisse vorzustellen oder zu diskutieren, fanden für jedes TP sog. Quartalsmeetings statt. Zusätzlich fanden einzelne, spezielle Arbeitsworkshops statt, die jeweils zu bestimmten Fokusthemen organisiert wurden. Dort wurden wesentliche Arbeitsergebnisse erarbeitet. Diese wurden auf dem gemeinsamen Sharepoint geteilt. Die PEGASUS-Datenbank wurde vom FKA betrieben und zur Verfügung gestellt.

Wichtige Entscheidungen wurden auf Ebene der TP Leiter diskutiert, und gegebenenfalls im Steuerkreis des Projektes zur Entscheidung gebracht.

Bosch intern wurden insbesondere zur Ergebnisreflexion der Zentralbereich für Freigabe eingebunden. Ferner wurden gezielt Bereiche / Teams involviert, um jeweils zum Bereich passende Einbettungselemente aus PEGASUS zu bewerten.

Im Rahmen der Ergebnisreflexion mit Dritten war Bosch an Planung und Durchführung von Treffen mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und BMVi beteiligt.

## **2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse**

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, hat die Robert Bosch GmbH (Bosch) in allen vier Arbeitspaketen Aufgaben bearbeitet und Projektziele verfolgt. Dieses Kapitel dient einerseits der Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und Beiträge, sowie der inhaltlichen Schilderung der erreichten Ergebnisse. Die Gliederung des Kapitels folgt dabei der oben beschriebenen, groben Unterteilung nach Arbeitspaketen.

## **2.1 TP 1: Szenarienanalyse und Qualitätsmaße**

### **2.1.1 Anwendungsszenario und Beschreibung des Autobahnchauffeurs (UAP 1.1.1 und UAP1.3.1 für das erweiterte Szenario)**

Zusammen mit den anderen Partnern war Bosch im UAP 1.1. an der Beschreibung des Autobahnchauffeurs beteiligt. Dabei wurden neben der generischen, d.h. Lösungsunabhängigen Beschreibung auch Themen der Übernahme durch den Fahrer spezifiziert.

Dabei wurden u.a. folgende Themen eingebracht:

- Die Systembeschreibung hatte gefordert, dass der Fahrer das Fahrzeug immer in der Mitte der Fahrspur halten soll. Beim Vorbeifahren an anderen Fahrzeugen oder statischen Objekten kann es jedoch erforderlich sein, davon abzuweichen und das Fahrzeug auch innerhalb der Spur von der Spurmitte abweichen zu lassen.
- Das Vorgehen zur Übernahme durch den Fahrer wurde erweitert, insbesondere was die Unterscheidung zwischen einer gewollten und einer ungewollten Übernahme (versehentliche Berührung des Lenkrads durch den Fahrer) betraf
- Vereinzelt waren Anforderungen in der Systembeschreibung enthalten, die Annahmen zur Architektur des Systems beinhalten. Die Systembeschreibung sollte jedoch lösungsunabhängig sein.
- Die Systembeschreibung forderte initial, dass Pannenfahrzeuge auf dem Seitenstreifen durch ein aufgestelltes Warndreieck erkannt werden sollen. Es kann jedoch nicht in allen Fällen vorausgesetzt werden, dass dieses auch dort aufgestellt wurde.
- Die Annahme, dass der Fahrer eine Grundvigilanz aufweisen soll, wurde diskutiert und verworfen.
- Es war in der vorigen Version vorgesehen, dass die manuelle Aktivierung des Scheibenwischers oder über den Regensensor Nässe erkannt wird und das Fahrzeugverhalten entsprechend angepasst wird. Da der Fahrer jedoch im Falle des aktivierten Systems nicht im Loop ist, wird er auch nicht den Scheibenwischer aktivieren. Eine Erkennung über den Regensensor kann nicht als zuverlässig genug angesehen werden. Die jetzt vorgesehene Lösung nutzt Informationen aus der Infrastruktur-Fahrzeug-Kommunikation.
- Ursprünglich sollte die sichere Geschwindigkeit zum Durchfahren von Kurven online aus einer Reibwertschätzung im Fahrzeug bestimmt werden. Wenn das System in einer Kurve jedoch einen für die aktuelle Geschwindigkeit zu geringen Reibwert feststellt, ist es bereits zu spät für das System, darauf zu reagieren. Die sichere Geschwindigkeit muss daher bereits vor dem Durchfahren der Kurve bekannt sein und eingeregelt werden, so dass nun vorab Informationen aus der Infrastruktur-Fahrzeug-Kommunikation genutzt werden sollen.
- Es wurden Szenarien ergänzt, z.B. soll ein Fahrstreifenwechsel auch dann abgebrochen werden, wenn ein sehr schnell von hinten annäherndes Fahrzeug zu Beginn des Fahrstreifenwechsels aufgrund der eingeschränkten Reichweite der Sensoren noch nicht erkannt werden konnte.
- Es wurde der Fall ergänzt, dass ein Warndreieck u.U. nicht regelkonform aufgestellt ist und daher nicht von der Sensorik erkannt wird.

- Es müssen auch auf Autobahnen Ampeln und deren Zustand vor Tunneln sensorisch erkannt und vom System beachtet werden.
- Da die Sensorik je nach Technologie stark wetterabhängig ist wurde für den Fall einer eingeschränkten Sichtweite durch Wettererscheinungen vermerkt, dass das System nur dann aktiv sein darf, wenn keine zu starke Sichteinschränkung vorherrscht.
- Verschiedene Fragestellungen bzgl. der Notwendigkeit für die Erkennung eines Staus, Lichteinrichtungen am Fahrzeug, Aktivierung des Systems in Abhängigkeit vom geschlossenen Gurtschloss wurden geklärt und in der Systembeschreibung geschärft.

### **2.1.2 Sicherheitsniveau hochautomatisierter Fahrfunktionen (UAP 1.2.3)**

Während der Projektlaufzeit wurden diverse Ansätze für ein Sicherheitsniveau diskutiert. Diese stützten sich maßgeblich auf Testergebnisse für verschiedene Szenarien ab. Als Vergleichsschwelle wurden sowohl der Vergleich mit einer normierten menschlichen Leistungsfähigkeit, als auch der Vergleich mit Unfallzahlen herangezogen. Bosch nahm an diesen Diskussionen im TP 1 teil.

Es wurde allerdings irgendwann deutlich, dass es nicht gelingen wird das Sicherheitsniveau der automatisierten Fahrfunktion in einer singulären Kenngröße abzubilden. Zum einen kann die Vollständigkeit der betrachteten Szenarien nicht gewährleistet werden und ebenfalls kann die Auftretenswahrscheinlichkeit eines konkreten Szenarios nicht bestimmt werden, was zum anderen bedeutet, dass keine Äquivalenz zu einer auf zurückgelegter Wegstrecke basierenden Kennzahl für verursachte Unfälle berechnet werden kann. Dies macht eine Gegenüberstellung und Vergleich mit aktuellen Unfallzahlen unmöglich. Die Definition einer akzeptablen Grenze im Sinne eine hinnehmbare Unfallzahl als Freigabeschwelle empfand Bosch und auch andere TP1 Mitglieder als nicht zielführend.

Ein funktionsübergreifendes Maß hat einige generelle inhärente Probleme. Zunächst hängt viel von der Wahl der Referenz ab. Wird die Referenz gewählt als die Gesamtheit der zu bewältigenden Szenarien so hängt die Sicherheitsmaßzahl vom Funktionsumfang ab. Systeme mit weniger Funktionsumfang müssen auch weniger Szenarien bewältigen. Damit wird eine Vergleichbarkeit verschiedener System über eine Maßzahl schwierig, die selbe Sicherheitsmaßzahl könnte Gleichwertigkeit suggerieren während ein System mit höherem Funktionsumfang aber letztlich besser wäre. Wählt man eine absolute Referenz (z.B. alle Autobahn-Szenarien für einen Highway-Chauffeur), wird vornehmlich der Funktionsumfang bewertet. Eine Funktion mit hoher Abdeckung der relevanten Highway Szenarien aber schlechtem Sicherheitsniveau könnte eine höhere Wertung erreichen, als ein System das wenige Szenarien sicher beherrscht. Als möglicher Lösungsweg bietet sicher daher eine relative Bewertung, die sich auf ein Referenz-Sicherheitsniveau für jedes Szenario stützt. Das Sicherheitsmaß würde dann nur die relative Performance gegenüber der Referenz-Performance bewerten. Ein System, das weniger Funktionsumfang bietet, diesen aber sicher abbildet, würde daher besser abschneiden, als eines mit mehr Funktionsumfang aber einigen verbleibenden Unsicherheiten.

Dazu benötigt man allerdings ein klares Referenzniveau für jedes Szenario. Für die Wahl der Referenz müssen allerdings erst einige grundlegende Fragen beleuchtet werden. Die wichtigste ist: Was ist das oberste Freigabeziel der hochautomatisierten Funktion (HAF)? Oft wird eine Verbesserung der Verkehrssicherheit erwartet, so wie auch festgehalten Bericht der Ethik-Kommission. Dies kann jedoch grundsätzlich nicht alleinige Aufgabe und damit Prüfgegenstand einer HAF sein. Vornehmlich müssen die Verkehrsregeln einen sicheren Verkehrsfluss gewährleisten. Da diese, aus Sicht einer HAF, nur grob formuliert sind, spielen die Fahrer im Verkehr noch eine wichtige Rolle. Die Interaktion vornehmlich dieser Elemente formt das resultierende Maß an Verkehrssicherheit.

Betrachten wir ein Beispiel: Ein Highway-Chauffeur hält sich an Verkehrsregeln und hält den Sicherheitsabstand rigoroser ein, als es der Mensch im Schnitt tut. Dadurch entstehen dem Highway-Chauffeur mehr Einscherer, was evtl. zu mehr, schärferen Bremsvorgängen führen könnte. Durch den Ziehharmonika-Effekt oder morgentliche, mangelnde Aufmerksamkeit anderer Fahrer könnte das letztlich im hinten folgenden Verkehr mehr Auffahrunfälle bedeuten, auch bedingt durch das weniger verbreitete Einhalten des Sicherheitsabstandes beim Menschen. Es wäre schwierig, den Highway-Chauffeur dafür alleinig verantwortlich zu machen. Auch wäre es kaum sinnvoll zu erwarten, solche Effekte im Vorfeld gänzlich zu untersuchen. Im obigen Beispiel trägt der Highway-Chauffeur zu erhöhter Verkehrssicherheit bei, indem er die Verkehrsregeln strikt einhält. Sekundäreffekte die, unter Einhaltung der Verkehrsregeln, zu einer Verschlechterung führen, wie oben beschrieben sollten nicht alleinige Verantwortung des Highway-Chauffeurs sein.

Um den Beitrag zur Verkehrssicherheit direkter zu messen könnte man die menschliche Unfallstatistik als Basis nehmen und die HAF damit vergleichen. Auch dieser Ansatz hat einige Schwächen: Zum einen sind beim Menschen nur ungefähre Fahrleistung und Unfallaufkommen bekannt. Die Anzahl an potentiell kritischen und kritischen Situationen, die nicht zu Unfällen führen ist nicht bekannt. Dadurch, dass die HAF voraussichtlich nicht das gleiche Verhalten zeigen wird wie der Mensch, könnte sowohl die Anzahl an

- potentiell kritischen Situationen
- daraus resultierenden kritischen Situationen
- und daraus resultierenden Unfällen

bei der HAF gegenüber dem Menschen variieren. Die Unfallrate ist bei dieser Betrachtung:

Unfallwahrscheinlichkeit = Wahrscheinlichkeit von potentiell kritischen Situationen x Wahrscheinlichkeit von kritischen Situationen, die aus potentiell kritischen resultieren x Wahrscheinlichkeit von Unfällen, die sich aus kritischen Situationen ergeben:

$$P(\text{Unfall}) = P(\text{pot. krit. S.}) \times P(\text{pot. krit. S.} | \text{krit. S.}) \times P(\text{krit. S.} | \text{Unfall} - \text{S.})$$

Im in PEGASUS vorgestellten Szenarien basierten Ansatz werden hauptsächlich „atomare“ Szenarien betrachtet, z.B. der Einscherer oder Durchscherer. Die Betrachtung dieser Fälle erlaubt zumindest eine Abschätzung der Unfallrate der HAF, wenn sie sich in diesen kritischen Situationen befindet. Die Wahrscheinlichkeit sich in kritischen Situationen zu befinden ist für die HAF Funktion selbst zu betrachten. Das Auswerten von Verkehrsdaten mit menschlichen Fahrern kann trügerisch sein, da Menschen andere Wahrscheinlichkeiten für die Entstehung

solcher Situationen aufweisen können als die HAF (Beispiel: Einscherer, bei HAF wahrscheinlich häufiger wegen höherem Abstand zum Vorderfahrzeug). Die Wahrscheinlichkeit, dass potentiell kritische Situationen zu wirklich kritischen Situationen werden ist stark von der strategischen Manöverplanung („vorrasschauendes Fahren“) abhängig. Hier ist der Mensch instinktiv stark. Genaue Zahlen, z.B. wie viele potentiell kritische Situationen der Mensch durch vorausschauendes Fahren entschärft sind nicht bekannt. Aufgrund der Limitation des PEGASUS-Ansatzes und der fehlenden Verfügbarkeit der würde in einer Berechnung von Unfallzahlen damit eine beträchtliche Unsicherheit verbleiben. Dazu kommt, dass es allgemeine Zweifel gibt, dass eine Vorausberechnung von Unfallzahlen sinnvoll oder überhaupt möglich ist.

Es stellt sich daher die Frage, wie dann ein Sicherheitsmaß überhaupt angegeben werden kann. Hierzu hat Bosch einen Vorschlag erarbeitet der im Folgenden dargelegt wird.

Grundlegend für die Bewertung eines Fehlverhaltens bei menschlichen Fahren ist das Verkehrsrecht. Auch wenn es zu einem Unfall kommt, kann ein Mensch von einer Schuld freigesprochen werden, auch wenn der Unfall nicht verhindert wurde. Es liegt daher nahe zunächst eine ähnliche Vorgehensweise bei der HAF zu untersuchen. Da das Verkehrsrecht nicht unbedingt präzise ist, ist eine weitere Zerlegung seiner Grundprinzipien nötig. Im Verkehrsrecht geht es interessanterweise nicht so sehr um Unfälle, sondern meistens um die Vermeidung von kritischen Situationen an sich. Dieses übergeordnete Prinzip wurde in 3 Unterkategorien aufgeteilt:

	Prinzip	Auslöser	Beispiel
1.	Erhöhung oder mangelnde Verkleinerung von bereits entstandener Kritikalität	falsche oder mangelnde <b>reaktive</b> Manöver	Trotz eines drohenden Aufpralls nicht oder zu spät Bremsen / Ausweichen; Auf Vorfahrt bestehen trotz schnell näherkommendem Fahrzeug
2.	Direkte Erzeugung von Kritikalität	falsche oder mangelnde <b>aktive</b> Manöver	Spurwechsel ohne Blinker, Einfahren in Einbahnstraße, Einfahren in Sicherheitsabstand beim Spurwechsel bei deutlich kleinerer Geschwindigkeit
3.	Erzeugung von potentieller Kritikalität	falsche oder mangelnde <b>pro-aktive</b> / vorrausschauendes Fahren	An der Autobahnauffahrt keine Lücke lassen, nicht rechtzeitig Geschwindigkeit verringern vor Stauenden

Tabelle 2: Unterkategorien für Vermeidung von Kritikalität

Ziel könnte es für die Freigabe eines HAD-Systems daher sein, die Rechtmäßigkeit eines gewählten Manövers tatsächlich messbar zu machen.

Um den Sachverhalt besser zu verstehen wurde eine einfache aber typische Autobahn-Situation erstellt, welche zeitlich bewusst lange vor dem eigentlichen Einschervorgang betrachtet wird (siehe Abbildung 1). Dabei soll keine, im juristischen Sinne, korrekte Einschätzung abgegeben werden, sondern lediglich Thematiken am Beispiel erläutert werden.

Angangssituation: Bei  $t_0$  nähert sich das rote Fahrzeug mit höherer Geschwindigkeit als die, mit der das blaue Fahrzeug auf der linken Spur fährt. Das blaue Fahrzeug nähert sich einem deutlich langsameren LKW auf der rechten Spur, d.h. mit einem baldigen Ausscheren zwecks Überholung ist zu rechnen. (Der LKW ist der Einfachheit halber immer der Koordinaten-Ursprung)

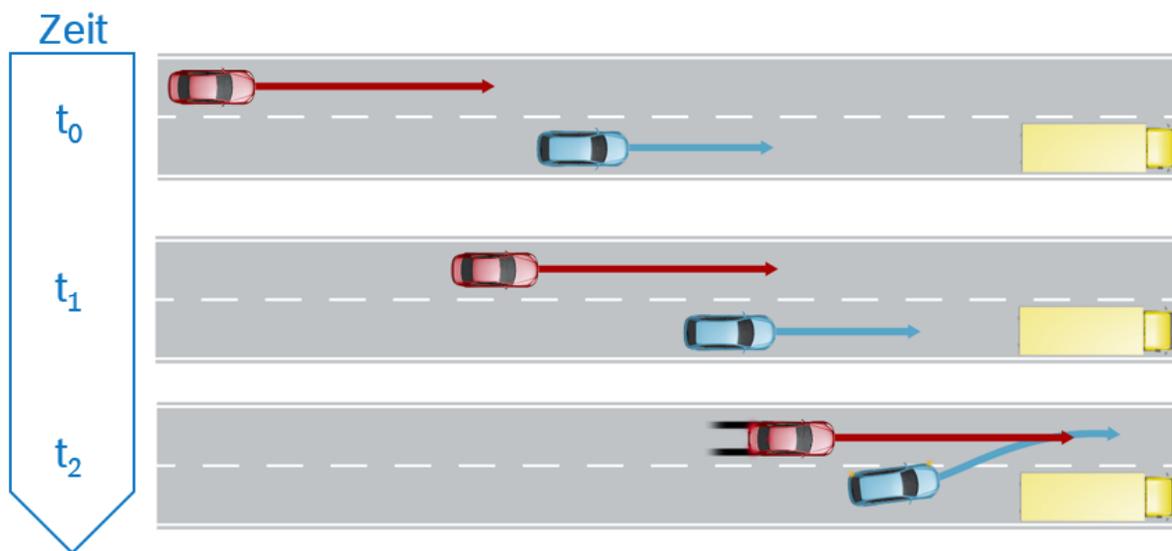


Abbildung 1: Beispiel für kritisches Einschermanöver

- $t_0$ : **pro-aktives** Verhalten
  - Das rote Fahrzeug könnte
    1. Etwas langsamer werden um das blaue Fahrzeug noch hereinzulassen
    2. Etwas schneller werden (sofern erlaubt) um das blaue Fahrzeug noch zu überholen bevor dieses ausschert.
  - Das blaue Fahrzeug könnte
    1. Etwas langsamer werden um das rote Fahrzeug noch durchzulassen
    2. Etwas schneller werden um den LKW noch zu überholen das rote Fahrzeug den Bereich erreicht
    3. Sehr frühzeitig blinken, um die Intention zu Überholen eindeutig zu machen.
    4. Direkt auf die linke Spur ausscheren um das Recht auf Überholen des LKW sozusagen „frühzeitig zu reservieren“.

Über die Rechtmäßigkeit der Manöver soll zunächst nicht entschieden werden, vielmehr wird betrachtet, dass jedes der pro-aktiven Manöver die im Bild dargestellte, zum Zeitpunkt  $t_2$  eintretende, kritische Situation abwenden könnte. Bei einigen „Manövern“ steht sogar nicht das Manöver selbst, sondern die klare Darstellung der eigenen Intention im Vordergrund. Grund ist, dass sowohl das blaue als auch das rote Fahrzeug ihre Entscheidungen auf Basis von **Prädiktionen** bzw. Vorhersagen des Verhaltens des jeweils anderen treffen. Daher ist es nicht direkt möglich zu sagen welches Verhalten das richtige wäre. Insbesondere könnten sich beide Fahrzeuge z.B. entscheiden die Geschwindigkeit zu verringern, was dann unter Umständen die kritische Situation nicht abwenden würde. Betrachten wir den nächsten Zeitschritt:

- $t_1$ : **aktives** Verhalten
  - Das rote Fahrzeug
    1. Darf weiterfahren, wenn das blaue Fahrzeug keine Überholintention anzeigt.
    2. Muss verlangsamen, wenn der Ausschervorgang rechtzeitig und deutlich Ankündigung wurde (durch Blinken des blauen Fahrzeugs).
  - Das blaue Fahrzeug
    1. Darf überholen, wenn es dem roten Fahrzeug die Vorfahrt nicht nehmen würde und den Ausschervorgang rechtzeitig und deutlich ankündigt.
    2. Muss den Überholvorgang zurückhalten und verlangsamen, wenn es dem roten Fahrzeug die Vorfahrt nehmen würde.

Im Gegensatz zu  $t_0$  ist es zum Zeitpunkt  $t_1$  deutlich klarer, welche Optionen richtig sind, auch wenn gewisse Parameter nicht ganz klar definiert sind. Z.B. ab welchem Zeitpunkt wäre der Überholvorgang durch das blaue Fahrzeug zu spät, also nicht rechtzeitig angezeigt gewesen?

- $t_2$ : **aktives** und **reaktives** Verhalten
  - Das rote Fahrzeug
    1. Muss **reaktiv** bremsen, wenn der Ausschervorgang plötzlich ohne rechtzeitige und deutliche Ankündigung durch blinken erfolgt.
  - Das blaue Fahrzeug
    1. Dürfe nicht **aktiv** ausscheren, erzeugt durch sein Fehlverhalten aber die im Bild dargestellte Kritikalität.

Im Gegensatz zu  $t_1$  ist es zum Zeitpunkt  $t_2$  noch eindeutiger welche Verhaltensweisen korrekt wären und welche nicht. Insbesondere das rote Fahrzeug hat nur eine klare Option.

Das Beispiel zeigt einen wichtigen Aspekt in der Überlegung auf, das Vorhandensein von Handlungs-Optionen. Grundsätzlich gilt: Wenn wenige oder gar nur eine Option zur Verfügung stehen und dies so auch klar bewertbar ist, kann man ein aktives oder reaktives Verhalten einfach bewerten (Das rote Fahrzeug zum Zeitpunkt  $t_2$  muss bremsen). Ein mögliches Bewertungskriterium insbesondere für pro-aktive Manöver könnte daher sein, wie viele und welche Handlungsoptionen danach möglich sind. Pro-aktives Verhalten eindeutig zu bewerten dürfte aus den weiter oben genannten Gründen dennoch sehr schwierig sein. Das aktive und reaktive Verhalten ist leichter zu erfassen und zu bewerten. Allerdings verlangt es auch hier Maße, die evtl. aus Gerichtsurteilen abgeleitet werden können, z.B.: Ab wann ist der Blinker zu spät gesetzt?

Auf dieser Basis ist eine Art Metrik für Kausalität denkbar, d.h. eine Metrik die beschreibt, ob das pro-aktive, aktive und reaktive Verhalten des HAF zur Entstehung von Kritikalität oder zu deren zu geringer Minderung beigetragen hat. Dazu müsste noch bewertet werden ob Handlungsalternativen, welche die Kritikalität reduziert hätten, maßgeblich die eigenen Interessen und Rechte des HAF übergebühlich eingeschränkt hätte.

Daraus lässt sich ein möglicher Prüfprozess für Situationen oder Fälle konstruieren, in denen sich die HAF Funktion befunden hat (in Realität oder in der Simulation).

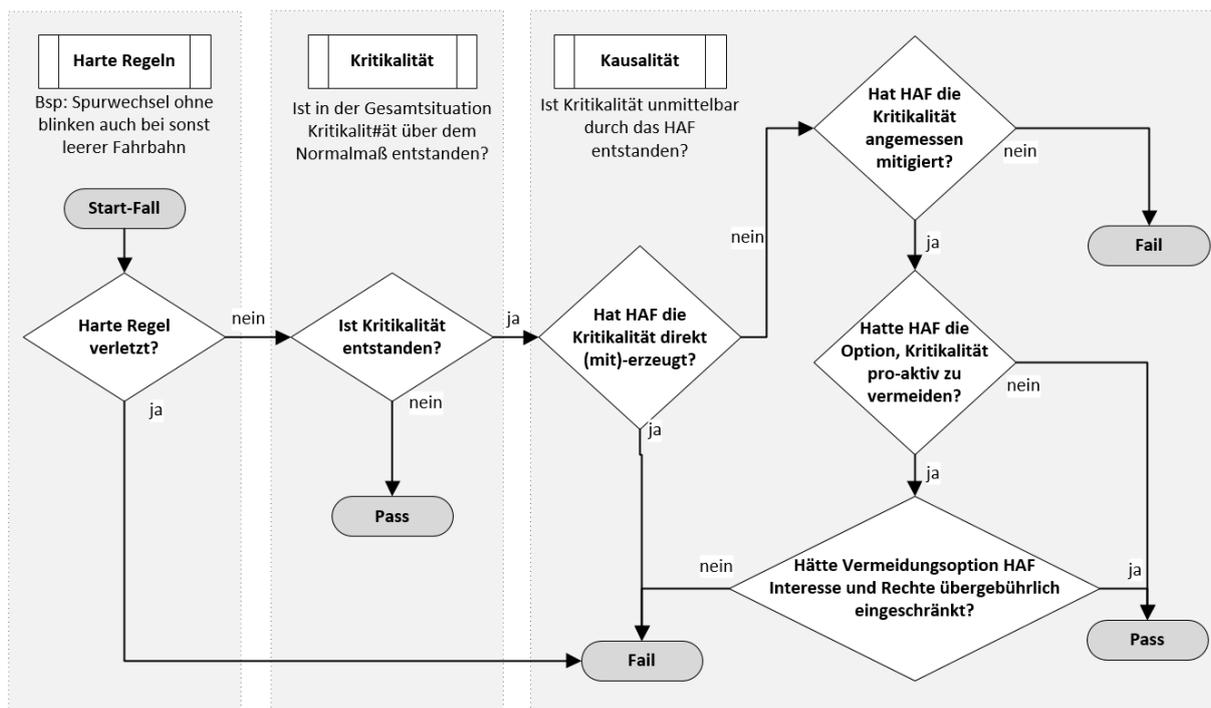


Abbildung 2: Möglicher Entscheidungsablauf bei Prüfung iener HAF auf verkehrskonformes Verhalten

Um die Bewertung einer Kausalität besser zu verstehen wurde ein zweites, komplexeres Beispiel ausgewählt und betrachtet (siehe Abbildung 3).

Ausgangslage für das Beispiel ist

- Ein Fahrzeug, dass den Sicherheitsabstand unterschreitet ( $t_1$ , rechte Spur hinten)
- Ein Fahrzeug, das einen Spurwechsel in den Sicherheitsabstand eines anderen Fahrzeugs durchführt ( $t_2$ , linke spur Mitte)

Hierbei wurde versucht (siehe Abbildung 3 rechts von den Grafiken)

- a) Die Manöver in kritisch / potentiell kritisch zu aufzuteilen
- b) Die Möglichkeiten für Alternativmanöver zu bewerten

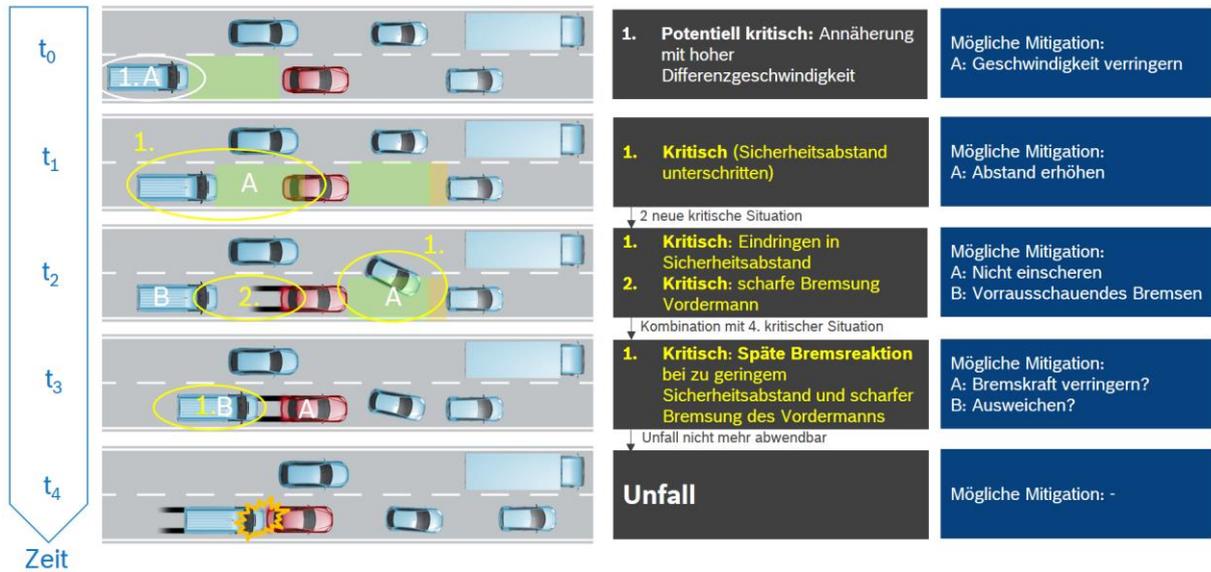
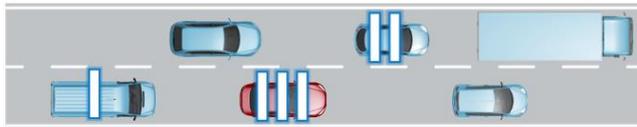


Abbildung 3: Komplexeres Beispiel für Bewertung von verkehrskonformem Verhalten

Anhand des Beispiels wurde exemplarisch versucht, eine Kausalitätsbewertung nach dem Ablaufdiagramm oben durchzuführen und zwar für die folgenden drei Fahrzeuge:



Fahrzeug	Zeitpunkt in REF	Kritische Manöver	Alternativmanöver	Einschränkung durch Alternativmanöver	Bewertung Kausalität
I	$t_0$	<b>Potenziell kritisch:</b> Annäherung mit hoher Differenzgeschwindigkeit	Stärkeres Verzögern während Annäherung	Wahrscheinlich keine	Solange Sicherheitsabstand eingehalten ist, erlaubt, keine Kausalität bei I
	$t_1$	<b>Kritisch (Sicherheitsabstand unterschritten)</b>	Verzögern und Abstand wiederherstellen	Wahrscheinlich keine	Pflichtverletzung → Kausalität bei I
	$t_3$	<b>Kritisch: Späte Bremsreaktion</b>	Frühere Bremsreaktion, Ausweichen	Vorhanden aber gerechtfertigt, für Ausweichen kaum pauschal bewertbar	Teilweise Kausalität bei I, späte Reaktion könnte vertretbare Ursachen haben

Fahrzeug	Zeitpunkt in REF	Kritische Manöver	Alternativmanöver	Einschränkung durch Alternativmanöver	Bewertung Kausalität
II	t <sub>3</sub>	<b>Kritisch:</b> Eindringen in Sicherheitsabstand	Nicht einscheren	Ja, aber dem Sicherheitsziel untergeordnet	Kausalität bei II, abhängig von Ankündigung (blinken)
III		<b>Kritisch:</b> scharfe Bremsung	Keine, Ausweichen nicht gerechtfertigt	Ja, aber dem Sicherheitsziel untergeordnet	Keine Kausalität bei III

Tabelle 3: Bewertung des komplexen Beispiels für Bewertung der Verkehrsregelkonformität

In dieser vorläufigen Analyse, läge die kausale Ursache für den Unfall also im Verhalten von Fahrzeug I+II. Wäre Fahrzeug II in diesem Fall ein Testfahrzeug mit HAF, könnte dieser Testfall auf Basis der hier dargestellten Bewertung als „bestanden“ gewertet werden.

Der hier dargelegte Ansatz wurde zum Teil im TP1 präsentiert. Dort entschied man sich gegen eine Weiterverfolgung aufgrund der geringen verbleibenden Zeit im Projekt. Es wurde im Projekt beschlossen, dass eine solche Kausalitätsmetrik nicht zur Projektlaufzeit erarbeitet werden kann (Nachfolge-Projekte sollten diesen Faden aufnehmen).

Der Ansatz der Kausalitätsprüfung wurde im TP 1 weiterverarbeitet.

### 2.1.3 Abweichungen zur ursprünglichen BOSCH-spezifischen Aufgabenstellung in TP 1

Die in UAP 1.2.3 angestrebte Sensitivitätsanalyse, bzw. die Festlegung der Parameter, die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variiert werden konnte so nicht durchgeführt werden, da sie auf einem einheitlichen Sicherheitsmaß beruht hätte, dass so nicht gefunden werden konnte. Dafür wurde mehr Zeit in die Suche nach neuen möglichen Sicherheitsmaßen investiert (siehe dazu 2.1.2)

## 2.2 TP 2: Umsetzungsprozesse

### 2.2.1 Prozessanalyse bisheriger Prozesse (UAP 2.1.1)

Die Prozessanalyse zielt auf die Identifikation von Lücken in Entwicklungsprozessen vorrangig der ISO 26262 sowie ISO/PAS 21448 (SOTIF), mit dem Ziel, die Eignung dieser Prozesse für die Entwicklung eines HAD Systems zu hinterfragen. Neben dieser Betrachtung wird auch auf das Zusammenspiel beider Prozesse eingegangen, so dass mögliche Synergien mit der Pegasus Testmethodik herausgestellt werden können. Folglich sollen dabei Entwicklungsschritte identifiziert werden, die von einer Szenario-Datenbank profitieren können oder aber die Unzulänglichkeiten in dieser Datenbank aufzeigen.

Aus der normativen Fokussierung beider Standards lässt sich deren komplementärer Charakter ableiten, so dass sich nicht die Frage stellt, ob beide Prozesse benötigt werden, sondern vielmehr, wie diese voneinander abhängen. Um dieser Frage nachzugehen, wird auf deren

Geltungsbereich verwiesen, der im Falle der ISO 26262 auf E/E Systeme abzielt, aber ohne dabei Ansprüche bezüglich deren nominaler Performance zu erheben. An dieser Stelle wird der ISO/PAS 21448 wirksam und definiert normative Vorgaben zum Design, wobei die ISO 26262 die Implementierung dieses Designs im Fokus hat. Folglich darf geschlussfolgert werden, dass das Zusammenspiel beider Standards für die Entwicklung eines HAD Systems essenziell ist. Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Betrachtung sowie potentiellen Lücken ist zu berücksichtigen, dass SOTIF prinzipiell für HAD Systeme eingesetzt werden kann, aber initial für SAE L2 Systeme aufgesetzt wurde.

In Kurzform lässt sich das SOTIF Vorgehen wie folgt beschreiben: Ein gegebenes funktionales Design wird auf dessen Risikopotential untersucht. Im Nachgang werden mögliche Auslöser für diese Risiken in Form von Triggering Events/Conditions identifiziert, welche eintreten müssen, damit das betrachtete HAD System eine funktionale Insuffizienz und damit ein gewisses Risiko aufzeigt. Diesen Zusammenhang gilt es dann zu verifizieren und zu validieren, so dass Änderungen am funktionalen Design auf Grundlage einer Risikoabschätzung gefordert werden können.

Da dieses Vorgehen auf die Kenntnis über das funktionale Design aufsetzt, liefert SOTIF eine Vorstrukturierung von Aspekten, die es im Rahmen der Item-Definition zu berücksichtigen gilt. Auf Basis dieser Definition ist dann das Risiko zu identifizieren, dass prinzipiell mit der beschriebenen Funktionalität einhergeht. Im Gegensatz zur ISO 26262 wird im Rahmen der SOTIF Risikoidentifikation zunächst auf eine Einbeziehung der Exponiertheit (Exposure) zu Gunsten einer homogenen Betrachtung von funktionalen Situationen verzichtet. Somit wird normativ geregelt, dass seltene aber dennoch mögliche Situationen nicht als unterrepräsentiert klassifiziert werden können und somit aufgrund des geringeren Risikos nicht betrachtet wird. Die normative Regulierung dieses Aspektes ist erforderlich, damit Anforderungen bezüglich der nominalen Performance eines HAD System nicht aufgrund von seltenen Situationen herabgesetzt werden können. In diesem Zusammenhang gilt anzumerken, dass ein HAD System die designte Funktionalität unabhängig von der Häufigkeit einer Situation gewährleisten muss. In Folge dieser Regulierung ist auch sichergestellt, dass frequente Situationen bei der Identifikation von triggering events/conditions nicht dominieren. Die Tragweite dieser Regulierung wird in Anbetracht des Zusammenspiels zwischen Triggering events/conditions und der nachfolgenden V&V Aktivitäten umso deutlicher. Denn der Vorrang von gewissen Situationen, hätte zur Folge, dass funktionale Unzulänglichkeiten eines HAD Systems erst sehr spät oder möglicherweise gar nicht aufgedeckt werden würden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die normativen Vorgaben des SOTIF konsistent sowie problemorientiert sind und mögliche Lücken vielmehr auf deren individuelle Implementierung zurückzuführen sind, nicht aber auf eine mangelhafte oder lückenbehaftete Vorgabe. Um die Thematik der Implementierung dieser Schritte besser veranschaulichen zu können, werden im Nachfolgenden typische Problematiken beispielhaft erläutert und mögliche Synergien zur Pegasus Methodik skizziert.

Lücken bezüglich der Erfülltheit der normativen Vorgaben können im Rahmen der Identifikation von triggering events/conditions auftreten, welche im Wesentlichen auf mangelnde Systemkenntnis zurückzuführen sind. Diese Probleme sind aber nicht etwa auf Nachlässigkeiten bei der Entwicklung eines HAD Systems zurückzuführen, sondern vielmehr auf die vorherr-

schende Komplexität, die aus hoch-dimensionale Parametersätze kombiniert mit unbekanntem Umwelteinflüssen resultiert. Diese Komplexität erschwert die Erfassung sowie das Verständnis der internen als auch der externen Wirkzusammenhänge. Die internen Wirkzusammenhänge sind komplex zu erfassen, da diese eine zustandsabhängige Propagation von Informationen über Schnittstellen bedingen. Im Vergleich dazu müssen mögliche Einflüsse der Umgebung auf das HAD System für das Verständnis über die externen Wirkzusammenhänge nachvollzogen werden. In Folge dieser Problematiken kann das vorliegende Systemwissen unvollständig sein, mit der Folge, dass die identifizierten triggering events/conditions unvollständig sind. Leider kann auch die Pegasus Methodik nur indirekt beitragen, indem beispielsweise zufällig über den Fundus der Datenbank ein Szenario selektiert oder variiert wird, welches ein unbekanntes triggering event/condition hervorruft und somit zur Identifikation einer behilflich ist eine funktionale Unzulänglichkeit aufzuzeigen.

Ogleich die Pegasus Testmethodik wenig zur Identifikation von triggering events/conditions beitragen kann, umso bedeutender ist der Beitrag der Pegasus Testmethodik, wenn es um die Darstellung und Beschreibung bereits identifizierter triggering events/conditions geht. In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen von Pegasus eine Möglichkeit zur Spezifikation einer Szenerie sowie möglicher Subjekte in Form von Szenarien eingeführt, welche in die normativen Vorgaben von SOTIF aufgenommen wurde.

Egal ob SOTIF oder Pegasus im Fokus der Betrachtung steht, beide unterliegen einem eingeschränkten Wissen über den Systemkontext, mit der möglichen Limitation, dass das Risiko der HAD Funktionalität unterschätzt wird. Diese Limitation ist jedoch nicht auf mangelnde normative Vorgaben zurückzuführen, sondern auf das limitierte Wissen über den Systemkontext. Diese Limitation hat aber nicht nur Implikationen auf das Design, sondern auch auf dessen Implementierung, die im Rahmen der ISO 26262 reguliert wird.

Im Gegensatz zu SOTIF steht bei der ISO 26262 die funktionale Sicherheit von E/E Systemen im Fokus, aber ohne Ansprüche bezüglich deren nominaler Performance zu vertreten. Vielmehr werden durch die ISO 26262 Anforderung für die Entwicklung eines Sicherheitskonzepts zur Vermeidung eines eventuellen Funktionsversagen (malfunctioning behavior) vorgeben, gemäß dem Grundsatz, umso höher das Risiko, desto stringenter müssen Anforderungen umgesetzt werden. Im Konkreten verbirgt sich darunter die Definition des Items, mit dem Ziel, ein mögliches Funktionsversagen systematisch ableiten zu können. Im Anschluss werden diese möglichen Funktionsversagen auf deren Gefahrenpotential hin untersucht und bei Bedarf ein entsprechendes Sicherheitsziel samt Attribut zur Kennzeichnung der benötigten Stringenz definiert. Im Nachgang gilt es ein funktionales sowie technisches Sicherheitskonzept für die Einhaltung und Wahrung dieser Sicherheitsziele zu entwerfen. Die Effektivität dieser Konzeption gilt es abschließend in Form eines Restrisikos auszuweisen, dessen Konfidenz im gewissen Maße mit der durchgesetzten Stringenz, mit der das Sicherheitskonzept entwickelt wurde, korreliert.

Auch wenn die ISO 26262 in Summe zehn Teile mit normativen Vorgaben umfasst, soll im Nachfolgenden ausschließlich die Konzeptphase also der dritte Teil im Fokus stehen, da diese die Entscheidungen des Sicherheitskonzepts strukturiert und damit die Grundlage zur Kapselung des Systemwissens gemäß der Pegasus Testmethodik darstellt. In Analogie zur obigen Darstellung wird mit der Betrachtung der Item Definition begonnen, gefolgt von der Gefahren und Risikoanalyse sowie des Sicherheitskonzeptes.

Das Verständnis über die Funktionalität des Items bildet die Grundlage für die Auslegung eines Sicherheitskonzepts, was im Umkehrschluss bedeutet, dass Nachlässigkeiten bei der Definition des Items zu einem inadäquaten Sicherheitskonzept und somit zu unvermeidbaren Risiken führen. Zur Vermeidung dieser Nachlässigkeiten setzt die ISO 26262 eine hinreichend vollständige Item Definition als Ausgangsbasis für die Konzeptphase voraus. Im Kontext eines HAD Systems steht dieser Vollständigkeitsanspruch im Konflikt mit dem evolvierenden Charakter der offenen Welt und deren nicht-abzählbaren Facetten, welche Implikation auf die Funktionserbringung eines HAD Systems haben können.

Zur Entschärfung dieses Konfliktes und zur Wahrung der Voraussetzung für die Anwendbarkeit der ISO 26262 wurde der SOTIF komplementär mit dem Anspruch aufgesetzt, das Systemverständnis zu schärfen und damit einen aktiven Beitrag zur Vervollständigung der Item Definition zu leisten. Weitere Beiträge lassen sich beispielsweise über die Verwendung von User Stories supplementiert durch hierarchische Relation in Form von einer Ontologie erbringen.

Die Empfehlung zur Verwendung von User Stories ist auf deren Fokussierung auf abstrakte Interaktionen zurückzuführen, so dass zum einen unnötige Details gekapselt werden können und diese zum anderen den Startpunkt für Erweiterungen als Mittel zur Komplexitätsreduktion dienen können. Zur Darstellung dieser abstrakten Interaktionen eignet sich der Einsatz einer Ontologie, da diese bekannten Interaktionen auf noch unbekannte Zusammenhänge projizieren kann und somit einen aktiven Beitrag zur Vervollständigung der Item Definition leisten kann. Je nach Problemstellung können weiterführende Individualisierungen erforderlich sein, was einen gewissen deskriptiven aber keinen normativen Charakter impliziert. Folglich sind diese Ansätze als weiterführende Empfehlungen zu verstehen, um die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der ISO 26262 sicherstellen können.

Ausgehend von dieser Item Definition sind mögliche Funktionsversagen zu abzuleiten und zu analysieren, so dass das zugehörige Gefahrenpotential identifiziert werden kann. Da gewisse Gefahren möglicherweise ohne Gefährdungen einhergehen, währenddessen andere Gefahren stark risikobehaftet sein können, sieht die ISO 26262 die Konzeption der Betriebssituationen („operational situation“) vor. Diese beschreiben Situationen in denen das Item betrieben werden kann, so dass auf Basis dieser Situationen die Gefährdungen für die möglichen Funktionsversagen ermittelt werden kann. Da die ISO 26262 die Stringenz zur Entwicklung eines Sicherheitskonzepts an das Risiko im Falle eines Funktionsversagens koppelt, wird das Risiko in Form von 5 Kategorien ausgewiesen. Die schwächste Kategorie bedingt lediglich Maßnahmen zum Qualitätsmanagement, währenddessen die verbleibenden vier Kategorien einen Integritätslevel zur Entwicklung des Sicherheitskonzeptes implizieren. Zur Einhaltung und Durchsetzung dieser Integrität gilt es zunächst ein Sicherheitsziel zur Vermeidung eines Funktionsversages zu definieren, welches dann mit dem entsprechenden Integritätslevel als Grundlage für die Einwicklung eines Sicherheitskonzeptes attribuiert wird.

Die Ableitung dieser Sicherheitsziele samt deren Integritätslevel birgt im Kontext der Entwicklung eines HAD Systems die Gefahr, dass Gefährdungen unterschätzt werden. Ein Anlass dafür kann eine mangelnde Objektivierung der Relation zwischen einer Gefahr und der zugehörigen Gefährdung. Zudem kann die Komplexität infolge kombinierter Betriebssituationen zu einer Unterschätzung des Gefährdungspotentials führen. Um gezielt nach kombinierten Be-

triebssituationen zu suchen, eignet sich zum einen die Verwendung einer Ontologie als datengetriebene Technik und zum anderen der Einsatz einer Wirkkettenanalyse im Sinne einer wissensgetriebenen Methodik. Darüber hinaus ist darauf hinzuweisen, dass an dieser Stelle das von SOTIF geschärfte Systemwissen komplementierend eingesetzt werden kann. Jedoch sind diese Maßnahmen im Falle einer generellen situativen Unkenntnis nicht wirksam, so dass explorative Maßnahmen zur Reduktion einer Gefährdungsunterschätzung zu definieren sind.

Im nächsten Schritt gilt es ein funktionales Sicherheitskonzept zum Erhalt der Sicherheitsziele zu entwickeln. Dabei wird üblicherweise eine abstrakte Architektur erarbeitet, welche dann auf deren Potentiale zur Verletzung dieser Sicherheitsziele untersucht werden kann. Immer wenn eine mögliche Verletzung der Sicherheitsziele identifiziert wurde, gilt es eine zugehörige funktionale Sicherheitsanforderung für diese Architektur zu definieren. Damit der Erhalt dieser Sicherheitsanforderungen auch das Aufrechterhalten der Sicherheitsziele impliziert, dürfen Sicherheitsziele einander nicht beeinflussen.

Leider ist im Kontext eines HAD Systems diese Beeinflussungsfreiheit von Sicherheitszielen nicht immer gegeben, so dass eine Arbitrierungslogik in Abhängigkeit der Betriebssituationen zu definieren ist. Diese Abhängigkeiten erschweren die Ausgestaltung der funktionalen Architektur im klassischen Sinne, da die Einbeziehung einer solchen Arbitrierungslogik in die Ausgestaltung der abstrakten Architektur eine erhebliche Steigerung der Komplexität mit sich bringt, welche Lücken in den abgeleiteten Sicherheitsanforderung nach sich ziehen kann. Um die gesteigerte Komplexität handhaben zu können, werden Vorschläge postuliert, die auf Techniken wie zum Beispiel Contract-based Design oder Regelgeneralisierungen verweisen. Wie gut diese Techniken jedoch skalieren ist nach gegenwärtigem Stand noch nicht absehbar.

Darüber hinaus gilt anzumerken, dass im Rahmen der Funktionsausgestaltung individuelle Annahmen getroffen werden, welche grundsätzlich kontexteinschränkend wirken und somit die Wirksamkeit des funktionalen Sicherheitskonzepts auf gewisse Betriebssituationen begrenzt. Wird nun das System jenseits dieser Betriebssituationen eingesetzt, dann ist die Wirksamkeit des funktionalen Sicherheitskonzepts nicht länger gewährleistet. Um dediziert nach diesen Betriebssituationen zu suchen, in denen das funktionale Sicherheitskonzept möglicherweise unwirksam ist, schreibt die ISO 26262 sowie der SOTIF das Notieren der getroffenen Annahmen vor. Da das Aufstellen von Annahmen von der individuellen Funktionsausgestaltung abhängt, muss im Rahmen der Standardisierung auf deskriptive Ausführungen zum Notieren von Annahmen verzichtet werden. Auch wenn das Prozessvorgehen im Hinblick auf das Extrahieren von Annahmen geschärft wurde, können implizite Annahmen nicht ausgeschlossen werden. Aber auch wenn Annahmen explizit vorliegen, besteht die Möglichkeit, dass mögliche Lücken in dem Sicherheitskonzept infolge des begrenzten Kontextwissens nicht aufgedeckt werden.

Neben der Thematik der Annahmen kann die Wirksamkeit des Sicherheitskonzepts aufgrund einer unzureichenden Separation zwischen dem funktionalen und dem technischen Sicherheitskonzeptes überschätzt werden. Aus diesem Grunde führt die ISO 26262 eine strikte Trennung dieser Konzeptionen vor, so dass zunächst das funktionale Sicherheitskonzept gefolgt von dem technischen Sicherheitskonzept zu entwickeln ist. Mit diesem Vorgehen lässt sich der Designraum für das Sicherheitskonzept umfassend explorieren, so dass zunächst die Annahmen des funktionalen Sicherheitskonzeptes ausgewiesen werden können und diese im

Nachgang um die Charakteristika des technischen Sicherheitskonzeptes ergänzt werden können.

Abschließend verbleibt die Thematik der Sicherheitsargumentation zu betrachten, die im klassischen Sinne dazu dient, die durchgeführten Maßnahmen mit den normativen Vorgaben in Verbindung zu bringen. Somit lässt sich eine Argumentationskette erstellen, mit dem Ziel, eine Begründung für die Erfüllung der normativen Vorgaben bereitzustellen. Da im Kontext eines HAD System das Wissen über Annahmen, deren Auswirkung und somit der Leistungsfähigkeit sowie Wirksamkeit des Sicherheitskonzeptes limitiert ist, sollten die Argumentationsketten systematisch hinterfragt werden, damit etwaige Wissenslücken identifiziert und im Nachgang geschlossen werden können.

Die obige Erläuterung bezugnehmend auf die ISO 26262 unterstreicht die Konsistenz der normativen Vorgaben, die auch im Kontext eines HAD Systems kohärent sind. Jedoch wurden zahlreiche Ursachen für Wissenslücken angeführt, die das Nichterfüllen der normativen Vorgaben maskieren können. Zusätzlich zu den bereits genannten Techniken soll im Folgenden auf mögliche Synergien mit einer Szenario-Datenbank eingegangen werden. Eine Szenario-Datenbank könnte beispielsweise verwendet werden, um die Abhängigkeiten, wie durch die Item Definition beschrieben, zu prüfen oder aber gegebenenfalls zu komplementieren. Derartige Ergänzungen könnten zu einer umfassenderen Herleitung möglicher Funktionsversagen sowie Bewertung von möglichen Gefährdungen führen. Darüber hinaus lässt sich beispielsweise eine Szenario-Datenbank für die Bewertung der Tragfähigkeit der getroffenen Annahmen heranziehen. Ein weiterer Aspekt wäre die Evaluation der Charakteristika des technischen Sicherheitskonzepts sowie der Prüfung, ob diese Charakteristika relativ zu den betrachteten Betriebssituationen tatsächlich äquivalent sind. In diesem Sinne lässt sich aber auch die Szenario-Datenbank heranziehen, um die Sicherheitsargumentation auf deren Widerspruchsfreiheit zu prüfen.

Es darf die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die ISO 26262 frei von normativen Lücken ist und etwaige Verfehlungen im Wesentlichen auf Wissenslücken zurückzuführen sind. Zur Minimierung dieser Wissenslücken kann der Einsatz einer Szenario-Datenbank nur befürwortet werden, jedoch verspricht der Abgleich mit einer Datenbank nicht das generelle Ausbleiben derartiger Wissenslücken.

### **2.2.2 Limitation des Szenario-basierten Ansatzes (UAP 2.2.3)**

Im Nachfolgenden wird auf das Ergebnis des Arbeitspaketes UAP 2.2.3 fokussiert, welches zum Ziel hatte, mögliche Limitationen der erarbeiteten Pegasus Testmethodik zu identifizieren. Neben der eigentlichen Methodik zur Identifikation von Limitation bedingt diese Aktivität ein tiefgreifendes Verständnis der Methodik als solches sowie deren Änderungen die im Verlaufe des Projektes vorgenommen wurden. Zur Verdeutlichung was unter einer Limitation zu verstehen ist und wie sich dieses Identifizieren lassen, wird zunächst die Pegasus Testmethodik auszugsweise dargestellt.

Die Pegasus Testmethodik sieht vor, dass mit einer Informationserhebung begonnen wird, diese einer Vorverarbeitung unterzogen werden, damit die daraus resultierenden Szenarien in der Datenbank abgelegt werden können und im Nachgang unter Verwendung von Kriterien für das Testen des HAF Systems herangezogen werden können. Für die Etablierung dieser

Testmethodik wurden zwei Zustellungen zugrunde gelegt. Zum einen die Zielstellung, aufzuzeigen, dass das ein HAF System in der Lage ist Situationen zu bewältigen, in denen ein menschlicher Fahrer dazu tendiert, in eine Situation mit nicht unfallfreien Ausgang involviert zu werden. Zum anderen bestanden Bestrebungen, Situationen zu identifizieren und zu benennen, welche für das HAF Systems aufgrund seiner Automatisierung als herausfordernd gelten. Die Art und Weise, wie Pegasus den genannten Zielstellungen entsprochen hat und welche Änderungen an diesen Zielstellungen vorgenommen wurden, wird im Anschluss an die Limitationsbewertung dargestellt.

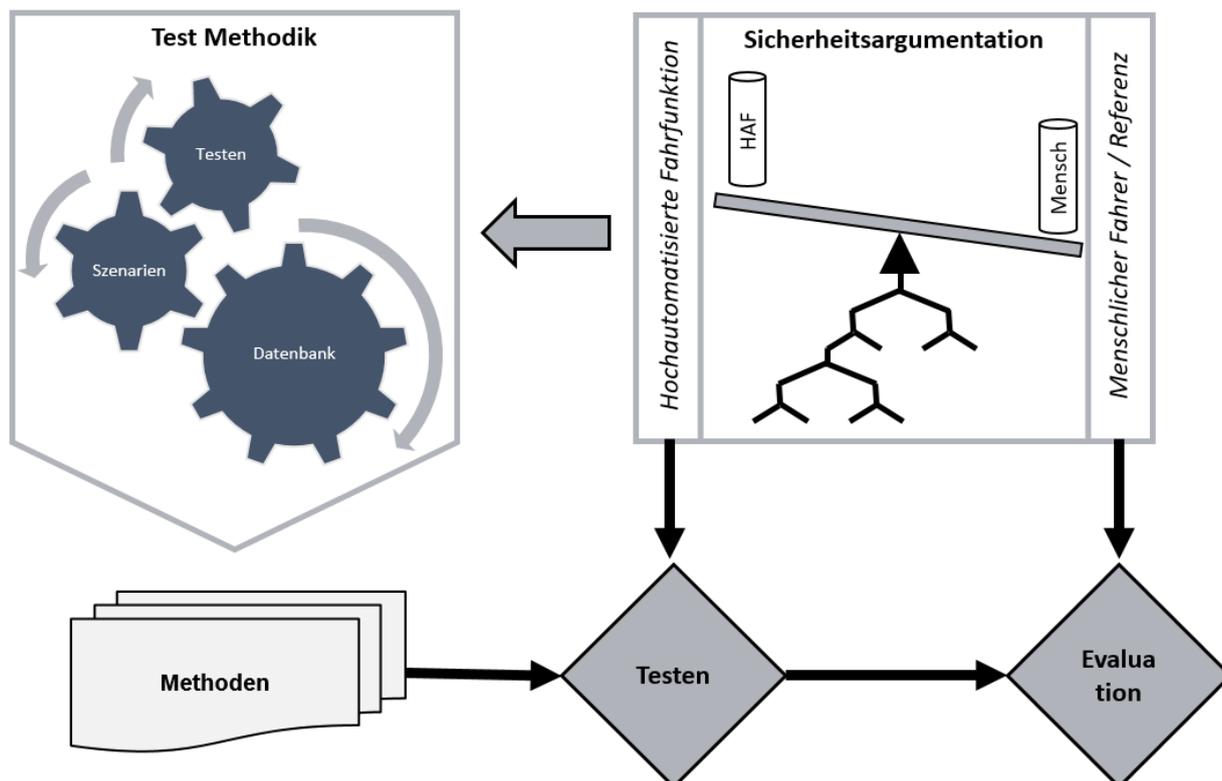


Abbildung 4: Zusammenspiel aus Sicherheitsargumentation, Testmethodik und Methoden

Die obige Darstellung illustriert das Zusammenspiel aus Sicherheitsargumentation, Testmethodik sowie der jeweiligen Methoden, welche zur Befähigung des Szenarien-basierten Testens im Rahmen des Pegasus Projektes entwickelt wurden. Da eine dedizierte Betrachtung der einzelnen Methoden sehr umfangreich wäre, soll zum Zwecke einer Einführung und Motivation des Limitationsthemas die folgende Gruppierung von Methoden genügen: Informationsakquise, Vorverarbeitung, Datenbank, Selektion, Testen und Evaluation. Die Testmethodik beschreibt die Art und Weise sowie die Reihenfolge wie diese Methoden einzusetzen sind, um den oben aufgeführten Zielen zu entsprechen. Mit anderen Worten beschreiben die Methoden, „was“ einen Beitrag zum Szenarien-basierten Testen leistet, und die Testmethodik beantwortet das zugehörige „wie“.

Um anzugeben, dass die Inhalte der Testmethodik zweckdienlich und zielführend sind, wurde die Erstellung einer zugehörigen Sicherheitsargumentation vorgeschlagen. Diese Sicherheitsargumentation führt zu einem Gründe für die Notwendigkeit einer Aktivität an und zum ande-

ren werden Argumente angeführt, warum die gewählte Vorgehensweise diesen Gründen entsprechen kann. An dieser Stelle tritt aufgrund des Neuheitsgrades dieser Thematik das Missverständnis auf, dass Angenommen wird, die Sicherheitsargumentation würde die Sicherheit des getesteten HAF Systems argumentieren. Aber genau das ist nicht der Fall, denn die hier thematisierte Sicherheitsargumentation führt Argumente an, warum wir glauben, dass die entwickelte Methodik für einen Sicherheitsnachweis eines HAD System in Kontext der Autobahn geeignet ist.

Um dieses Missverständnis zwischen den Partnern auszuräumen, wurden die geführten Diskussionen im Rahmen von Telefonkonferenzen oder Präsenztreffen berichtigt. Darüber hinaus wurde mittels Vorträgen sowie Meilensteinberichten zu einem korrekten Verständnis dieser Thematik beigetragen.

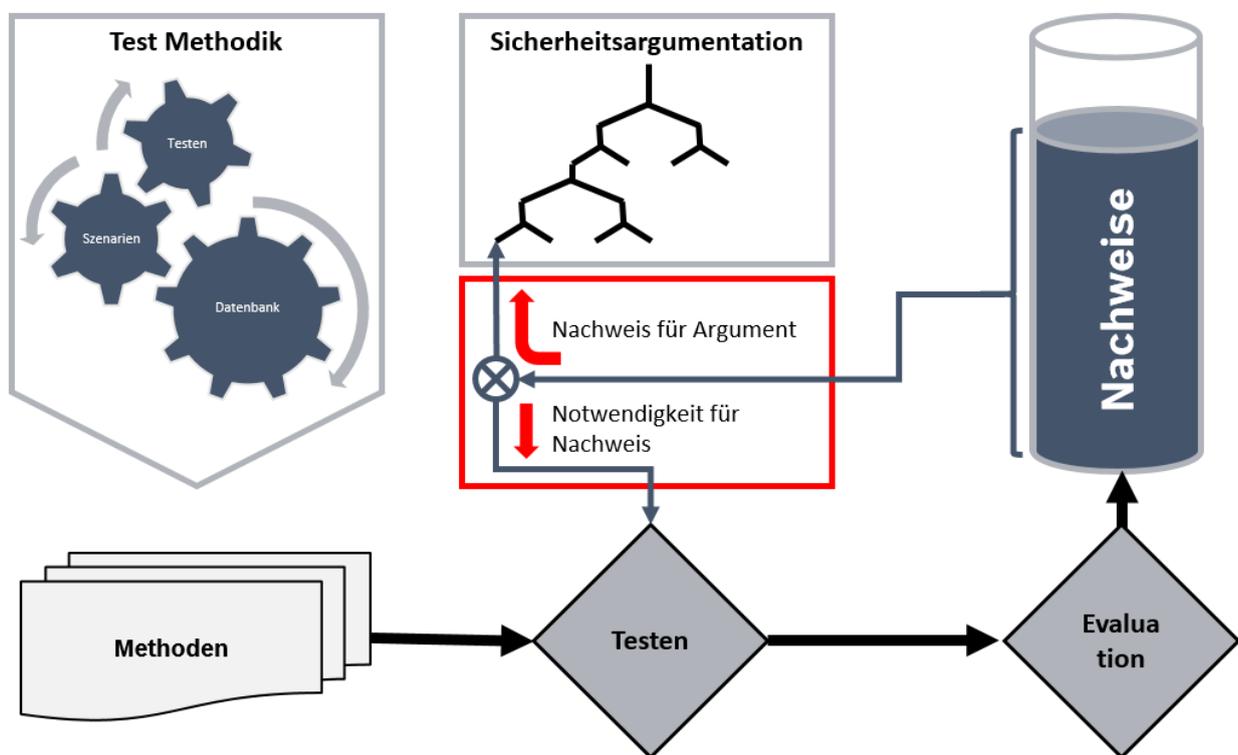


Abbildung 5: Notwendigkeit des Testens zur Erbringung von Nachweisen, welche die Gültigkeit der Sicherheitsargumentation

Die obige Abbildung visualisiert die Notwendigkeit des Testens zur Erbringung von Nachweisen, welche die Gültigkeit der Sicherheitsargumentation belegen. In dieser Darstellung wurden die Anknüpfungspunkte zwischen der Sicherheitsargumentation und dem Testen sowie der Rückfluss über die Nachweise rot eingefärbt, da diese, wie nachfolgend aufgelistet, als mögliche Quelle für eine Limitation der Testmethodik in Frage kommt.

1. Die eingesetzten Methoden weisen nicht die Leistungsfähigkeit auf, die erforderlich wäre, um einen Nachweis für die erstellte Sicherheitsargumentation erbringen zu können. Dieser Punkt bezieht sich auf den nach oben gerichteten Pfeil, welcher den Nachweis für das Argument illustriert.
2. Die Sicherheitsargumentation enthält Lücken, welche vorrangig auf Unkenntnis oder limitiertes Wissen über die Domäne sowie des HAF Systems zurückzuführen sind und somit die Testmethodik nicht veranlasst entsprechende Methoden zum Testen des

HAF Systems einzusetzen. Dieser Punkt bezieht sich auf den nach unten gerichteten Pfeil, welcher die Notwendigkeit für einen Nachweis darstellt.

Natürlich sind beide Probleme thematisch miteinander korreliert, denn eine kohärente Argumentation kann den Bedarf für Methoden aufzeigen, welche so nicht verfügbar sind oder existieren. In Folge der Schließung von Lücken würde sich die eingeschränkte Leistungsfähigkeit der bestehenden Methoden offenbaren, was den Zusammenhang zwischen den obigen Limitationen aufzeigt.

Diese Relation impliziert gesteigerte Aufwände bei der Analyse von Limitation, da Erkenntnisse bezüglich einer Problematik auf die andere Problematik rückgespiegelt werden müssen, um die Kohärenz der Limitationsaussage gewährleisten zu können. Zusätzliche Aufwände ergaben sich durch fortwährende Änderungen der Testmethodik, welche zum einen in der Natur eines Forschungsprojektes inbegriffen sind und zum anderen zwingend notwendig sind, um den aktuellsten Stand der Methodik zu bewerten und diese Erkenntnisse an das Projekt zurückzumelden.

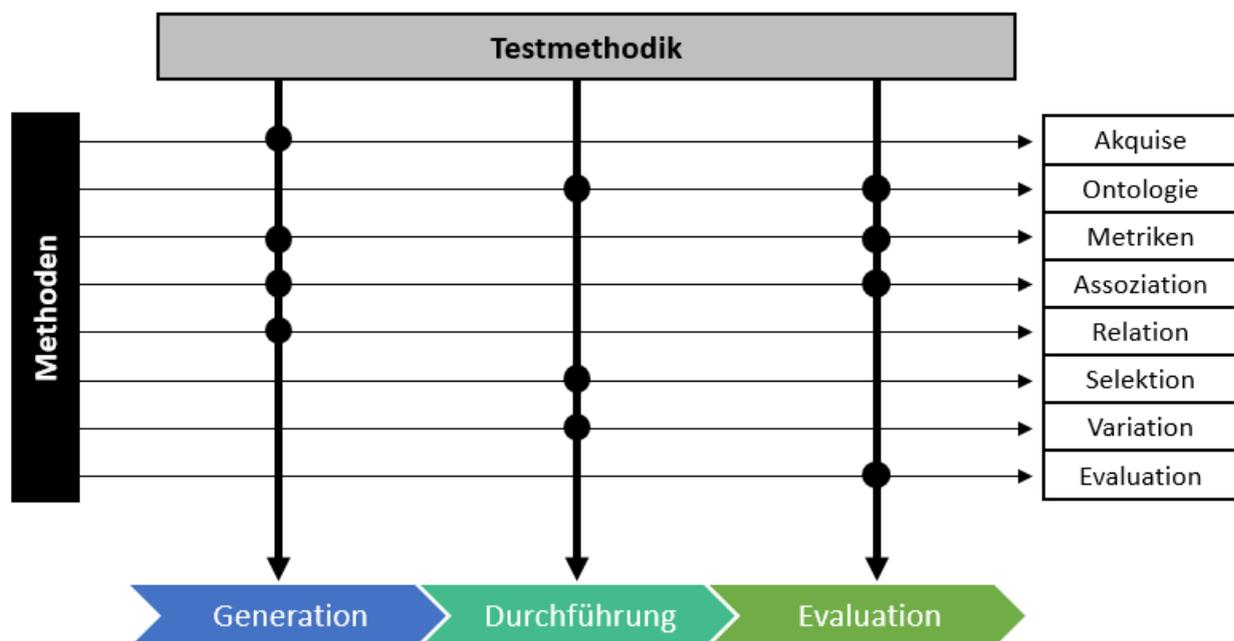


Abbildung 6: Methoden als Befähigung für das szenariobasierte Testen

Nachdem geklärt ist, was als Limitation gilt, wird im Nachfolgenden die Begriffsbildung weiter geschärft, mit dem Ziel, ein systematisches Vorgehen zur Identifikation von Limitationen ableiten zu können. Diese Schärfung bedingt eine detaillierte Betrachtung der Relation zwischen der Testmethodik und den Methoden. Wie nachfolgend dargestellt, sind die Methoden als Befähigung für das Szenarien-basierte Testen (unten Prozess bestehend aus Generation, Durchführung und Evaluation dargestellt) zu verstehen. Um genau das zu ermöglichen, definiert die Testmethodik das Zusammenwirken der einzelnen Methoden.

Wie in der Abbildung in Form einer kreisförmigen Verknüpfung dargestellt, tragen die Akquise, Metriken sowie die Klassifikation zur Generation von Szenarien bei. Die Aufgabe der Testmethodik ist es, festzulegen, welche akquirierten Informationen mittels spezieller Metriken bewertet und im Anschluss klassifiziert werden. Zur Durchführung von Szenario-basierten Tests,

ist gemäß der Pegasus Testmethodik das Zusammenspiel aus Ontologie, Selektion und Variation vorgesehen. Zur Evaluation der durchgeführten Tests werden sowohl Evaluationskriterien verwendet als auch die Attribute der Szenarien bereitgestellten mittels Ontologie, Kritikalitätsmetriken sowie der funktionalen Assoziation konsultiert.

In Anbetracht dieser Allokation von Methoden ist, für die Ableitung einer Vorgehensweise zur Limitationsbewertung, die Art und Weise darzustellen, worauf die Anwendbarkeit dieser Methoden beruht. Grundlegend lassen sich die Abhängigkeiten in Form von Annahmen auffassen, welche erfüllt sein müssen, damit die allokierte Methode den intendierten Beitrag gemäß der Testmethodik zum Szenarien-basierten Testen liefern kann. Im Nachfolgenden ist der beschriebene Zusammenhang in Blockdarstellung visualisiert.



Abbildung 7: Zusammenhang von Methoden, Annahmen und Argumenten

Dieser Darstellung lässt sich entnehmen, dass der methodische Leitungsumfang maßgeblich von den getroffenen Annahmen abhängt, welche einen indirekten Einfluss auf die erbrachten Nachweise haben. Sobald diese Nachweise genutzt werden, um ein Argument zu stützen, wirken die getroffenen Annahmen auf das resultierende Argument einschränkend. Da aus beiden Relationen (Annahmen -> Methoden, Annahmen -> Argument) eine mögliche Limitation resultieren kann, sind im Nachfolgenden diese Relationen detaillierter zu betrachten, damit zum einen ein systematischer Prozess zu deren Identifikation sowie geeignete Bewertungskriterien definiert werden können.

Die erste Relation (Annahmen -> Methoden) resultiert aus den Annahmen die im Rahmen der Testmethodik getroffen wurden und auf Basis derer die jeweilige Methode zu operationalisieren ist. Folglich lässt sich über diesen Zusammenhang die Effizienz einer Methode identifizieren und zudem die theoretische Belastbarkeit der resultierenden Nachweise angeben. Durch die Art und Weise, wie die jeweilige Methode im Rahmen der Testmethodik verwendet wird, können die tatsächlich erbrachten Nachweise unter dem theoretischen Maximalwert liegen. Wenn darauf verzichtet wird, Nachweise zu erbringen, obwohl diese erbringbar wären, wird die obige Definition einer Limitation um den Zusatz einer methodischen Limitation erweitert. Mit anderen Worten sollte immer dann eine Attribuierung des Limitationsbegriffes erfolgen, wenn die vorhandenen Methoden nicht ausgeschöpft werden, so dass eine Limitation auszuweisen ist, welche maßgeblich auf die gewählte Implementierung der Testmethodik des Szenarien-basierten Testens zurückzuführen ist.

Zusätzliche Limitationen können auf Annahmen zurückzuführen sein, die zueinander in Konflikt stehen. Derartige Konflikte resultieren daraus, dass die Art und Weise, wie die Testme-

thodik die Kombination einzelner Methoden vorsieht, zu einem Konflikt der getroffenen Annahmen führt. Auch wenn diese Konflikte auf eine Verfehlung der Testmethodik zurückzuführen ist, muss erwähnt werden, dass sich eine Testmethodik aus mehreren Argumenten zusammensetzt und so die vorherrschende Komplexität die eigentliche Ursache für die Konflikte sind. Zudem darf nicht unerwähnt bleiben, dass mit jeder Methode zusätzliche Annahmen einhergehen, welche ebenfalls ein Konfliktpotential darstellen. Im Rahmen der Limitationsbewertung gilt es eine Methodik sowie ein generisches Maß zu finden, welches in der Lage ist, die zuvor genannten Einflussfaktoren gleichermaßen abzubilden. Für die Einordnung der benannten Aktivitäten ist anzumerken, dass das Wissen für die Identifikation von Konflikten zwischen Annahmen als gegeben gilt. Im Nachfolgenden wird der Fall von unbekanntem Konflikt betrachtet.

Die zweite Relation (Annahmen -> Argumentation) ist von Bedeutung, da jede getroffene Annahme nur in einem gewissen Kontext gültig ist und somit die Tragweite der resultierenden Argumentation einschränkt. Um diese Darstellung zu komplettieren, ist darauf hinzuweisen, dass Nachweise unter Anwendung von Methoden erbracht werden, welche wiederum von Annahmen implizieren. Diese Annahmen sind bei der Verwendung der Nachweise zwingend zu berücksichtigen, da andernfalls die Nachweise auf eine ungültige oder unzulässige Aussage/Kontext verallgemeinert werden. Da derartige Verallgemeinerungen ebenfalls als Limitation der Testmethodik gelten, ist eine Vorgehensweise zu entwickeln, wie Indizien für eine mögliche Kontexteinschränkung identifiziert werden können. Der Grund warum hier von Indizien gesprochen wird, ist durch die Unbekanntheit des Kontextes als auch der Annahmen zurückzuführen.

### **2.2.2.1 Vorgehen**

Um eine Limitation bezüglich der beiden Relationen (Annahmen -> Methode, Annahmen -> Argument) identifizieren zu können, wurde der nachfolgende Prozess entwickelt.

1. Schritt: Analyse der Testmethodik – stellt die Grundlage für die Limitationsbewertung dar
  - Argumente sowie deren Verkettung identifizieren
  - Annahmen notieren, die zur Komposition der Argumente herangezogen wurden
  - Methodische Elemente identifizieren
  - Abhängigkeiten der methodischen Elemente gemäß den verketteten Argumenten identifizieren
2. Schritt: Analyse und Bewertung der Methoden – adressiert die erste Relation (Annahme -> Methode)
  - Bewertung jeder Methode für jede der im ersten Schritt identifizierten Argumentation
  - Annahmen notieren, die von der jeweiligen Methode zugrunde gelegt werden
3. Schritt: Analyse der Argumentation – adressiert die zweite Relation (Annahmen -> Argument)
  - Konflikte zwischen Annahmen identifizieren
  - Propagation von Limitationen identifizieren
  - Bewertung des Einflusses von Limitationen auf die Gesamtaussage

### 2.2.2.2 Bewertungskriterien

Zur Anwendung dieses Vorgehens werden, wie im zweiten und dritten Schritt gefordert, Bewertungskriterien benötigt, die die Art der identifizierten Limitation den hergeleiteten Relationen zuordnet. Für die Bewertung einer potentiellen Limitation werden die nachstehend definierten Kriterien herangezogen.

- „Assumption Coverage“ beschreibt die Abdeckung von Annahmen relativ zur Intention der Testmethodik, so dass der Grad angegeben werden kann, zu dem eine konkrete Methode unter den Annahmen der Testmethodik operationalisiert werden kann. Folglich gibt die „Assumption Coverage“ die Effizienz einer konkreten Methode im Rahmenwerk einer Testmethodik an.
- „Unused Evidence“ benennt die Nachweise, die relativ zur Assumption Coverage als ungenutzt verbleiben. Mit anderen Worten, deutet die „Unused Evidence“ auf Nachweise hin, die unter fortwährender Verwendung der Methoden hätten erbracht werden können, aber aufgrund der Auslegung der Testmethodik darauf die Erbringung eben dieser Nachweise verzichtet wurde.
- „Unfounded Argument“ verweist auf einen Nachweis, der im Kontext eines Arguments als unzureichend erachtet werden muss. Da jeder Nachweis gewisse Annahmen impliziert, besteht grundsätzlich die Möglichkeit, dass die Annahmen, unter denen die Nachweise erzeugt wurden, restriktiver sind, wie die die mit der Testmethodik einhergehen. Infolge dieser Problematik wären die erbrachten Nachweise nicht so belastbar, wie die Argumente die gestützt werden sollten.

Auf Basis dieser erarbeiteten Systematik sowie der definierten Bewertungskriterien wird im Nachfolgenden auf die Limitationsbewertung der einzelnen Methoden, gefolgt von deren Einfluss auf die Sicherheitsargumentation, eingegangen.

### 2.2.2.3 Bewertung der Methoden

Im Nachfolgenden werden die identifizierten Limitationen für der von Pegasus erarbeiteten Methoden erläutert. Für die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf die Testmethodik gilt anzumerken, dass etwaige Methoden zusammengefasst wurden, sobald diese einem äquivalenten Ziel dienen und sich daraus keine Differenzierung für deren Limitationen ergibt.

#### 2.2.2.3.1. Informationsgrundlage

Die Beschaffung von Informationen dient der Akquise und Bereitstellung von Referenzen, gegen welche ein HAD System unter Anleitung der Testmethodik getestet werden kann. Die Idee dabei ist es ein Äquivalent zur Argumentation eines Vergleiches zu beschaffen, welcher im Falle positiver Tests den Einsatz eines HAD Systems im Sinne der Homologation zu legitimieren vermag.

Aus dieser Zielstellung ist ersichtlich, dass die Informationsbeschaffung als Grundlage für die Verwendbarkeit der von Pegasus vorgeschlagenen Testmethodik dient. Für die detaillierte Betrachtung der Methode ist es unabdingbar, dass die Argumentation dekomponiert wird, mit dem Ziel, die Kategorien für den Vergleich eines HAD System zu einer Referenz anzugeben. Dazu wurden im Nachfolgenden positive als auch negative Beträge (zeilenweise in der nachstehenden Tabelle dargestellt) zur Sicherheitsargumentation exploriert und diese darin unterschieden, ob dieser Informationsgehalt beobachtet (daten-basiert) werden konnte oder basierend auf Wissen hergeleitet werden muss. Die Herkunft der Information ist von Bedeutung, weil diese, unterschiedliche Limitationen nach sich ziehen können.

Beitrag zur Argumentation ist	daten-basiert	wissens-basiert
<b>positiv</b>	1. Vermeidung von Unfällen, die maßgeblich auf den menschlichen Fahrer zurückzuführen sind	2. Anforderungen, die von Verkehrsbeobachtungen als auch aufgrund bekannter Verstöße abgeleitet wurden
<b>negativ</b>	3. Übliche Fahrsituationen sowie beinahe Unfälle, die der menschliche Fahrer beherrscht	4. Automatisierungsrisiken und Anforderungen, den ein HAD System genügen muss, um wie intendiert am Straßenverkehr teilnehmen zu können.

*Tabelle 4: negativer und positiver Beitrag zur Argumentation*

#### 2.2.2.3.2. Erste Kategorie

Für die Akquise der Information für den ersten Punkt werden folgende Annahmen getroffen. Zum einen wird davon ausgegangen, dass aufgetretene Unfälle über deren Hergang sowie deren Weiterentwicklung bis zum Unfallereignis protokolliert wurden. Zum anderen wird angenommen, dass das basierend auf diesen Protokollen eine Rekonstruktion erfolgen kann und diese in Form eines Szenarios festgehalten werden kann. Pegasus schlägt für die Entsprechung dieser Annahmen die Konsultation von Unfalldatenbanken vor.

Der Grad, zu dem dieser Vorschlag die getroffenen Annahmen erfüllt, ist mittels der „Assumption Coverage“ anzugeben, damit die Belastbarkeit der Nachweise, resultierend aus diesen Szenarien, ermittelt werden kann. Die resultierenden Nachweise sind als positiv einzuordnen, da diese einen Beitrag zu einer positiven Risikobalance liefert, die von den beobachtenden menschlichen Fahrern nicht erbracht wurde. Folglich würden diese Nachweise das Argument „besser als der menschliche Fahrer“ stützen. Im Falle eines nicht erbrachten Nachweises würde das HAD System in Situation scheitern, in der auch der menschliche Fahrer bereits gescheitert ist. Demnach würde dieser Fall als neutral zu werten sein, da das getestete HAD System weder besser noch schlechter wäre in Anbetracht der Tatsache, dass ein menschlicher Fahrer auch verunfallt ist. Der Vollständigkeitshalber sei noch erwähnt, dass im Fall einer holistischen Betrachtung der nicht vermiedene Unfall negativ zu werten ist, da dieser Testfall nicht zum Erhalt einer positiven Risikobalance beitragen würde.

Das zweite Bewertungskriterium „unused“ gibt den Anteil von ausstehenden Nachweisen und somit die Differenz zwischen dem theoretischen Maximalwert zu dem praktischen Anteil an erbrachten Nachweisen an. Ungenutzte Nachweise können darauf zurückzuführen sein, dass die Kategorisierung der Unfalltypen unter Missachtung der benötigten Funktionalität zur Schadensminimierung oder zur Unfallvermeidung vorgenommen wurde. Daraus würden dann Äquivalenzklassen von Unfällen resultieren, die Möglichkeit für zusätzliche Nachweis maskieren würde.

Durch das dritte Bewertungskriterium „unfounded“ wird nach einer Diskrepanz zwischen den geführten Nachweisen und der Argumentation gesucht, die es mittels dieser Nachweise zu stützen gilt. Im Kontext dieser Kategorie können Fehler bei der Rekonstruktion zu einer Vereinfachung des Szenarios führen, so dass ein Nachweis erbracht wurde, welcher aber nicht

die Fähigkeit eines HAD Systems aufzeigt einen Unfall vermeiden zu können, den der menschliche Fahrer hätte nicht vermeiden können.

#### 2.2.2.3.3. Zweite Kategorie

Für die Informationsbeschaffung der zweiten Kategorie wird die Annahme getroffen, dass die Missachtung von Straßenverkehrsregeln ein Unfallpotential darstellt. Entsprechend dieser Annahme müsste ein Schnitt aus den Kategorien eins und zwei existieren, da Unfälle auf ein riskantes Verhalten und somit auf einen Regelverstoß zurückzuführen sind. Zur Beschaffung dieser Informationen schlägt Pegasus wissensbasierte Ansätze vor, die auf generalisierte Beobachtungen (z.B. FOT & NDS) aufsetzen.

In Analogie zur ersten Kategorie resultiert die Belastbarkeit der geführten Nachweise aus dem Grad („Assumption Coverage“) zu dem die getroffenen Annahmen erfüllt sind. In Abhängigkeit der Argumentation dient ein positiver Test dieser Szenarien als Nachweis für das Argument „besser als der Mensch“, weil bereits beobachtet wurde, dass die betrachteten Regelverstöße vom der menschliche Fahrer begangen werden. Im Falle einer holistischen Betrachtung kann es jedoch in Abhängigkeit des Risikos eines Szenarios einen Unterschied darstellen, ob der Test positiv (hohes Risiko, daher positive Risikobalance) oder neutral (geringes Risiko, kein signifikanter Einfluss auf die Risikobalance) zu werten ist.

Der zuletzt genannte Aspekt kann natürlich bei der Testselektion eine mindere Bedeutung haben, so dass Szenarien mit einem geringen Risiko nicht zum Test ausgewählt werden und somit mögliche Nachweise nicht erbracht werden, was mittels des Bewertungskriteriums „unused“ auszuweisen wäre.

Argumente können als „unfounded“ gelten, wenn Situationen im Rahmen der Generalisierung zusammengefasst werden, die aber dediziert getestet werden müssten.

#### 2.2.2.3.4. Dritte Kategorie

Die dritte Kategorie verschärft die Anforderungen der zweiten Kategorie in dem deren Annahme invertiert wird. Demnach wird davon ausgegangen, dass Regelverstöße oder fremdinduzierte Risiken nicht zwangsweise zum Unfall führen müssen. Für die Informationsbeschaffung verweist Pegasus wie in der zweiten Kategorie auf die Verwendung von FOT, NDS sowie Simulatorstudien, aber mit spezifischen Fokus auf kritische Situationen, die aber nicht zum Unfall geführt haben.

Die Mächtigkeit der resultierenden Nachweise folglich aus dem Grad (Assumption Coverage) zu dem kritische Fahrsituationen aber ohne Unfallfolge erfasst werden. Sobald ein getestetes HAD System nicht in der Lage ist einen Test der dritten Kategorie zu bestehen, würde daraus eine negative Indikation für einen Vergleich mit dem menschlichen Fahrer folgen, da das HAD System nicht die Fähigkeiten wie der Mensch aufweist. Die Verwendung einer holistischen Betrachtung würde genau wie in der zweiten Kategorie abhängig vom Risiko entscheiden. Folglich würde bei geringem Risiko ein nicht bestandener Test neutral zu werten sein, wobei eine negative Indikation für eine neutrale Risikobalance bei hohem Risiko vorliegen würde.

Aufgrund der inversen Annahme und der ähnlichen Risikobetrachtung zur zweiten Kategorie sind die verbleibenden Bewertungskriterien analog zur zweiten Kategorie.

#### 2.2.2.3.5. Vierte Kategorie

In der vierten Kategorie wird angenommen, dass es Unfälle ohne Regelverstöße oder fremd-induzierte Risiken geben kann. Zur Informationsakquise schlägt Pegasus für die vierte Kategorie die systematische Identifikation von Automatisierungsrisiken sowie die Berücksichtigung von Standards und Normen.

Das Bewertungskriterium („Assumption Coverage“) gibt den Grad an, zu dem die obige Annahme erfüllt wurde. Im Falle eines negativen Testausganges resultiert im Gegensatz zur dritten Kategorie immer eine negative Indikation unabhängig, ob gegen den menschlichen Fahrer oder holistisch verglichen wird. Diese Bewertung lässt sich dadurch begründen, dass das HAD System unangemessen reagiert und so ein Verhalten aufzeigt, welches zu einer neutralen Risikobalance beiträgt noch der menschliche Fahrer ein solches Verhalten aufzeigt.

Nachweise der vierten Kategorie können als ungenutzt („unused“) gelten, wenn ein Verdacht für ein Automatisierungsrisiko bestand, diesem aber nicht nachgegangen wurde. In diesem Sinne kann ein Nachweis als „unfounded“ gelten, wenn ein Verdacht für ein Automatisierungsrisiko bestand, dieses aber fehlerhaft in Form eines Szenarios dargestellt wurde.

#### 2.2.2.3.6. Zusammenfassung

Den betrachteten Kategorien lassen sich den nachfolgenden Zielen zusammenfassen, welche wiederum als Komposition für die Argumentation von Pegasus zu verstehen ist:

- **Risikomitigierende Betrachtung** – von Situationen, die bekanntermaßen mit einem erhöhten Unfallrisiko einhergehen, welche durch die Informationsakquise der ersten Kategorie abgedeckt sind
- **Risikorelativierende Betrachtung** – von Situationen, für die die menschliche Leistungsfähigkeit (vgl. Referenzfähigkeit) ermittelt werden konnte, so dass bestandene als auch nicht bestandene mittels dieser zusätzlichen Referenz relativiert werden können, welche unter Einbeziehung der zweiten und dritten Kategorie resultiert.
- **Risikoinduzierende Betrachtung** – von Situationen, in denen das HAD System im Verdacht steht ein nicht intendiertes Verhalten aufzuzeigen, welches über die vierte Kategorie abgeleitet wird.

Darüber hinaus sind für diese Ziele jeweils zwei Spalten aufgeführt, welche in Abhängigkeit von der Erfülltheit der Tests entweder als positiver, negativer oder neutraler Nachweis hervor-gehen. Ein Nachweis ist positiv, wenn dieser genau das nachweist, was auch argumentiert wurde. Ein Widerspruch zum Argument ist als negativer Nachweis benannt, währenddessen ein neutraler Nachweis keine Aussage bezüglich des Argumentationszieles erbringen kann.

Nachweise	Holistische Betrachtung					
	Mitigierend		Relativierend		Induzierend	
	Positiv	Negativ	Positiv	Neutral	Neutral	Negativ
<b>Unused (unge-nutzt)</b>	1. Konservativ, da geringer als möglich	2. Nachweise möglicherweise zu hoch	7. Konservativ, da geringer als möglich	8. Kein Einfluss	13. Kein Einfluss	14. Nachweise möglicherweise zu neutral
<b>Founded (gestützt)</b>	3. Zunehmend	4. Abnehmend	9. Zunehmend	10. Kein Einfluss	15. Kein Einfluss	16. Abnehmend
<b>Unfounded (nicht-gestützt)</b>	5. Zunehmend	6. Abnehmend	11. Zunehmend	12. Kein Einfluss	17. Kein Einfluss	18. Konservativ abnehmend

Tabelle 5: Nachweise und ihre Auswirkung auf die holistische Betrachtung

1. beschreibt einen unkritischen Fall, da die Möglichkeit besteht einen Nachweis zu erbringen, diese aber nicht genutzt wurde und somit der Sicherheitsnachweis konservativer ausfällt.
2. beschreibt einen kritischen Fall, da ein Nachweis verfügbar gewesen wäre, der das unsichere Verhalten des getesteten HAD Systems aufdecken würde.
3. beschreibt den Idealfall bei dem das HAD System die Akzeptanzkriterien erfüllen kann und somit in der Lage ist einen potentiellen Unfall zu vermeiden und dieses Potential in Form entsprechender Nachweise abgebildet ist.
4. beschreibt den Fall bei dem das HAD System die Akzeptanzkriterien nicht erfüllen kann und somit nicht in der Lage ist einen potentiellen Unfall zu vermeiden. Aufgrund der Tatsache, dass die Pegasus Testmethodik darauf abzielt dediziert Fähigkeiten zu testen, die in Summe die intendierte Funktionalität (Autobahnchauffeur) implizit, sind im Falle eines fehlgeschlagenen Tests die Nachweise zu entziehen, die der entsprechenden Funktionalität zugehörig sind.
5. beschreibt den Zweifel an dem Nachweis, dass das HAD System in der Lage ist einen Unfall zu vermeiden oder zu mitigieren. Gründe für derartige Zweifel sind nachfolgend erläutert:
  - a. Informationsbereitstellung
    - i. Repräsentativität der vorliegenden Informationen, auf Basis derer ein testbares Szenario abgeleitet werden kann, wurde überschätzt
    - ii. Akzeptanzkriterien sind nicht ausreichend einschränkend, um in Folge eines erfüllten Akzeptanzkriteriums schlussfolgern zu können, dass ein gewisses Verhalten dadurch hervorgeht
    - iii. Kritikalitätsbewertung ist falschpositiv, so dass Informationen als relevant erachtet werden, die für den jeweiligen Argumentationspfad unbedeutend sind
    - iv. Assoziation von abgeleiteten Szenarien mit logischen Szenarien wurde fehlerhaft vorgenommen
6. beschreibt einen Fall, der äquivalent ist zu 4, mit dem Unterschied, eines falschnegativen Nachweises aufgrund des Scheiterns des getesteten HAD Systems. Folglich

- würde das getestete HAD System fälschlicherweise mit einer niedrigeren Risikoneutralität bewertet werden.
7. beschreibt einen Fall, der äquivalent ist zu 1, folglich ist keine weiterführende Erläuterung erforderlich.
  8. beschreibt einen Fall, der prinzipiell analog zu 2 ist, aber aufgrund der neutralen Wertung keinen Einfluss auf den Sicherheitsnachweis hat.
  9. beschreibt einen Fall, der äquivalent ist zu 3, folglich ist keine weiterführende Erläuterung erforderlich.
  10. beschreibt einen Fall, der konträr zu 4 ist, da das bekannte Scheitern eines menschlichen Fahrers eine negative Wertung des HAD Systems unter der Prämisse – mindestens so gut wie - nicht zulässt.
  11. beschreibt einen Fall, der äquivalent ist zu 5, folglich ist keine weiterführende Erläuterung erforderlich.
  12. beschreibt einen Fall, der prinzipiell analog zu 6 ist, aber aufgrund der neutralen Wertung keinen Einfluss auf den Sicherheitsnachweis hat.
  13. beschreibt einen Fall, der äquivalent ist zu 8, folglich ist keine weiterführende Erläuterung erforderlich.
  14. beschreibt einen kritischen Fall, der das Scheitern des HAD Systems im Fall eines Automatisierungsrisikos nicht aufdecken würde.
  15. beschreibt einen Fall, der äquivalent ist zu 13, folglich ist keine weiterführende Erläuterung erforderlich.
  16. beschreibt einen Fall, der äquivalent ist zu 4, folglich ist keine weiterführende Erläuterung erforderlich.
  17. beschreibt einen Fall, der äquivalent ist zu 13, folglich ist keine weiterführende Erläuterung erforderlich.
  18. beschreibt einen Fall, der äquivalent ist zu 6, folglich ist keine weiterführende Erläuterung erforderlich.

Der Vollständigkeitshalber ist anzumerken, dass die obige Darstellung sowie Erläuterungen auf einen holistischen Vergleich anwendbar sind, wohingegen für den Vergleich mit einem menschlichen Fahrer die Spalten negativ & risikomitigierend mit neutral & risikorelativierend zu vertauschen ist. Darüber hinaus lassen sich die voranstehenden Bewertungen wie folgt zusammenfassen.

Die Methode zur Informationsakquise:

- definiert über die Erfüllung der getroffenen Annahmen, die Belastbarkeit der Nachweise, die aus einem Test dieser Informationen resultieren würde.
- dekomponiert die betrachteten Informationen in die Argumentationsstränge „risikomitigierend“, „risiko-relativieren“ und „risiko-induzierend“ und stellt deren Einflüsse auf die Sicherheitsargumentation dar.
- kann „unfounded arguments“ zur Folge haben, welche auf Ungewissheiten bzgl. der korrekten Darstellung der akquirierten Informationen in Form eines Szenarios sowie deren Repräsentativität zurückzuführen sind.

#### **2.2.2.4 Ontologie**

Die Verwendung einer Ontologie ist in dem Sinne als Methode aufzufassen, als dass die Relationen der akquirierten Informationen beschrieben werden. Diese Beschreibung befähigt die

Generalisierung von Observation im Rahmen der zweiten Kategorie der Informationsakquise. Zudem ist die Verwendung einer Ontologie für die Generation neuer bisher noch nicht beobachteter Szenarien prädestiniert, wie für die vierte Kategorie der Informationsgrundlage benötigt. Darüber hinaus kann eine Ontologie zur Relevanzargumentation der betrachteten Szenarien beitragen.

Um diese Beiträge zu ermöglichen, wird angenommen, dass Entitäten sowie deren Relationen entsprechend der Umgebung im Rahmen einer Ontologie modelliert werden können. Sofern sich diese Annahme als gültig erweist, lassen sich Informationen erschließen, die so bisher noch nicht akquiriert wurden. Infolgedessen darf die Ontologie als positiver Beitrag zur „Assumption Coverage“ der Informationsgrundlage verstanden werden, so dass belastbarere Nachweise erbracht werden können. Diese Vorzüge lassen sich für die Erbringung von Nachweisen für die risikominimierenden als auch für die risikoinduzierenden Argumente nutzen, wobei die akquirierten Informationen analysiert respektive erzeugt werden können. Aus diesem Grunde sind in der unten aufgeführten Tabelle die Felder 3 und 18 grün eingefärbt, um die Vorzüge der Ontologie kenntlich zu machen. Das dritte Feld ist grün eingefärbt, da die Verwendung der Ontologie die Belastbarkeit der erbrachten Nachweise zu steigern vermag. Im Umkehrschluss führen diese Erkenntnisse zu einer besseren Abschätzung, wie viel Nachweise im Falle eines negativen Tests (in 18 dargestellt) verloren gehen.

Die Kehrseite dieser Methodik sind „unused evidence“ infolge modellierter Relationen, die aber als nicht relevant erachtet wurden und demnach nicht für das Szenarien-basierte Testen in Betracht gezogen wurde. Dieser Fall entspricht den Feldern 2 und 14, welche zur Illustration des negativen Einflusses auf die Argumentation rot eingefärbt wurden. Eine Ontologie kann aber auch „unfounded arguments“ hervorbringen, welche auf eine unvollständige Modellierung zurückzuführen ist oder aber auf eine Modellierung, die nicht der Umgebung entspricht (in Feld 5 dargestellt).

Nachweise	Holistische Betrachtung					
	Mitigierend		Relativierend		Induzierend	
	Positiv	Negativ	Positiv	Neutral	Neutral	Negativ
<b>Unused (unge-nutzt)</b>	1.Konservativ, da geringer als möglich	2.Nachweise möglicher-weise zu hoch	7. Kein Einfluss	8.Kein Einfluss	13.Kein Einfluss	14.Nachweise möglicher-weise zu neutral
<b>Founded (gestützt)</b>	3.Zunehmend	4.Abnehmend	9. Kein Einfluss	10.Kein Einfluss	15.Kein Einfluss	16.Abnehmend
<b>Unfounded (nicht-gestützt)</b>	5.Zunehmend	6.Abnehmend	11. Kein Einfluss	12.Kein Einfluss	17.Kein Einfluss	18.Konservativ abnehmend

Tabelle 6: Art des Nachweises und Auswirkung auf die hollistische Betrachtung

### 2.2.2.5 Kritikalität

Die Kritikalitätsmethode dient der Identifikation von Situationen, welche ein erhöhtes Unfallpotential mit sich bringen und daher als kritisch angesehen werden. Folglich besteht das Ziel dieser Methode in der Klassifikation von Situationen in kritisch und unkritisch. Diese Zielstellung impliziert die Annahme, dass keine Situation innerhalb eines gewissen temporalen Horizonts vernachlässigt wird, wenn diese zu einem Unfall oder beinahe Unfall führen kann.

Der Grad zu dem diese Annahme erfüllbar ist, reflektiert die Effizienz des verwendeten Verfahrens zur Bewertung der Kritikalität. Es gilt anzumerken, dass die Kritikalitätsmethode allenfalls die Belastbarkeit von Nachweisen mindern aber nicht steigern kann. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Kritikalitätsmethode keine zusätzlichen kritischen Situationen hervorbringen kann, die nicht schon akquiriert wurden. Folglich ist lediglich ein idealer Kritikalitätsdetektor (ohne falschpositiv und falschnegative Detektionen) in der Lage die „Assumption Coverage“ zu erhalten.

Da die bewertete Effizienz eines Detektors von den betrachteten Situationen abhängt, kann es dazu kommen, dass die bewertete von angenommenen Effizienz des Detektors divergiert. In diesem Falle hätten falschnegative Situationen sogenannte „unused evidence“ und falschpositive Situationen würden zu „unfounded arguments“ führen. Dieser Zusammenhang ist darauf zurückzuführen, dass eine falschnegative Situation eigentlich kritisch wäre und hätte getestet werden können, so dass darauf verzichtet wurde einen entsprechenden Nachweis zu erbringen (in der nachfolgenden Tabelle als Feld 2 dargestellt und rot eingefärbt). Im Falle von falschpositiven Situationen wird argumentiert, dass das getestete HAD System in der Lage war eine kritische Situation zu bewältigen, obwohl diese gar nicht kritisch war und somit ein Nachweis erbracht wurde, der so nicht zur Argumentation passt (in der nachfolgenden Tabelle als Feld 5&11 dargestellt und rot eingefärbt).

Nachweise	Holistische Betrachtung					
	Mitigierend		Relativierend		Induzierend	
	Positiv	Negativ	Positiv	Neutral	Neutral	Negativ
<b>Unused (unge-nutzt)</b>	1.Konservativ, da geringer als möglich	2.Nachweise möglicher-weise zu hoch	7.Konservativ, da geringer als möglich	8.Kein Einfluss	13.Kein Einfluss	14. Kein Einfluss
<b>Founded (gestützt)</b>	3.Zunehmend	4.Abnehmend	9.Zunehmend	10.Kein Einfluss	15.Kein Einfluss	16.Kein Einfluss
<b>Unfounded (nicht-gestützt)</b>	5.Zunehmend	6.Abnehmend	11.Zunehmend	12.Kein Einfluss	17.Kein Einfluss	18. Kein Einfluss

Tabelle 7: Art des Nachweises und Auswirkung auf die holistische Betrachtung - Kritikalität

Da die oben beschriebenen Ausführungen ausschließlich für die risikominimierenden/relativierenden Betrachtungen zu verwenden sind, ist die Spalte risikoinduziert weiß hinterlegt. Diese Einschränkung ist darauf zurückzuführen, dass ein risikoinduzierendes Szenario zu Anbeginn keine Kritikalität aufweist und folglich keine dieser Szenarien für das spätere Testen in Betracht kommen würden. Aus diesem Grund darf die Kritikalitätsmethodik nicht für risikoinduzierendes Szenario verwendet werden.

### 2.2.2.6 Assoziation

Das Ziel der Assoziationsmethodik besteht darin die Funktionalität zu identifizieren, die benötigt wird, um im Verlaufe eines Szenarios ein intendiertes Verhalten aufzuzeigen. Diese Methodik ist auf den Gedanken zurückzuführen, dass einige Szenarien einen sehr ähnlichen funktionalen Charakter aufweisen, während andere Szenarien sehr starke Verhaltensimplikationen aufweisen. Daher die Idee diese Verhaltensimplikationen zu identifizieren und im Nachgang Äquivalenzklassen zu definieren.

Es wird bei dieser Methode anagenommen, dass dedizierte Tests der Äquivalenzklassen, die Grundlage für das Beherrschen eines Szenarios darstellt, welches sich einer jedweden Kombination von Funktionalitäten aus diesen getesteten Äquivalenzklassen zusammensetzt. Der Grad zu dem diese Annahme erfüllt ist, bestimmt die Belastbarkeit der Nachweise, die mittels dedizierter Äquivalenzklassentests erzielt werden können. Folglich muss zur Implementation der Assoziationsmethodik eine Definition von Klassen gefunden werden, die die Funktionalität des betrachteten Autobahnchauffeurs zu beschreiben vermag. Sobald eine derartige Definition gefunden ist, wird die Identifikation der Funktionalitäten eines Szenarios als Assoziation bezeichnet, weil Abschnitte eines Szenarios, in denen eine Funktionalität erforderlich ist, mit der jeweiligen Funktionsklasse assoziiert wird.

Unter der Annahme, dass die funktionalen Klassen entsprechend des Autobahnchauffeurs gewählt wurden, sollte die Assumption Coverage bestand haben und infolgedessen wurden

sich die erforderlichen Nachweise auf die dedizierten Tests bzgl. der funktionalen Klassen reduzieren. Dieses Einsparpotential wäre im originären Sinne als Menge ungenutzter Nachweise zu verstehen, welches aber hier die Effizienz der Assoziationsmethodik (in den Feldern 1 & 7 in grün dargestellt) auszuweist. Problematisch wäre dabei nur der Fall, dass die obige Annahme unzureichend erfüllt ist und somit zusätzliche Nachweise hätten erbracht werden müssen, was folglich zu einem unterstützten Argument (unfounded Argument – in den Feldern 5 & 11 in rot dargestellt) führen kann. Die nachstehende tabellarische Ausführung zeigt zugleich den Effekt von unterstützten Nachweisen, welche das Scheitern eines HAD Systems maskieren würde (dargestellt in Feld 2 und in rot eingefärbt).

Nachweise	Holistische Betrachtung					
	Mitigierend		Relativierend		Induzierend	
	Positiv	Negativ	Positiv	Neutral	Neutral	Negativ
<b>Unused (ungenutzt)</b>	1. Einsparpotential durch Assoziation	2. Nachweise möglicherweise zu hoch	7. Einsparpotential durch Assoziation	8. Kein Einfluss	13. Kein Einfluss	14. Kein Einfluss
<b>Founded (gestützt)</b>	3. Zunehmend	4. Abnehmend	9. Zunehmend	10. Kein Einfluss	15. Kein Einfluss	16. Kein Einfluss
<b>Unfounded (nicht-gestützt)</b>	5. Zunehmend	6. Abnehmend	11. Zunehmend	12. Kein Einfluss	17. Kein Einfluss	18. Kein Einfluss

Tabelle 8: Art des Nachweises und Auswirkung auf die holistische Betrachtung Art des Nachweises und Auswirkung auf die holistische Betrachtung - Assoziation

Abschließend ist noch zu erwähnen, dass der Einsatz der Assoziationsmethodik für die risikominimierende Betrachtung konzipiert wurde, aber auch für die relativierenden Betrachtungen möglich sind, sofern unser Verständnis über die menschliche Leistungsfähigkeit dies auch zulässt. Es verbleibt noch Diskussion der Assoziationsmethodik im Kontext der induzierenden Betrachtung. Da bei der induzierenden Betrachtung gewisse Funktionalitäten in Folge eines spezifizierten Szenarios beeinträchtigt wird, wäre eine Äquivalenzklassenbildung nicht zielführend.

### 2.2.2.7 Relation

Die Relationsmethode dient der Darstellung von Wissen aus Prozessen, Nomen und Regularien in Form von Szenarien, so dass sich Erwartungen über das Verhalten eines HAD Systems entweder bestätigen oder aber widerlegen lassen. In diesem Sinne besteht die Aufgabe der Relationsmethode, eine unscharfe und abstrakte Information, resultierend unter anderem aus den Prozessen, in eine Spezifikation zu überführen und diese in Form eines Szenarios darzustellen. Dabei müssen Ableitungen vorgenommen werden, so dass exploriert wird in welchem Szenario die betreffende Information vorkommt und wie die Reaktion des HAD Systems in

eben diesem Szenario zu werten ist. Zudem muss festgelegt werden, welchen Ausprägungsumfang die beschriebene Relation einnehmen soll.

Im Rahmen der Relationsmethode wird die Annahme getroffen, dass ein Szenario in der Lage ist ein in Form von Informationen beschriebenes Automatisierungsrisiko hervorzurufen. Der Grad zu dem die Information über einen Auslöser eines Automatisierungsrisikos in Form eines Szenarios dargestellt wurde, bestimmt die Belastbarkeit der resultierenden Nachweise (entspricht der „Assumption Coverage“). Einschränkungen dieser theoretischen Belastbarkeit sind zu erwarten, sobald ein Verdacht für ein Automatisierungsrisiko besteht, diesem aber nicht nachgegangen wird, was zu ungenutzten Nachweisen führen würde (betrifft die Felder 2 & 14, wie unten tabellarisch dargestellt). Eine andere Problematik stellen ungestützte Argumente („unfounded Argument“) dar, welche infolge einer fehlerhaften Abbildung einer Information über ein Automatisierungsrisiko auf ein Szenario auftreten kann.

In Anbetracht der beschriebenen Bewertungen sowie den daraus resultierenden Limitationen der Relationsmethode ist es naheliegend die Ausprägungsumfänge der Relationsmethode zu erhöhen, damit sowohl der Problematik der „unused evidence“ als auch der „unfounded argument“ entgegengewirkt werden kann. Da die Relationsmethode zu allen Argumentationsziele (mitigierend, relativierend, induzierend) beiträgt, ist bei der Erhöhung der Ausprägungsumfänge folgendes zu beachten. Sollte sich der Verdacht eines Automatisierungsrisikos nicht bestätigen, so ist im Falle einer positiven Nachweise der Kategorie risikomitigierend sowie risikorelativierend darauf zu achten, dass die resultierenden Nachweise der „Assumption Coverage“ der verwendeten Informationsgrundlage entsprechen und nicht mit den Ausprägungsumfängen der angewendeten Relationsmethode korrelieren. Andernfalls könnten durch die erweiterten Ausprägungsumfänge ähnliche Nachweise hervorgebracht werden, die zu einem ungestützten Argument („unfounded Argument“) führen würden, wie in der nachfolgenden Tabelle in den Feldern 5 und 11 dargestellt. Diese Problematik betrifft auch die negativen Tests (risikomitigierend & risikoinduzierend) bei denen sich der Verdacht für ein Automatisierungsrisiko bestätigt (betrifft die Felder 6 & 18).

Nachweise	Holistische Betrachtung					
	Mitigierend		Relativierend		Induzierend	
	Positiv	Negativ	Positiv	Neutral	Neutral	Negativ
<b>Unused (ungenutzt)</b>	1. Konservativ, da geringer als möglich	2. Nachweise möglicherweise zu hoch	7. Konservativ, da geringer als möglich	8. Kein Einfluss	13. Kein Einfluss	14. Nachweise möglicherweise zu neutral
<b>Founded (gestützt)</b>	3. Zunehmend	4. Abnehmend	9. Zunehmend	10. Kein Einfluss	15. Kein Einfluss	16. Abnehmend
<b>Unfounded (nicht-gestützt)</b>	5. Zunehmend	6. Abnehmend	11. Zunehmend	12. Kein Einfluss	17. Kein Einfluss	18. Konservativ abnehmend

Tabelle 9: Art des Nachweises und Auswirkung auf die holistische Betrachtung - Relation

### 2.2.2.8 Selektion

Die Selektionsmethode wählt Szenarien aus der Datenbank aus, welche im Nachgang in eine Testspezifikation überführt werden, so dass diese getestet werden können. Die Idee der Selektion besteht darin, die verfügbaren Attribute eines Szenarios so für die Selektion nutzbar zu machen, dass relevante Szenarien benannt werden können, die stellvertretend für die als nicht-relevant erachteten Szenarien gelten. Demzufolge wird im Rahmen der Selektionsmethode die Annahme getroffen, dass die Definition von Äquivalenzklassen über die gewählte Attribuierung der Szenarien möglich ist und somit auf die Fähigkeit eines HAD System mittels eines selektierten Repräsentanten aus jeder dieser Klassen über einen dedizierten Test geschlossen werden kann.

Entsprechend des methodischen Vorschlages von Pegasus stehen als Attribute die Assoziation von funktionalen Klassen, die Kritikalität eines Szenarios sowie die Präsenz von modellierten Inhalten der Ontologie zur Verfügung. Der Grad zu dem diese Attribute eine Äquivalenzklassenbildung erlauben, gibt die Belastbarkeit der Nachweise an, die auf Grundlage des selektierten Repräsentanten geführt wurde. Nachweise können ungenutzt verbleiben, wenn die Äquivalenzklassenbildung fälschlicherweise über überabgeschätzt wurde und so relevante Repräsentanten nicht selektiert werden. Sofern jedoch die Definition der Äquivalenzklassen zu dem jeweiligen Argumentationsziel passt, reflektieren ungenutzte Nachweise das Einsparpotential der Selektionsmethode. Im Nachfolgenden werden negativ ungenutzte Nachweise betrachtet, da diese aufzeigen, dass die selektierten Repräsentanten falsch gewählt wurden (in der nachfolgenden Tabelle als Feld 2 & 14 dargestellt). Diese Problematik betrifft die risikomitigierende als auch die risikoinduzierende Kategorie, da diese eine negative Indikation im Falle eines nicht bestandenen Tests für das betreffende Argument darstellen. Im Umkehrschluss müssen positiv ungenutzte Nachweise nicht betrachtet werden, da diese auf eine Un-

terabschätzung der Selektionsmethode hindeuten. Interessanterweise kann die Selektionsmethode keine ungestützten Argumente hervorbringen, da das Unvermögen ein Szenario auszuwählen bereits durch die Bewertung in Form nicht genutzten Nachweise abgedeckt ist.

Nachweise	Holistische Betrachtung					
	Mitigierend		Relativierend		Induzierend	
	Positiv	Negativ	Positiv	Neutral	Neutral	Negativ
<b>Unused (unge-nutzt)</b>	1.Konservativ, da geringer als möglich	<b>2.Nachweise möglicherweise zu hoch</b>	7.Konservativ, da geringer als möglich	8.Kein Einfluss	13.Kein Einfluss	<b>14.Nachweise möglicherweise zu neutral</b>
<b>Founded (gestützt)</b>	3.Zunehmend	4.Abnehmend	9.Zunehmend	10.Kein Einfluss	15.Kein Einfluss	16.Abnehmend
<b>Unfounded (nicht-gestützt)</b>	5.Zunehmend	6.Abnehmend	11.Zunehmend	12.Kein Einfluss	17.Kein Einfluss	18.Konservativ abnehmend

Tabelle 10: Art des Nachweises und Auswirkung auf die holistische Betrachtung - Selektion

### 2.2.2.9 Variation

Die Variationsmethode nimmt Änderungen an der Testspezifikation vor und somit an den definierten Szenarien, mit der Begründung, dass ein HAD System die nachgewiesenen Fähigkeiten nicht nur unter streng reproduzierbaren bereitstellen muss, sondern auch unter veränderlichen Bedingungen, wie sie dem realen Kontext eines HAD System entsprechen. Die Durchführung von Tests unter veränderten Bedingungen liefert Hinweise auf die Robustheit des HAD Systems und darüber hinaus auf etwaige Ungewissheiten der Testmethodik.

Im Rahmen der Variationsmethode wird daher angenommen, dass eine Variation eines bereits getesteten Szenarios, keine signifikanten Erkenntnisse, und damit Widersprüche, bezüglich der Testresultate hervorbringt. Folglich würde ein Nichtbestehen von variierten Szenarien die bisherigen Nachweise in Frage stellen, was die Eignung des getesteten HAD Systems betrifft, aber auch der verwendeten Testmethodik, da die Annahme bezüglich der definierten Äquivalenzklassen fehlerhaft gewesen sein muss. Diese Schlussfolgerungen sind aber nur gültig, sofern die variierten Szenarien auch relevant sind, wie den Feld 6 und 18 der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Im Umkehrschluss kann die Variationsmethode das Erbringen bisher ungenutzter Nachweise erzwingen, wie in den Feldern 1 und 14 dargestellt. Zudem können durch die Variation von bekannten Szenarien Erkenntnisse gewonnen werden, die bisher unbekannt waren und somit die Belastbarkeit der erbrachten Nachweise gesteigert werden, wie in Feld 3 angegeben.

Nachweise	Holistische Betrachtung					
	Mitigierend		Relativierend		Induzierend	
	Positiv	Negativ	Positiv	Neutral	Neutral	Negativ
<b>Unused (unge-nutzt)</b>	1. Konser-vativ, da geringer als möglich	2. Nachweise möglicher-weise zu hoch	7. Konser-vativ, da geringer als möglich	8. Kein Ein-fluss	13. Kein Einfluss	14. Nachweise möglicher-weise zu neutral
<b>Founded (gestützt)</b>	3. Zuneh-mend	4. Abneh-mend	9. Zuneh-mend	10. Kein Einfluss	15. Kein Einfluss	16. Abneh-mend
<b>Unfoun-ded (nicht-ge-stützt)</b>	5. Zuneh-mend	6. Abneh-mend	11. Zuneh-mend	12. Kein Einfluss	17. Kein Einfluss	18. Konser-vativ ab-nehmend

Tabelle 11: Art des Nachweises und Auswirkung auf die holistische Betrachtung - Variation

### 2.2.2.10 Evaluation

Die Evaluationsmethodik dient der Interpretation von Testresultaten in der Art, dass diese als Nachweise für die Sicherheitsargumentation dienen können. Diese Interpretation ist notwendig, da die Erfülltheit und somit die Akzeptanz eines Tests von den argumentierten Zielen abhängig sind.

Folglich wird im Rahmen der Evaluation die Annahme getroffen, dass der Beitrag eines durchgeführten Tests zur Sicherheitsargumentation über die Erfülltheit von Akzeptanzkriterien entschieden werden kann. Der Grad zu dem diese Annahme erfüllt ist, bestimmt die Belastbarkeit der erbrachten Nachweise, welche aus der Verknüpfung der Testresultate mit der Sicherheitsargumentation resultieren.

Da ein Testresultat als Nachweis für verschiedene Sicherheitsziele dienen kann, wird für jedes dieser Ziele ein jeweiliges Akzeptanzkriterium benötigt. Mittels dieser Akzeptanzkriterien wird festgelegt, ob ein Testresultat eine positive, negative oder neutrale Indikation für die argumentierten Inhalte darstellt. Im Falle einer positiven Indikation wurde mittels des Szenarien-basierenden Testens genau das nachgewiesen, was auch argumentiert wurde. Im Gegensatz dazu stellt eine negative Indikation einen Widerspruch zwischen dem Testresultat und dem Argument dar, wohingegen eine neutrale Indikation keine Aussage zulässt.

Fehlerhafte Interpretationen der Testresultate können dazu führen, dass Nachweise als ungenutzt verbleiben, da diese nicht mit einem Sicherheitsziel verknüpft wurden. Konträr dazu besteht die Möglichkeit, dass Testresultate als Nachweise ausgewiesen wurden, welche aber nicht zu dem verknüpften Sicherheitsziel passen. Beide Interpretationsfehler sind auf Unzulänglichkeiten der Interpretation der Testresultate zurückzuführen. Zum einen können Formatunstimmigkeiten zwischen den Testresultaten und den Akzeptanzkriterien zu Fehlinterpretationen führen und zum andern werden diese durch Lücken in der Sicherheitsargumentation begünstigt. In der nachfolgenden Tabelle sind beide Limitationen der Evaluationsmethodik in

rot eingefärbt, währenddessen die grün eingefärbten Felder den intendierten Fall wiedergeben und die grauen Felder keinen Einfluss auf die resultierenden Nachweise darstellen.

Nachweise	Holistische Betrachtung					
	Mitigierend		Relativierend		Induzierend	
	Positiv	Negativ	Positiv	Neutral	Neutral	Negativ
<b>Unused (unge-nutzt)</b>	1.Konser-vativ, da geringer als mög-lich	2.Nach-weise möglicher-weise zu hoch	7.Konser-vativ, da geringer als mög-lich	8.Kein Ein-fluss	13.Kein Einfluss	14.Nach-weise möglicher-weise zu neutral
<b>Founded (gestützt)</b>	3.Zuneh-mend	4.Abneh-mend	9.Zuneh-mend	10.Kein Einfluss	15.Kein Einfluss	16.Abneh-mend
<b>Unfoun-ded (nicht-ge-stützt)</b>	5.Zuneh-mend	6.Abneh-mend	11.Zuneh-mend	12.Kein Einfluss	17.Kein Einfluss	18.Konser-vativ ab-nehmend

Tabelle 12: Art des Nachweises und Auswirkung auf die holistische Betrachtung - Evaluation

### 2.2.2.11 Einfluss der Limitationen auf die Sicherheitsargumentation

Die Sicherheitsargumentation definiert Ziele, deren Erfüllung den Einsatz von HAD Systemen legitimieren soll und somit Argumente liefert, warum dem getesteten HAD System unterstellt werden darf, dass es über die notwendigen Fähigkeiten verfügt, in einer sicheren Art und Weise am Straßenverkehr teilzunehmen. Die Testmethodik spezifiziert das Zusammenwirken von Methoden mit dem Ziel des Szenarien-basierten Testens, welches Nachweise für die Sicherheitsargumentation hervorbringen soll. Im Rahmen von Pegasus wurden Vorschläge sowohl für eine Sicherheitsargumentation als auch für eine Testmethodik erarbeitet. Da im obigen Abschnitt Limitationen der Methoden identifiziert wurden, stellt sich nun die Frage, wie sich diese Limitationen auf die Sicherheitsargumentation auswirken. Um diese Auswirkung bewerten zu können, wurde der Beitrag der einzelnen Methoden zu den jeweiligen Argumentationszielen ermittelt, deren Limitationen zusammengetragen und schließlich Möglichkeiten für eine fehlerhafte Zuordnung von Nachweisen zu den Argumenten identifiziert.

Im Nachfolgenden sind die Ergebnisse dieser Analyse tabellarisch zusammengefasst. Für jedes Argumentationsziel (risikomitigierend, -relativierend, -induzierend) wurde eine separate Tabelle erstellt, welche zeilenweise die betrachteten Methoden und spaltenweise die Bewertungsergebnisse darstellen. Des Weiteren gilt anzumerken, dass ein Plus (+) in der mittleren Bewertungspalte (gestützt) einen Beitrag der jeweiligen Methode angibt, währenddessen Kreuze (x) verwendet wurden, um eine Limitation auszuweisen.

<b>risikomitigierend</b>	<b>Ungenutzt</b>	<b>Gestützt</b>	<b>Nicht-gestützt</b>
<i>Informationsgrundlage</i>	<b>X</b>	<b>+</b>	<b>X</b>
<i>Ontologie</i>	<b>X</b>	<b>+</b>	<b>X</b>
<i>Kritikalität</i>	<b>X</b>	<b>+</b>	<b>X</b>
<i>Assoziation</i>	<b>X</b>	<b>+</b>	<b>X</b>
<i>Relation</i>	<b>X</b>	<b>+</b>	<b>X</b>
<i>Selektion</i>	<b>X</b>	<b>+</b>	
<i>Variation</i>		<b>+</b>	<b>X</b>
<i>Evaluation</i>	<b>X</b>	<b>+</b>	<b>X</b>

Tabelle 13: Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei der Betrachtung der obigen Tabelle (risikomitigierend) ist auffällig, dass sehr oft Limitationen der Art ungenutzter Nachweise sowie nicht-gestützter Argumente zu erwarten sind. Die Häufung dieser Limitationen ist auf die folgenden Aspekte zurückzuführen. Zum einen ist die risiko-mitigierende Argumentation sehr anspruchsvoll, da Testresultate entweder eine positive oder negative Indikation darstellen und somit methodische Limitationen nicht maskiert werden. Zum anderen sind die Limitationen sehr präsent, da alle betrachteten Methoden zu diesem Argumentationsziel beitragen.

In Anbetracht dieses vollumfänglichen Beitrages ist es auffällig, dass die Selektion keine nicht-gestützten Argumente und die Variation keine ungenutzten Nachweise hervorbringen kann. Diese Auffälligkeiten sind keine analytischen Nachlässigkeiten der Bewertungsmethodik, sondern darauf zurückzuführen, dass bei der Selektion ausschließlich Szenarien ausgewählt, aber diese nicht verändert, werden und somit keine nicht-gestützten Argumente zu erwarten sind. Im Kontext der Variation können keine Nachweise als ungenutzt verbleiben, da jedes selektierte Szenario variiert wird und somit methodisch nicht die Möglichkeit für das Auslassen selektiver Tests besteht.

Mit Ausnahme der Selektion sowie der Variation weisen alle betrachteten Methoden sowohl Limitationen der Art ungenutzter Nachweise aber auch nicht-gestützter Argumente auf. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ungenutzte Nachweise auf einen unbewussten Informationsverlust bei der Generation von Szenarien, deren Attribuierung, Selektion sowie Überführung in eine Testspezifikation und bei der Erstellung der Nachweise gemäß den vorliegenden Testresultaten zurückzuführen ist. Ungenutzten Nachweise kann mittels methodischer Plausibilisierung oder aber mittels gesammelter Erfahrungen gegengewirkt werden. Das Sammeln von Erfahrung wäre hier zulässig, da die Nachweise zunächst konservativer erbracht werden, als eigentlich notwendig und somit deren Belastbarkeit unangetastet bleibt.

Im Gegensatz dazu wäre im Falle nicht-gestützter Argumente das Sammeln von Erfahrung und somit das Verwenden der Methodik zur Freigabe unzulässig. Aus diesem Grunde müssen methodische Erweiterungen vorgenommen werden, welche es erlauben Bedenken bezüglich

der nicht-gestützten Argumente auszuräumen. Im Nachfolgenden werden identifizierte Bedenken bezüglich jeder Methode genannt und Möglichkeit aufgezeigt, wie diese Bedenken ausgeräumt werden könnten.

Die methodische Erhebung von Informationen unterliegt der Problematik, dass die erhobenen Informationen zum einen redundant sein können und zum anderen unvollständig sind. Die Redundanz ist auf die Art der Informationserhebung als auch auf das zu testende HAD System zurückzuführen. Diesen Bedenken ließe sich mit dem Einsatz einer Ontologie nachgehen, welche zur Modellierung und Identifizierung der observierten Zusammenhänge herangezogen werden kann. Die Problematik der Unvollständigkeit ist auf den offenen und zugleich evolvierenden Kontext zurückzuführen. Folglich sind fortwährende Observation des Kontextes unabdingbar, so dass evolvierenden Effekte erfasst werden können. Die Verwendung einer Ontologie birgt die Problematik, dass Zusammenhänge in und zwischen Beobachtungen modelliert wurden, die nicht der Realität entsprechen und somit Szenarien generiert werden, die nicht geeignet sind Nachweise hervorzubringen. Diesem Effekt könnte unter Verwendung von Systemwissen zur Plausibilisierung der modellierten Zusammenhänge nachgegangen werden. Aufgrund der Tatsache das jeder Detektor eine gewisse Unzulänglichkeit mit sich bringt, sollten Annahmen notiert werden, die für die Bewertung der Kritikalitätsmethodik herangezogen werden können, so dass nicht geeignete Szenarien für den jeweiligen Kritikalitätsdetektor maskiert werden können. Die Assoziationsmethodik identifiziert für jedes Szenario die Funktionalität, die das zu testende HAD System erbringen muss. Problematisch dabei ist die Identifikation von kombinierten Funktionalitäten. Bedenken bezüglich kombinierter Verhalten könnten unter Verwendung einer systematischen Wirkkettenanalyse adressiert werden. Nicht-gestützte Argumente können in Kombination der Relationsmethodik aus der fehlerhaften Spezifikation eines zu testenden Automatisierungsrisikos in Form eines Szenarios resultieren. Diesen Bedenken könnte dadurch nachgegangen werden, dass ein HAD System mit einem spezifischen Automatisierungsrisiko verwendet wird, um zu zeigen, dass das spezifizierte Szenario in der Lage ist eben dieses Automatisierungsrisiko nachzuweisen. Die Selektionsmethodik kann nicht-gestützte Argumente hervorbringen, sobald die Äquivalenzklassen-annahme bezüglich der selektierten und nicht-selektieren Szenarien verletzt ist. Diesen Bedenken lässt sich nachgehen, in dem die systematisch nicht selektierten Szenarien für die Variation eingesetzt werden. Damit ließen sich die Szenarien testen, die eigentlich nicht getestet werden sollten, ohne aber zusätzlichen Aufwand zu generieren, da die Robustheitsanalyse mittels Variation ohnehin Teil der Testmethodik ist. Sobald Szenarien methodisch variiert werden, können Bedenken dadurch hervorgehen, dass die variierten Szenarien nicht mehr als Nachweis für das intendierte Argumentationsziel verwendet werden können. Diese Bedenken lassen sich mittels der Evaluationsmethodik adressieren, indem beispielsweise geprüft wird, zu welchem Argumentationsziel die erbrachten Nachweise tatsächlich passen.

Diese Techniken und Ansätze lassen sich natürlich auch auf die verbleibenden Argumentationsziele (relativierend und induzierend) anwenden. Bei der genaueren Betrachtung dieser Ziele ist auffällig, dass die verwendeten Methoden sehr viel weniger Limitationen aufweisen, wie nachfolgend tabellarisch dargestellt.

<b>risikorelativierend</b>	<b>Ungenutzt</b>	<b>Gestützt</b>	<b>Nicht-gestützt</b>
Informationsgrund- lage		+	X
<del>Ontologie</del>			
Kritikalität	X	+	
Assoziation	X	+	
Relation	X	+	
Selektion		+	
<del>Variation</del>			
Evaluation	X	+	X

Tabelle 14: Limitationen der Methoden

Im Kontext der risikorelativierenden Betrachtung vermag die Ontologie als auch die Variationsmethodik keinen Beitrag zu leisten. Das ist darauf zurückzuführen, dass bei der risikorelativierenden Betrachtung ein Bezug zur menschlichen Leistungsfähigkeit hergestellt wird, welche sich gemäß dem Wissenstand des Pegasus Projektes nicht verallgemeinern lässt und somit weder die Ontologie zur Generation zusätzlicher Szenarien noch die Variation für die Erbringung von Nachweisen verwendet werden darf. Der Ausschluss dieser Methoden ist folglich darauf zurückzuführen, dass Änderungen an der Szenariospezifikation ebenso zusätzliche Informationen bezüglich der menschlichen Leitungsfähigkeit erfordern würden. Sofern diese aber nicht vorliegen, ist die Testmethodik nicht in der Lage entsprechende Nachweise für dieses Argumentationsziel zu erbringen.

<b>risikoinduzierend</b>	<b>Ungenutzt</b>	<b>Gestützt</b>	<b>Nicht-gestützt</b>
Informationsgrund- lage	X	+	
Ontologie	X	+	X
<del>Kritikalität</del>			
<del>Assoziation</del>			
Relation	X	+	X
Selektion	X	+	
Variation		+	X
Evaluation	X	+	X

Tabelle 15: Limitationen der Methoden II

Bei der Betrachtung der risikoinduzierenden Zielstellung ist auffällig, dass die Kritikalität als auch die Assoziationsmethodik keinen Beitrag an der Nachweiserbringung haben. Der Ausschluss dieser Methoden ist darauf zurückzuführen, dass ein unkritisches Szenario durch ein Automatisierungsrisiko eines HAD Systems erst kritisch wird, was es unmöglich machen

würde, diese vorab ohne Kenntnis des konkreten HAD Systemverhalten unter Verwendung eines Kritikalitätsmaßes zu identifizieren. Die Assoziation ist ebenso für den Nachweis eines Automatisierungsrisikos nicht zielführend, da es vorab unbekannt ist, welche Funktion im Verlaufe eines Szenarios eine Unzulänglichkeit aufzeigen kann und somit ein Automatisierungsrisiko darstellt.

In Folge der Verknüpfung von Nachweisen mit einer Sicherheitsargumentation und der identifizierten Limitationen, lassen sich die nachfolgenden Fälle unterscheiden:

1. Fall – Risiken durch die Testmethodik korrekt dargestellt
  - a. Positiv, wenn das getestete HAD System die Testfälle der risikomitigierenden oder –relativierenden Kategorie besteht.
  - b. Negativ, wenn das getestete HAD System die Testfälle der risikomitigierenden oder –induzierenden Kategorie nicht besteht.
  - c. Neutral, wenn das getestete HAD System die Testfälle der risikorelativierenden Kategorie nicht besteht oder aber wenn die Testfälle der risikoinduzierenden Kategorie bestanden werden.
2. Fall – Risiken durch die Testmethodik unterbewertet
  - a. Positiv, wenn das getestete HAD System die Testfälle der risikomitigierenden oder –relativierenden Kategorie besteht, sich aber daraus nicht-gestützte Argumente ergeben.
  - b. Negativ,
    - i. wenn das getestete HAD System die Testfälle der risikomitigierenden oder –induzierenden Kategorie nicht bestehen würde, diese Testfälle aber nicht getestet wurden und somit nicht als Nachweis herangezogen wurden.
    - ii. wenn das getestete HAD System die Testfälle der risikorelativierenden Kategorie nicht bestehen würde und das getestete Szenario auch als risikoinduzierend existiert, denn somit würde die Möglichkeit bestehen den negativen Testausgang neutral zu werten obwohl aufgrund des risikoinduzierenden Charakters die Nachweise hätten entzogen werden müssen.
3. Fall – Risiken durch die Testmethodik überbewertet
  - a. Negativ, wenn das getestete HAD System die Testfälle der risikomitigierenden oder –induzierenden Kategorie nicht besteht und die entzogenen Nachweise teilweise ungerechtfertigt waren.

### **2.2.2.12 Zusammenfassung**

Die Limitationsbewertung dient der Identifikation von möglichen Diskrepanzen zwischen den Nachweisen und den argumentierten Inhalten, wie im Rahmen der Testmethodik von Pegasus definiert. Folglich ist unter einer Limitation das Potential der Testmethodik zu verstehen, die Risiken eines HAD Systems infolge eines Szenarien-basierten Tests zu unterschätzen oder aber überschätzen.

Für die Identifikation derartiger Limitationen wurden Bewertungskriterien definiert, welche zum einen für die Bewertung der Methoden verwendet wurden und zum anderen für die Bewertung des Zusammenspiels der Methoden im Kontext der Sicherheitsargumentation. Im Rahmen von zahlreichen Konsultationen sowie Teilnahmen an Arbeitsgruppen konnte die Verwendbarkeit der definierten Bewertungskriterien aufgezeigt werden. Zudem hat sich bei diesen Analysen die von Pegasus erarbeitete Testmethodik als kohärent erwiesen.

Diese Kohärenz kann jedoch aufgrund von Limitationen beeinträchtigt werden, die auf die Implementierung der Methoden zur Instanziierung der Pegasus Testmethodik zurückzuführen sind. Um diese Limitationen zu erfassen, gilt es die methodischen Annahmen explizit zu machen, so dass die Effektivität der implementierten Methoden ausgewiesen werden kann. Um im Rahmen der Limitationsbewertung die verbleibenden impliziten Annahmen berücksichtigen zu können, sind Bedenken auszuweisen und diese unter Einbeziehung der Testmethodik systematisch auszuräumen.

Durch den Einsatz dieser Vorgehensweise konnte gezeigt werden, dass alle Methoden ein gewisses Potential für Limitationen aufweisen, welches zum einen die Eignung der Bewertungskriterien aufzeigt und zum anderen Fokuspunkte für die Implementierung einer solchen Testmethodik definiert. Zudem konnte im Rahmen der Limitationsbewertung gezeigt werden, dass gewisse Argumentationsziele, bspw. risikorelativierend und -induzierend, in der Lage sind methodische Limitationen zu maskieren, was es erlauben würde, die erforderlichen Aufwände zur Ausräumung von Bedenken zu reduzieren. Sollte es nicht gelingen die Bedenken bezüglich der implementierten Methoden zu identifizieren und diese anschließend auszuräumen, können daraus nicht-gestützte Sicherheitsargumente resultieren, welche zu einer Unterschätzung des Risikos führen würden. Unterschätzte Risiken würden dazu führen, dass die Testmethodik systematisch HAD Systeme akzeptierten würde, obwohl diese nicht-akzeptierte Risiken implizieren.

### **2.2.3 Zuordnung von Tests zu Prüfmethode(n) (UAP 2.2.4)**

Für die Bearbeitung des Bosch Beitrags im UAP2.2.4 hat Bosch das Institut für Regelungstechnik der TU Braunschweig unterbeauftragt. Details zu den hier vorgestellten Arbeiten können in der Veröffentlichung „**A Method for Classifying Test Bench Configurations in a Scenario-Based Test Approach for Automated Vehicles**“<sup>2</sup> (Markus Steimle) nachgelesen werden.

Zuerst hat das Institut für Regelungstechnik die Analyse der verschiedenen bekannten Prüfmethode(n) erarbeitet (siehe Tabelle 16) und eine Methodik zur Klassifizierung jener Prüfmethode(n) erarbeitet.

---

<sup>2</sup> <https://arxiv.org/abs/1905.09018>

Tabelle 1: Übersicht über die genannten Prüfstände nach Strasser (2012, S. 140)

	Software- in-the- Loop	Hardware- in-the- Loop	Driver- in-the- Loop	Vehicle- in-the- Loop	Realtest	
					Rapid- Prototyping	On Board Test
Fahrzeug- system	simuliert	real	simuliert oder real	simuliert oder real	simuliert	real
Fahrer	simuliert	simuliert	real	real	real	real
Fahrzeug	simuliert	simuliert	simuliert und / oder real	real	real	real
Umwelt	simuliert	simuliert	simuliert	real	real	real
Verkehrs- teilnehmer	simuliert	simuliert	simuliert	simuliert	real	real
Test von ...	Code	Steuergerät	Code / Steuergerät	Code / Steuergerät	Code	Steuergerät

Tabelle 16: Übersicht über Prüfstände nach Strasser (Strasser, 2012)

Dazu wurden auf Basis der am Institut für Regelungstechnik entwickelten funktionalen Systemarchitektur eines automatisierten Fahrzeugs Architekturen für verschiedene Prüfmethode entwickelt. Darauf aufbauend wurden Dimensionen abgeleitet, mit welchen die Prüfmethode eindeutig anhand real vorhandener, emulierter und simulierter Elemente klassifiziert werden können. Die Klassifizierung erfolgt auf Basis eines Kiviat-Diagramms (siehe Abbildung 8). Diese Klassifizierung bildet die Voraussetzung für eine mögliche Zuordnung von Testfällen auf Prüfmethode im Hinblick auf effizientes und effektives Testen.

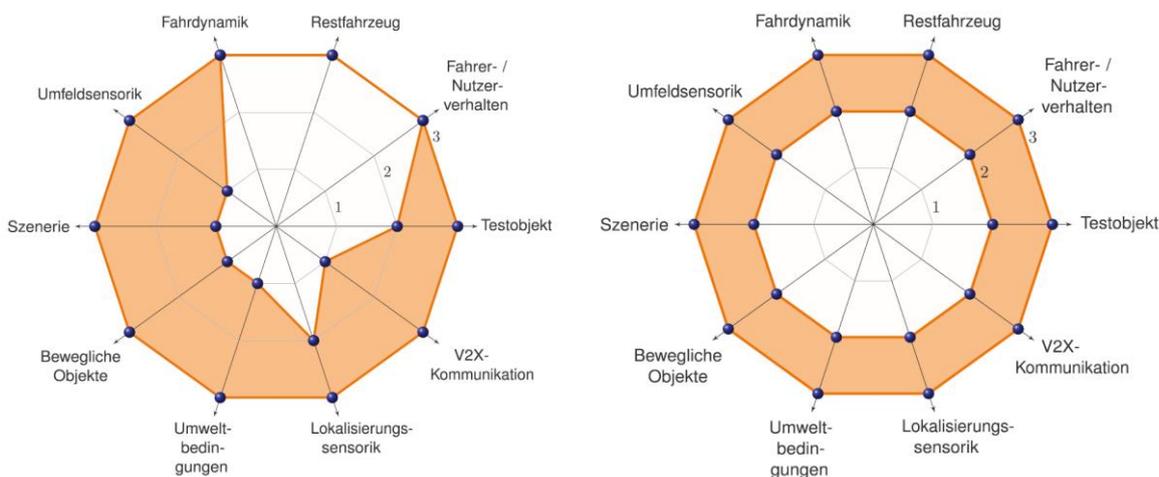


Abbildung 8: Kiviat-Diagramme; Links: Vehicle in the loop; Rechts: realer Fahrversuch

Aufbauend auf der Klassifikationsmethodik für Prüfmethode wurden zunächst bekannte Zuordnungsmethode analysiert und schließlich für nicht ausreichend befunden. Ein Ansatz für eine neue und erweiterte Methodik zur Zuordnung von Testfällen auf Prüfstände wurde entwickelt (siehe Abbildung 9).

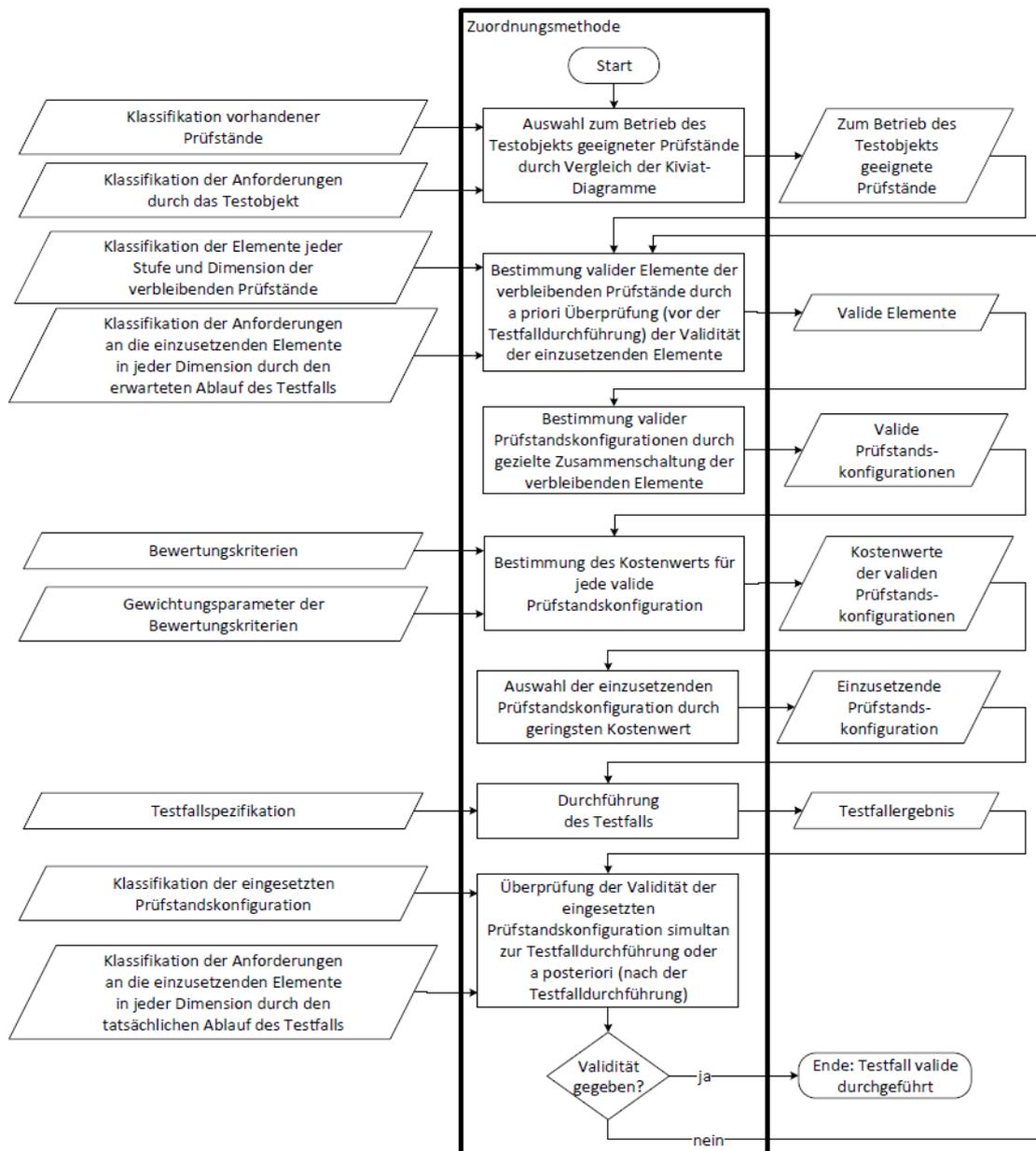


Abbildung 9: Ablauf der Test-Zuordnungsmethodik

Die Methode ist grundsätzlich in 7 Schritte aufgeteilt.

1. Durch Spezifizierung der Prüfanforderungen in einem Kivi-Diagramm können geeignete Prüfmittel durch Vergleich mit deren Kivi-Diagrammen ausgewählt werden.
2. Anforderungen an jedes Element des Kivi-Diagramms der Prüfanforderungen werden gestellt (z.B. an erwartetes Fahrzeugverhalten). Diese werden dann mit der Validität der Prüfmethode abgeglichen. Dazu ist zu bemerken, dass derzeit keine Validitätsmetriken für z.B. Sensormodelle, Simulationen oder Emulatoren verfügbar sind. Diese Fragestellung konnte im PEGASUS-Projekt (TP3) nicht abschließend beantwortet werden und bleibt ein Forschungsgegenstand.
3. Valide Prüfstandskonfigurationen werden bestimmt. Hierzu muss ebenfalls eine eigene Methodik entwickelt werden, welche die vielen Kombinationsmöglichkeiten ausdünn und auf valide beschränkt (z.B. erzeugen Sensormodelle keine realen Objekte)

4. Ein Kostenwert wird für jede valide Prüfstandskonfiguration mit Hilfe von Bewertungskriterien und Gewichtungsparemtern der Bewertungskriterien bestimmt. Eine mögliche Kostenmetrik wurde entworfen und vorgestellt.
5. Die Prüfstandskonfiguration mit dem geringsten Kostenwert wird ausgewählt.
6. Durchführung des Tests
7. Validität der Prüfstandskonfiguration wird geprüft.

Diese Methodik wurde am Beispiel eines einfachen Tests eines Einscherers exemplarisch angewandt.

Der Stand der Arbeiten wurde auf den TP2-Quartalstreffen sowie diversen Telefonkonferenzen vorgestellt und diskutiert. Einige Rückmeldungen aus den Diskussionen im Projekt wurden eingearbeitet.

#### **2.2.4 Identifikation von Automationsrisiken durch Analysemethoden (kein UAP)**

Diese Aktivität ließ sich keinem konkreten Arbeitspaket zuordnen.

Bosch hat die Erarbeitung der Analyse für Automationsrisiken durch Teilnahme an der regelmäßigen Telefonkonferenz unterstützt. Dabei wurden die Arbeitsfortschritte identifiziert und diskutiert, sowie Fragestellungen und zu klärende Punkte abgeleitet. Das Bosch-Feedback bezog sich dabei in der Regel auf folgende Themenkomplexe:

- Abgleich mit Bosch Erfahrungen aus der Anwendung der ISO 26262 bei der Herstellung von Fahrerassistenz-Systemen.
- Abgleich mit Definitionen und Sichtweisen der ISO 21448 (Bosch ist in der erstellenden Arbeitsgruppe vertreten).
- Einbringung von Erfahrungen mit SOTIF Analysen zum Auffinden von Automationsrisiken, die bereits bei Bosch durchgeführt wurden.
- Einbringung der Erfahrung als Sensorhersteller
- Fokus auf Anwendbarkeit der Methode, d.h. welche Teile können von welchen Personen durchgeführt werden.
- Bewertung von Automationsrisiken nach Verursachung

Dabei wurden keine eigenen Arbeitsergebnisse erzeugt.

#### **2.2.5 Abweichungen zur ursprünglichen BOSCH-spezifischen Aufgabenstellung in TP 2**

Es ergaben sich nur eine geringfügige Änderung:

1. Zusätzliche Teilnahme an Ausarbeitung einer Methodik zur Identifikation von Automationsrisiken (siehe 2.2.4)

### **2.3 TP 3: Testen**

#### **2.3.1 Entwicklung relevanter Use Cases (UAP 3.1.1)**

Die Use Cases sollen Autobahnchauffeur-Situationen repräsentieren, in der die Fahrfunktion aktiv eingesetzt wird. Bei bisherigen Fahrerassistenzsystemen war die Zahl der Use Cases limitiert, da sie nur für einen begrenzten Bereich eingesetzt wurden, wie beispielsweise der Totwinkel-Assistent, der mittels Ultraschallsensoren erkennt, ob sich ein bewegtes Objekt im

Bereich des Fahrzeugs befindet. Mit einem solchen Assistenzsystem sind verschiedene Verkehrssituationen mit bewegten oder unbewegten Objekten und verschiedenen Relativgeschwindigkeiten denkbar, die jedoch alle auf einige wenige Situationen beschränkt sind. Diese Anwendungsszenarien können beispielsweise auf Basis von Unfalldatenbanken erstellt werden, welche die zu vermeidenden Situationen darstellen, die durch das jeweilige Assistenzsystem verbessert werden sollen. Bei der vorliegenden Funktion des Autobahnchauffeurs findet keine situative Einschränkung mehr statt, sondern lediglich eine Funktionsbegrenzung in der der Autobahnchauffeur aktiv bzw. nicht aktiv sein darf. Im aktiven Funktionsbereich steht jede denkbare, auf der Autobahn auftretende Situation als möglicher Use Case zur Diskussion. Um sich dieser Use Case-Definition anzunähern, wurde der Parameterraum betrachtet. Dabei sollen lediglich Fahraufgaben Betrachtung finden und keine Szenarien hinsichtlich der Interaktion zwischen Mensch und Maschine (closed loop), wie beispielsweise die Übergabeszenarien der Fahraufgabe, oder auch Missbrauchsfälle des Systems werden im Folgenden explizit nicht betrachtet. Durch diese Übergabeszenarien gehen auch neue Frage- und Problemstellungen einher, wie z.B. Missverständnisse in der Übergabesituation, und daraus resultierende Folgeunfälle, weshalb diese Szenarien gesondert betrachtet und untersucht werden müssen. Im Umfang der PEGASUS-Projektumgebung wurden solche Fälle nicht weiter betrachtet.

### **2.3.1.1.1. Betrachtung und Erstellung Parameterraum**

Zunächst wurde der allgemeine Funktionsraum erschlossen, der aufzeigt, welche Einflüsse sich auf die Reaktion des Systems auswirken und wie dadurch Effekte auf das Testresultat entstehen können. Der Funktionsraum ermöglicht dadurch eine gezielte Variation der Testparameter. Abbildung 10 zeigt Einflussgrößen auf mögliche Verkehrssituationen. Die einzelnen Einflussgrößen werden im Folgenden auf die Relevanz hinsichtlich des Fahrmanövers bzw. des Use Cases kurz erläutert. Da das Modell des Fahrzeugumfeldes als Grundlage für die Routenplanung dient, ist die richtige Erstellung von diesem unabdingbar und viele der in Abbildung 10 aufgezeigten Einflussgrößen zielen auf eine Veränderung der Umwelt ab.

#### **I. Verkehrsteilnehmer:**

Road User stellen alle bewegten Objekte, die den Verkehr beeinflussen wie Personenkraftwagen, Lastkraftwagen oder Personen dar. Gesondert sind hier Transporter mit speziellen Ladungen oder Aufbauten erwähnt, da sie je nach Ausführung darüber hinaus zu Problemen bei der Erkennung führen können. Die Erkennung aller Verkehrsteilnehmer sowie der Geschwindigkeitserkennung und der Position der Verkehrsteilnehmer sind für die Einschätzung der Situation wichtige Parameter. Ein nicht detektiertes Objekt kann sehr schnell zu Kollisionssituationen führen.

#### **II. Straße:**

Die Straße beeinflusst durch die Beschaffenheit, die Topologie und den Verlauf, der mögliche Kurven enthält, die Reichweite der Sensoren. Zudem wirkt sie limitierend durch den Reibwert, wodurch Aktuatoren z.B. nur eine bestimmte Bremskraft aufbringen können, um ein Blockieren der Räder zu vermeiden. Auch die Spurführung kann durch eine doppelte Spurführung (gelbe und weiße Markierungen), beispielsweise auf Baustellen vorkommend, massive Auswirkungen auf das vorliegende Szenario haben. Zudem ist eine verschmutzte oder generell schwierig zu detektierende Spur auch für den Verlauf eines

Szenarios relevant. Das System muss auch mit nicht leicht erkennbarer Spurführung oder limitierter Reichweite zurechtkommen können.

### **III. Verkehrsregeln:**

Die meist länderspezifischen Verkehrsregeln sind durch das System zwingend zu berücksichtigen. So gilt z.B. in Deutschland das Rechtsfahrgebot, wodurch bei freier rechter Fahrspur das System sich stets dort einzuordnen hat. Auch Verkehrszeichen, wie Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Überholverbote, sind zu detektieren und richtig zu interpretieren. Dies ist im Wesentlichen Aufgabe der Sensorik.

### **IV. Umfeld:**

Das Umfeld stellt in diesem Fall alle statischen Objekte wie Tunnel oder Brücken, Baustellen oder Objekte wie Autoreifen oder eine Getränkedose auf der Fahrspur dar. Das System muss die Objekte erkennen und in die Planung des Fahrmanövers einbeziehen. Die Reaktionen sollten besonders bei Hindernissen auf der Fahrbahn angemessen sein. Dabei sind in dieser Kategorie sowohl die Sensorik als auch die Situationsanalyse in besonderem Maße beeinflusst.

### **V. Fahrzeug:**

Das verwendete Fahrzeug wirkt sich ebenso in großem Maße auf die Fahrsituation aus, da durch das Bremsvermögen des Fahrzeugs, der Zustand der Reifen, etc. die Performance der Aktuatorik eingeschränkt werden kann. Zudem hat baulich bedingt ein LKW andere Möglichkeiten z.B. hinsichtlich Beschleunigung als ein Sportwagen.

### **VI. Sensor-Set:**

Die Wahl der eingesetzten Sensoren wirkt sich direkt auf die Güte des Umweltmodells aus. Dabei müssen nicht detektierte Objekte, sogenannte „false-negative“-Ereignisse ebenso vermieden werden wie „false-positive“-Ereignisse, welche Objekte meint, die berücksichtigt werden, obwohl sie nicht vorhanden sind. Ein weiterer Aspekt, der in das gesamte Fahrmanöver einfließt, ist die Aktualität der Daten und somit die Verarbeitungsgeschwindigkeit des Systems bis eine Fahrzeugreaktion erfolgt. Ebenso spielt die Einbauposition der Sensoren und die sich daraus ergebende Abdeckung des Fahrzeugumfeldes eine entscheidende Rolle bei der Güte der Daten.

### **VII. Wetter:**

Nahezu alle Sub-Systeme können durch diesen Parameter beeinflusst werden. So ist beispielsweise die Reichweite der Sensoren von den Wetterbedingungen ebenso abhängig wie der Reibwert und dadurch die mögliche Aktuator-Performance. Zudem stellt dieser Einflussparameter große mögliche Varianz dar, da viele verschiedene Zustände, wie gerrierender Regen über Sonnenschein bis zu Schneeverwehungen, denkbar sind.



Abbildung 10: Einflussparameter auf die Fahrmanöver

Im Kontrast zu der Darstellung in Abbildung 10 beeinflussen die Parameter nicht nur das Fahrmanöver und die Performance des Autobahnchauffeurs, sondern wie oben erläutert, sich auch gegenseitig. Verkehrsregeln wirken beispielsweise auf die Bewegung der anderen Verkehrsteilnehmer sich ebenso aus wie der Straßenverlauf oder die Wetterbedingungen. Durch diese Querbeeinflussungen führt eine Änderung eines Parameters nicht ausschließlich zu einem geänderten Fahrmanöver durch die direkte Beeinflussung des Verhaltens des Autobahnchauffeurs, sondern auch indirekt durch das geänderte Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer. Es wird deutlich, dass sehr viele Einflussparameter die Reaktion des Autobahnchauffeurs beeinflussen können und eine Kombination aller Variationen nicht in angemessener Zeit darstellbar ist. Deshalb wurde bei der Definition der Use Cases kein Anspruch auf Vollständigkeit gelegt, sondern eher exemplarisch mögliche Szenarien definiert.

### 2.3.1.1.2. Exemplarische Use Case Entwicklung

Um Use Cases für das Gesamtsystem „Autobahnchauffeur“ zu finden, werden Open-Loop-Fahrsituationen betrachtet, die während einer Autobahnfahrt typischerweise auftreten. Dabei

werden Anwendungsszenarien der Interaktion zwischen Mensch und Maschine wie die Fahrzeugübergabe Betrachtung sowie ein möglicher Missbrauch im Rahmen der vorliegenden Szenarien nicht betrachtet. Der Szenarienkatalog besteht aus vielfältigen Verkehrssituationen, die für den Fahrer auf einer Autobahnfahrt auftreten können. So beginnen Fahrer-Manöver meist mit der Auffahrt und dem Einscheren des Ego-Fahrzeugs und reichen über das Überholen von anderen Verkehrsteilnehmern bis zu Baustellen- oder Hindernis-Situationen. Dabei werden von den oben genannten Parametern lediglich das Umfeld und die Verkehrsteilnehmer in den betrachteten Situationen variiert; alle weiteren Parameter sind auf nahezu jeden Anwendungsfall anwendbar und können bei der Definition des Testfalls Berücksichtigung finden. So sind beispielsweise die Wetterverhältnisse für jede Situation entscheidend, da dadurch die Sichtweite des Systems verringert werden kann und somit prinzipiell auf jeden Use-Case anwendbar ist. Dabei kann dann auch eine Variation der Verkehrsteilnehmer (im Folgenden auch VT) stattfinden, dies muss jedoch auf die Sinnigkeit geprüft werden. Es ist beispielsweise unwahrscheinlich, dass ein Tier das Ego-Fahrzeug überholt, was jedoch für einen LKW oder Motorradfahrer durchaus möglich ist. Die Entwicklung von Anwendungsfällen soll im Folgenden exemplarisch beschrieben werden. In der folgenden Abbildung 11 ist der Anwendungsfall „schnellerer Verkehrsteilnehmer schert ein“ abgebildet. Es wird zu jedem Anwendungsfall eine skizzenartige Veranschaulichung erstellt, um den Anwendungsfall eindeutig zu beschreiben. Dabei wurde der Anwendungsfall auf die relevanten Verkehrsteilnehmer reduziert.

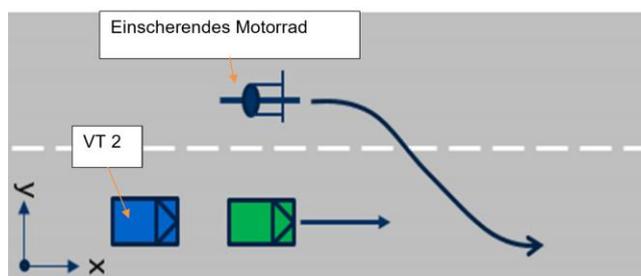


Abbildung 11: Exemplarischer Anwendungsfall des Autobahnchauffeurs

Bei diesem Szenario sind drei Verkehrsteilnehmer notwendig, um das Einscheren als Situation zu beschreiben. Dies stellt das einscherende Fahrzeug (in diesem Fall ein Motorrad) sowie ein dem Ego-Fahrzeug folgendes Fahrzeug dar. Das folgende Fahrzeug schränkt den Handlungsspielraum des Autobahnchauffeurs hinsichtlich eines Bremsengriffs ein, da ein zusätzlicher Parameter eines möglichen Auffahrunfalls berücksichtigt werden muss und gleichzeitig einer Kollision mit dem einschierenden Motorrad vorgebeugt werden sollte. In dem vorliegenden Use Case hat der Motorradfahrer ein aggressives Fahrverhalten. Diese Situation sollte die Funktion eines Autobahnchauffeurs beherrschen, ohne den Motorradfahrer, sich oder andere Verkehrsteilnehmer zu gefährden. Die gewünschte Reaktion des Autobahnchauffeurs ist ein frühzeitiges, langsames Abbremsen, um den folgenden Verkehr nicht zu gefährden und gleichzeitig eine Kollision mit dem Motorrad zu vermeiden. Dabei ist auch eine leichte Kurskorrektur an den rechten Rand der Fahrbahn denkbar, um den Bremsweg zu verlängern und auf der Fahrbahn Platz für die Bewegung des Motorrads zu schaffen.

Wichtige Kenngrößen um diesen Anwendungsfall zu beschreiben, sind ebenso definiert. Es sind neben Parametern des Ego-Fahrzeugs wie Geschwindigkeit und Position in der Spur,

Kenngößen der Spur wie Spurbreite oder Kurvenradius und Relativwerte der anderen Verkehrsteilnehmer in Bezug zum Ego-Fahrzeug wie Relativgeschwindigkeit, Abstände und Beschleunigung als entscheidende Kenngößen identifiziert. Mit derselben Vorgehensweise wird für alle definierten Anwendungsfälle verfahren. Eine Auswahl der Anwendungsfälle sind zur Übersicht in Tabelle 17 dargestellt.

Anwendungsfall		
Fahren ohne VT	Folgefahrt	Stau (hinter Kurve)
Folgefahrt zwischen VT	Überholen ohne Spurwechsel	Vorausfahrender VT überholt
Vorausfahrender VT fährt ab	Vorausfahrender VT hält auf Standstreifen	Schnellerer VT schert ein (Beispielszenario Abbildung 5)
Langsamere VT schert ein	VT fährt auf Autobahn auf	Ego hält auf eigener Spur (techn. Fehler)
Ego hält auf Standstreifen (techn. Fehler)	Fußgänger auf eigener Spur	Tier auf Autobahn
Stationäres Hindernis in Ego Spur	Spur geschlossen	Brennendes Fahrzeug auf Standstreifen
Rettungsgasse bilden	Baustelle	Spurwechsel/Ausweichen mehrerer Fahrzeuge

Tabelle 17: Auswahl der Anwendungsfälle für den Autobahnchauffeur (VT = Verkehrsteilnehmer)

### 2.3.1.1.3. Definition der Koordinatensysteme

Wie in der Fahrdynamik üblich, zeigt die x-Achse des Fahrzeugkoordinatensystems in Fahrtrichtung und die z-Achse nach oben. Somit zeigt die y-Achse nach links, da es sich um ein kartesisches Rechtssystem handelt. Zusätzlich wird, wie in Abbildung 12 ersichtlich, ein globales Koordinatensystem eingeführt, das an der Fahrbahn ausgerichtet ist, wobei die x-Achse in Fahrtrichtung der Fahrzeuge (des Ego-Fahrzeugs) und die z-Achse nach oben zeigen. In der unten dargestellten Grafik ist das globale Koordinatensystem zur besseren Veranschaulichung mit den Indizes G und das Koordinatensystem des Ego-Fahrzeugs mit dem Index E versehen.

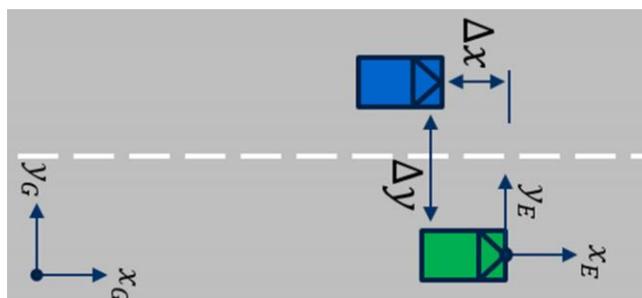


Abbildung 12: Verwendete Koordinatensysteme & Abstände der Verkehrsteilnehmer

Die Relativgrößen wie beispielsweise die Abstände der Fahrzeuge zueinander in x-Richtung sind, wie in Abbildung 12 veranschaulicht, von Stoßstange zu Stoßstange zu verstehen. In y-Richtung wird der Abstand als die kürzeste Strecke der jeweils zugewandten Seite der Fahrzeuge bezüglich des Ego-Fahrzeugs beschrieben.

Mittels dieser festgelegten Koordinatensysteme werden die verschiedenen Testfälle beschrieben.

Die Angabe des Geschwindigkeitsvektors ist als Betrag der Geschwindigkeit zu verstehen und bezieht sich als absolute Geschwindigkeit jeweils auf das globale Koordinatensystem, wobei keine Unterscheidung bezüglich der x- und y-Komponente der Geschwindigkeit getroffen wird. Dem gleichen Prinzip folgend wird auch die Beschleunigung als Betrag angegeben. Lediglich bei der Bewertung der Testszenarien und bei den dabei vorhandenen Messgrößen wird die Längs- und Querschleunigung getrennt betrachtet. Bei der weiteren Definition der Testfälle wird aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Abbildung des Koordinatensystems des Ego-Fahrzeugs verzichtet und die Indizes des globalen Koordinatensystems weggelassen.

#### 2.3.1.1.4. Ableitung von Test Cases

Von den beschriebenen Testmanövern, die eine Darstellung der vorkommenden Verkehrssituationen darstellen, gilt es Testfälle abzuleiten. Dabei wird zunächst ein Extremfall betrachtet, um die höchsten Anforderungen an das Testequipment abzuleiten. Ein weiterer möglicher Ansatz wäre die Betrachtung aller Varianten der Use Cases, was jedoch unwirtschaftlich wäre, da zur Anforderungsdefinition an das Testequipment nur die höchste Belastung ausschlaggebend ist und dadurch auch alle anderen Anwendungsfälle abgedeckt werden können. Bei der Worst-Case-Betrachtung werden auch Fälle, die die Systemgrenzen austesten berücksichtigt, um das System so gut wie möglich auszureizen.

#### 2.3.1.1.5. Definition der Parameter

Zunächst werden die Rahmenbedingungen der Testfälle erstellt. Dabei soll lediglich mit so vielen Parametern wie erforderlich, die Aussagefähigkeit eines Test Cases erreicht werden, um die Testfälle möglichst eindeutig zu beschreiben und dabei die Übersichtlichkeit zu wahren. Des Weiteren soll ein einheitliches Layout der Darstellung der Test Cases erreicht werden, um ein Einfaches zurechtfinden zu ermöglichen. Die Parameter wurden von den zuvor bestimmten Einflussparametern abgeleitet. Die Parameter werden zunächst drei Kategorien zugeordnet, um die Übersichtlichkeit zu verbessern und durch gezielter Variation von Parametern die Test Cases zu erstellen.

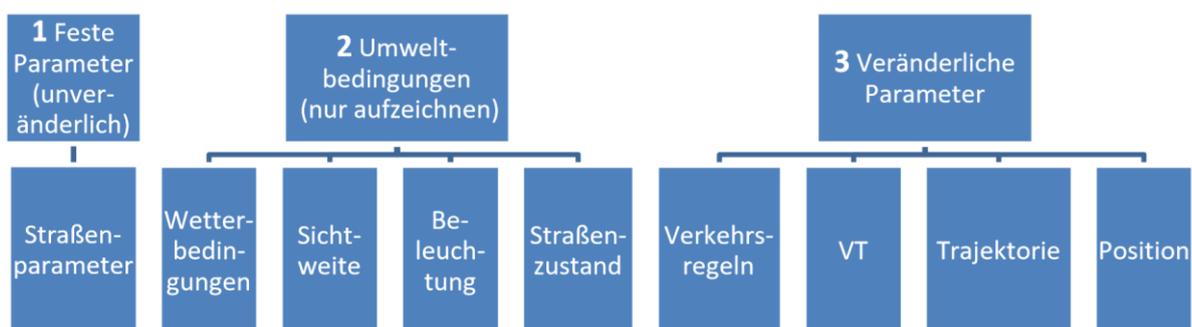


Abbildung 13: Verschiedene Kategorien der Testmanöver

Parameter der ersten Kategorie sind baulich festgelegt, wohingegen Parameter der zweiten Kategorie nicht gezielt verändert werden, da sie entweder nicht mit annehmbarem Aufwand reproduzierbar veränderbar sind oder grundsätzlich im ersten Schritt keinen Einfluss auf die

Auswahl des Testequipments haben. Die dritte Kategorie enthält Parameter, die gezielt verändert werden und das Testmanöver und Anforderungen an das Testequipment enthalten. In Abbildung 13 sind die drei Kategorien mit den jeweils repräsentierenden Parametern abgebildet und zeigen die Einteilung auf.

#### **2.3.1.1.6. Unveränderliche Parameter**

Die erste Kategorie sind feste Parameter, die streckenabhängig sind. Diese Testparameter können nur mit großem zeitlichem und finanziellem Aufwand geändert werden und werden daher in den Testfällen als konstant angenommen. Zu den Parametern gehört dabei neben Spurbreite und Steigung auch die Quer-neigung oder Kuppen. Um die Vergleichbarkeit der Tests zu gewährleisten sind sie bei der Testdurchführung zu dokumentieren, um ungewollte Einflüsse auf das Testergebnis durch diese Parameter ausschließen zu können. In Deutschland sind die Randbedingungen für den Straßenbau nach den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA) geregelt und festgelegt. Jedoch gilt es zu beachten, dass ausschlaggebend für den Wertebereich dieser Parameter meist die geltenden Gesetze des jeweiligen Landes sind und deshalb eine große Parametervielfalt herrscht, die so nicht auf einer Teststrecke, bzw. nur durch sehr hohen Aufwand bedingt, abgebildet werden kann. Als Orientierungswerte der Streckenbedingungen wurden bei der Entwicklung der Testfälle die oberen bzw. unteren Randwerte der RAA entnommen und als Grenzwerte angesetzt.

#### **2.3.1.1.7. Aufzuzeichnende Parameter**

Unter der zweiten Kategorie sind die Umweltbedingungen zusammengefasst, zu welchen unter anderem sowohl **Verkehrsregeln** als auch **Wetterbedingungen** zählen. Sie sind prinzipiell veränderlich und sollten bei Testmanövern auf Teststrecken in einem gewissen Rahmen gezielt variiert werden. Dies ist für jeden Parameter getrennt zu betrachten und der entstehende Erkenntnisgewinn dem Aufwand gegenüber zu stellen. Die Varianz der jeweiligen Parameter wurde dabei definiert, sodass ein Überblick über den jeweiligen Zustandsraum der Parameter gewonnen wird.

So sind Wetterbedingungen wie Regen, Schnee, Nebel, Sonnenschein oder Eis möglich; inklusive überschneidender Wetterereignisse wie gefrierender Regen, etc. Diese können und sollen jedoch nicht in ihrer gänzlichen Breite auf der Teststrecke abgebildet werden, da eine Nachstellung der Wetterereignisse zum einen kostenintensiv und zudem nicht zwingend für die Teststrecke notwendig ist, da eine gewisse Varianz durch das Testen an verschiedenen Tagen zu verschiedenen Zeiten gegeben ist, bei denen die Wetterlage variieren kann. Nichts desto trotz kommt der Wetterlage, besonders beim Einsatz von Videokameras, eine entscheidende Bedeutung zu. So ist zum Beispiel der Sonnenstand während des Testmanövers relevant, da dadurch die Optik des Sensors geblendet werden kann bzw. das Sensorelement durch den hohen Lichteinfall sich in Sättigung befinden könnte und keine anderen Reflektionen wahrnehmbar sind. Die vollständig „geblendete“ Videokamera muss auf der Teststrecke nicht zwangsläufig durch einen variierenden Sonnenstand ausgedrückt werden, sondern kann elektronisch durch z.B. Abschalten oder Abdecken der Stereokamera als Informationslieferant geschehen.

Ein weiterer entscheidender Parameter für die Tests auf Teststrecken ist der **Reibwert** der Fahrbahn, der sich meist aus den Wetterverhältnissen ergibt, aber auch von dem Untergrund

der Strecke abhängig ist. Dieser Parameter kann in weiterführender Betrachtung der Testmanöver variiert werden.

In der ersten Definition der Testfälle im PEGASUS Projekt werden nur high- $\mu$  Testfälle, also Fälle mit relativ trockener Fahrbahn und hohem Reibwert Betrachtung finden, da die Wetterverhältnisse als konstant bzw. nicht gezielt variierbar angenommen werden.

Die **Sichtweite** bzw. die Reichweite der Sensoren, also der Bereich in dem die Sensorsignale verwertbar sind, ist stark von der Umwelt abhängig.

Die Reichweite der Sensoren, was der Sichtweite als Äquivalent beim menschlichen Fahrer entspricht, kann dabei sowohl durch andere Verkehrsteilnehmer, wie auch durch Kurven oder schwierige Wetterbedingungen wie dichten Schneefall oder Regen negativ beeinflusst werden. Dabei stellen Kurven auf Teststrecken ein einfaches wirtschaftliches Mittel dar, um die Sichtweite der Sensoren einzuschränken. Zudem erschweren Verkehrsteilnehmer mit geringem Abstand zum Ego-Fahrzeug und großer Anzahl die Detektion des Umfelds, da dies teilweise verdeckt wird.

Die Verkehrszeichen bzw. die Verkehrsregeln sind ein weiterer Umweltfaktor, der zu berücksichtigen ist. Sie können von Land zu Land variieren und beeinflussen das Verhalten der HAF im Sinne der zwingenden Einhaltung der Verkehrsregeln durch das System. Dabei sind sowohl Geschwindigkeitsbegrenzungen als auch Überholverbote oder Ampeln denkbar. Die Erkennung der Verkehrszeichen, sei es visuell oder durch Informationen aus einer hochgenauen Karte, ist essenziell für die Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen. Die Verkehrsregeln sollen dabei zu jeder Zeit des Einsatzes des Systems gelten. In den Test Cases soll dabei auch die Erkennung und angemessene Reaktion auf Verkehrszeichen Teil der Prüfung sein. Die Varianz wird jedoch durch Realfahrttests auf Autobahnen in verschiedenen Ländern dargestellt. Alle Parameter der zweiten Kategorie sollten bei der Durchführung der Test aufgezeichnet werden, um eine Vergleichbarkeit der Tests zu erreichen. Dies muss nicht zwangsläufig durch Messungen geschehen, sondern kann auch durch den Testfahrer dokumentiert werden. Die Parameter der zweiten Kategorie werden zunächst nicht gezielt variiert, da dies den Aufwand in einem nicht vertretbaren Maße erhöhen würde und in der Erkenntnisrelevanz beschränkt bleiben würde, da das Ziel der Entwicklung der Testmanöver in der Ableitung von Anforderungen an das Testequipment liegt. Es ist zu berücksichtigen, dass die Parameter der zweiten Kategorie einen großen Einfluss auf das Testresultat haben und auf Teststrecken in angemessenem Maße zu variieren sind. Dies wird an dieser Stelle jedoch nicht durchgeführt, da es zu keiner besonderen Anforderung an das Testequipment führen würde, sondern höchstens ein Infrastrukturthema für Anforderungen an die Teststrecke selbst darstellt. Ähnlich verhält es sich mit einer Fehlfunktion einzelner Sensoren (z.B. durch tiefen Sonnenstand), die in der Ausarbeitung des Testmanöverkatalogs eine Rolle spielt, jedoch für die grundsätzlichen Anforderungen an das Testequipment zu weit führt.

#### **2.3.1.1.8. Veränderliche Testparameter**

Die dritte Kategorie stellt die veränderlichen Testparameter dar, die zur Beschreibung der Situation herangezogen werden. Diese Parameter sollen sowohl die in den Testfall eingebundenen Verkehrsteilnehmer als auch das eigene Fahrzeug beschreiben. Dabei ist es wichtig Parameter zu wählen, die einfach definierbar und messbar sind, was beispielsweise die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit zu einem geeigneten Parameter macht. Die wegabhängigen

Größen sollen dazu beitragen, dass das Ego-Fahrzeug und dessen Bewegung (Trajektorie) möglichst genau beschrieben wird. Dazu gehören die Position des Ego-Fahrzeugs in der Spur, die momentane Geschwindigkeit sowie die aktuelle Beschleunigung. Darüber hinaus sollten auch mögliche Kurvenrichtungen und deren Radien berücksichtigt werden (in Abbildung 14 als Trajektorie zusammengefasst). Somit ergeben sich fünf Parameter mit denen sich die Situation des Fahrzeugs ziemlich genau beschreiben lässt. Für eine detaillierte Manöverbeschreibung ist die Definition einer Trajektorie denkbar, die jedem Zeitpunkt des Testfalls eine bestimmte Position zuweist und dadurch sowohl der aktuelle Lenkwinkel als auch Größen wie benötigte Geschwindigkeit und Beschleunigung von der Trajektorie abgeleitet werden können.

### 2.3.2 Systematik der Definition der Test-Cases (UAP 3.1.2)

Bei der Konzeption der Testfälle wurden nach der Festlegung des Parameterraums, der verändert werden soll, einige grundlegende Annahmen getroffen, die bei jedem Test Case Berücksichtigung finden sollen. So sind die geltenden Verkehrsregeln seitens des Autobahnchauffeurs immer einzuhalten und zu beachten, auch unabhängig davon welche Verkehrssituation vorherrscht. So soll beispielsweise der in Abbildung 14 aufgezeigte Fall, dass bei geltendem Tempolimit mittels einer Überschreitung der Geschwindigkeitsbeschränkung auf die linke Spur gewechselt wird, um einen Unfall mit einem Hindernis auf der Fahr-bahn des Ego-Fahrzeugs zu vermeiden und ebenso Kollisionen mit den linksseitigen Verkehrsteilnehmern auszuschließen, nicht betrachtet werden. Bei der unten abgebildeten Verkehrssituation fährt der Verkehrsteilnehmer eins etwas langsamer als das Tempolimit und das vorausfahrende Fahrzeug etwas schneller, sodass hier ein Einscheren problemlos möglich wäre.

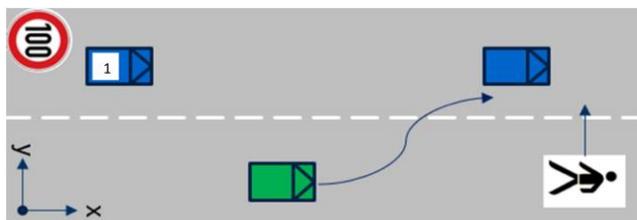


Abbildung 14: Beispiel eines Test Cases mit ethischer Fragestellung

Das Beispiel in der Abbildung aufgreifend, werden im ersten Schritt auch keine ethischen Fragestellungen betrachtet, da hierzu der rechtliche Rahmen erst einzuschätzen ist. Ein Beispiel für eine ethisch schwierige Situation wäre der Fall, dass mehrere Menschen sich auf der Fahrbahn befinden und das Vermeiden einer Kollision physikalisch nicht mehr möglich ist. Dabei ist vorstellbar, dass auf der linken Spur sich z. B. drei Menschen befinden und auf der rechten Spur ein Mensch steht, auf den das Ego-Fahrzeug zufährt. Im Sinne der Schadensbegrenzung könnte der Autobahnchauffeur auf den einzelnen Menschen zufahren, was jedoch ethisch durchaus sehr umstritten ist, da es eine Bewertung der Menschenleben beinhaltet würde. Es steht zum jetzigen Zeitpunkt schon fest, dass laut Ethik-Kommission Sachschaden einem Personenschaden stets vorzuziehen ist. Der vollständige rechtliche Rahmen zu Fragestellungen bei Kollisionen wird seitens der Bundesregierung in einer eingesetzten Ethik-Kommission ausgearbeitet. Kuppen ähnliche Situationen können auf Testgeländen durch einen geringen Abstand beim Teststart zu anderen Verkehrsteilnehmern oder Hindernissen abgebildet werden. Hieraus kann die Reaktionsfähigkeit des Autobahnchauffeurs abgeleitet bzw. getestet werden und solche Extremsituationen wie beispielsweise ein auftretendes Hindernis hinter einer Kuppe oder Kurve, das erst sehr spät im Vergleich zu einer ebenen Geraden

detektiert wird, abgebildet werden. Für eine präzise Beschreibung eines Testfalls ist eine geplante Trajektorie von Nöten aus der alle Kennwerte wie Lenkwinkel, Geschwindigkeit oder Position in der Fahrspur abgeleitet werden können. Die Trajektorie ist eine gute Möglichkeit, um alle Parameter abzuleiten und auch den entsprechenden repräsentierten Verkehrsteilnehmern bereitzustellen, sodass diese eine geplante Route abfahren können. Da die erste Definition der Test Cases lediglich dazu dienen soll die Anforderungen für das benötigte Equipment der anderen Verkehrsteilnehmer abzubilden, wird nur der Anfangs- und Endwert eines Testfalls festgehalten, da dabei meist schon die maximalen Parameter auftreten. Wird während des Testfalls ein höherer Wert der Parameter erreicht, wie beispielsweise eine auftretende maximale Verzögerung in Form einer Vollbremsung, wird dies darüber hinaus dokumentiert.

#### **2.3.2.1.1. Bestimmung der Randparameter der Verkehrsteilnehmer**

Es gilt zuerst die Systeme beziehungsweise die Verkehrsteilnehmer zu kennen und so mögliche Parameter einzugrenzen, um einen Anhaltspunkt für die physikalischen Grenzen bei der Konzeption der Test Cases zu haben. Die aktuelle Generation des Autobahnchauffeurs unterstützt seitens des Systems Geschwindigkeiten bis 130 km/h, weshalb dies eine erste Eingrenzung der Geschwindigkeitswerte darstellt.

Zudem ist die Beschleunigung eingeschränkt, weshalb hier eine maximale Verzögerung von  $a = -10 \text{ m/s}^2$  und eine maximale Beschleunigung von  $a = 6 \text{ m/s}^2$  angesetzt wird. Bei der Entwicklung der Test Cases gilt es zu berücksichtigen, dass nicht jedes Fahrzeug eine Verzögerung bzw. Beschleunigung in diesem Maße leisten kann. Jedoch muss ein in Deutschland zugelassenes Fahrzeug selbst bei einer einzelnen elektrischen Funktionsstörung mindestens eine mittlere Verzögerung von  $a = -5,15 \text{ m/s}^2$  besitzen. Daraus kann sich ein Mindestwert der Verzögerung für die anderen Verkehrsteilnehmer ableiten lassen. Zudem sind auch Beschleunigungswerte durch den Anwendungsfall eingeschränkt. So wird in 99,9 % der Fälle von Fahrzeugen auf der Autobahn eine Querschleunigung von 2-3  $\text{m/s}^2$  nicht überschritten.

Die Standardposition des Autobahnchauffeurs wurde als spurmittig angenommen, da hier andere Verkehrsteilnehmer die geringste Beeinträchtigung erfahren. Dabei muss berücksichtigt werden, dass von diesem Standard bei besonderen Situationen, wie einem detektierten Hindernis auf der eigenen Fahrspur, abgewichen werden soll. Andere Verkehrsteilnehmer werden hinsichtlich ihrer Start- und Ziel-Position relativ zum Ego-Fahrzeug in x- und y-Richtung eindeutig festgelegt. Dabei wurden als mögliche Startwerte Abstände bis 250 m zugelassen, da die verschiedenen Sensoren selbst durch Weiterentwicklungen nicht bei größeren Abständen zuverlässig Objekte wahrnehmen können und des Weiteren der Platz auf einem Testgelände begrenzt ist und deshalb die Manöver nicht zu große Distanzen einnehmen sollten. Zudem werden weitere Verkehrsteilnehmer mittels ihrer absoluten Geschwindigkeit  $v$  sowie ihrer absoluten Beschleunigung  $a$  definiert. Die maximale Geschwindigkeit wurde bei 330 km/h definiert. Solche hohen Geschwindigkeiten und die Reaktion des Systems darauf sollten ausschließlich auf Testgeländen getestet werden. Sie sind jedoch ausschließlich für eine Grenztests auf der Teststrecke relevant, sondern werden vielmehr einer genaueren Analyse mittels Simulation unterzogen. Die meisten Länder besitzen eine generelle Geschwindigkeitsbegrenzung von 130 km/h, weshalb Test Cases bis 150 km/h eine sehr hohen Test Case Abdeckungsgrad aufweisen und auch wegen der Begrenzung der Geschwindigkeit des Systems auf 130 km/h meist keinen Mehrwert bringen.

Der Begriff Verkehrsteilnehmer wird bei der Beschreibung der Test Cases relativ weit gefasst. So werden andere Personenkraftwagen (PKW), Lastkraftwagen (LKW), Gütertransporte oder Fahrzeuge mit speziellen Ladungen wie Holz, Bauschutt oder Bootsanhänger genauso wie Fußgänger, Tiere oder Hindernisse als Verkehrsteilnehmer dargestellt.

### 2.3.2.1.2. Ausarbeiten des Testmanövers

Anhand des Anwendungsfalls, dass das dem Autobahnchauffeur vorausfahrende Fahrzeug überholt, soll das Vorgehen und die Erstellung eines Testmanövers verdeutlicht werden. Zuerst wird im Folgenden das Testmanöver beschrieben. In diesem Testmanöver wechselt das dem Ego-Fahrzeug (in Abbildung 15 grün markiert) vorausfahrende Fahrzeug (vergleiche Abbildung 15 Verkehrsteilnehmer zwei) auf die linke Spur. Der Verkehrsteilnehmer drei (im Folgenden auch VT3) fährt in diesem Fall sehr langsam, weshalb der Autobahnchauffeur normalerweise ebenso auf die linke Spur wechseln würde, wovon er jedoch von Verkehrsteilnehmer eins (im Folgenden auch VT1), der als Motorrad ausgeführt werden kann, abgehalten wird. In Abbildung 15 ist das Manöver zur Verdeutlichung skizzenhaft dargestellt. Die Autobahn besitzt in diesem Fall lediglich zwei Spuren. Die meisten Testmanöver wurden auf höchstens zwei Spuren reduziert, um möglichst effizient testen zu können, da sonst eine exklusive Sperrung der Teststrecke notwendig werden könnte, was die Kosten und für einen Test extrem steigert und die Flexibilität und Verfügbarkeit gleichzeitig verringert.

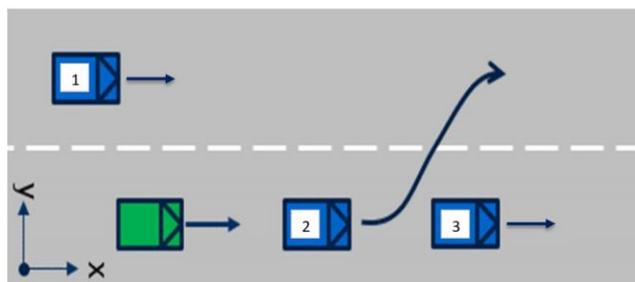


Abbildung 15: Skizze zum Testmanöver "Vorausfahrendes Fahrzeug schert aus"

Ziel dieses Tests ist, dass zunächst die Geschwindigkeit des dritten Verkehrsteilnehmers angenommen wird, nachdem Verkehrsteilnehmer Nr. 2 anfangs mit höherer Geschwindigkeit und ausreichendem Sicherheitsabstand gefolgt wurde. Zudem sollte Verkehrsteilnehmer eins erkannt werden und daraus folgernd ein Überholmanöver vermieden werden.

Zur Steigerung der Testeffizienz ist es denkbar ein weiteres Manöver mit diesem Testfall zu verbinden. Dabei könnte das Ego-Fahrzeug das langsam vor ihm fahrende Fahrzeug (VT3) überholen, nachdem Verkehrsteilnehmer Nr. 1 auf der linken Fahrspur am Ende des Manövers beschleunigt hat und somit Platz für ein Überholmanöver ist. Indikatoren für ein Bestehen des Tests könnte die Zeit sein, bis Verkehrsteilnehmer Nr. 3 nach dem Ausscheren wahrgenommen wird. Dazu sollte Verkehrsteilnehmer Nr. 2 (im Folgenden auch VT2) anfangs Verkehrsteilnehmer Nr. 3 vollständig verdecken. Aus diesem Grund können sowohl VT1 als auch VT3 als Motorrad ausgeführt sein, um die Detektion zu erschweren. Zudem kann die Reaktionszeit des Systems bis die Geschwindigkeit an die von VT3 angepasst wird eine weitere Leistungskennzahl sein. Eine dritte Leistungskennzahl ist die Längsbeschleunigung. Sie sollte stets kleiner als  $2,5 \text{ m/s}^2$  sein, um dem Nutzer ein komfortables Gefühl bei Geschwindigkeitsanpassungen zu geben. Des Weiteren sollte der Sicherheitsabstand zu VT3 hergestellt und

eingehalten werden. Hier kann eine Strecke von der Hälfte der aktuellen Geschwindigkeit als Richtwert angesehen werden.

Zur Repräsentation der Verkehrsteilnehmer in diesem Test können Fahrzeuge bzw. Motorräder verwendet werden, da keine besondere Gefahr eines Crashes besteht und somit keine Vorrichtungen nötig sind, die auch einen Crash gefahrlos überstehen können.

Die Startparameter der Position der Verkehrsteilnehmer werden so gewählt, dass VT1 relativ nahe neben dem Ego-Fahrzeug fährt und gleichzeitig VT2 schon weit links auf der Spur ist, sodass es schwierig wird zu detektieren, dass ein Spurwechsel durch VT2 stattfindet. VT3 ist relativ zum Ego-Fahrzeug leicht versetzt, sodass er durch VT2 zu Beginn des Manövers komplett vom Sichtfeld des Ego-Fahrzeugs verdeckt werden kann. Das Ego-Fahrzeug befindet sich zu Beginn des Tests im Folgefahrt Modus und folgt VT2 mit relativ hoher Geschwindigkeit. Verkehrsteilnehmer eins passt die Geschwindigkeit während des Tests an, dass es ein Ausweichen des Ego-Fahrzeugs blockiert, jedoch den Überholvorgang von VT2 noch zulässt. Verkehrsteilnehmer Nr.3 fährt relativ langsam, sodass der Autobahnchauffeur seine Geschwindigkeit korrigieren muss. Tabelle 18 zeigt neben dem Parameterraum auch die Zielwerte der Testfahrzeuge.

Test Parameter	Einheit	Parameter- raum	Start Parameter	Ziel Wert	Einheit	Wert	Kommen- tar
v_ego	km/h	0-130	130	v_ego_t	km/h	60	
a_ego	m/s <sup>2</sup>	-10 bis 6	0	a_ego_t	m/s <sup>2</sup>	0	
Position Ego in Spur	m	0 = Standard: Spurmitte	0	Ziel Position Ego in Spur	m	0	
Kurvenradius	m		n.a.				
Kurvenrichtung		Links/rechts	n.a.				
Typ VT 1		PKW, LKW, Motorrad, Spezielle Ladung (Holz,...)	Motorrad				
Relativanstand y VT 1	m	0 - m*Spurbreite	1,25	y-Ziel VT 1	m	0	
Relativanstand x VT 1	m	-250 bis 250	-1	x-Ziel VT 1	m		
v_1	km/h	0 - 330	135	v_1_t	km/h	70	Blockiert Spur- wechsel- möglichkeit von Ego
a_1	m/s <sup>2</sup>	-10 bis 6	0	a_1_t	m/s <sup>2</sup>	0	
Typ VT 2		PKW, LKW, Motorrad, Spezielle Ladung (Holz,...)	PKW				
Relativanstand y VT 2	m	0 - m* Spurbreite	0,5	y-Ziel VT 2	m	1,5	Fährt zu Beginn am linken Rand
Relativanstand x VT 2	m	-250 bis 250	>50 (Sicherheits- abstand HWP)	x-Ziel VT 2	m		
v_2	km/h	0 - 330	140	v_2_t	km/h	135	
a_2	m/s <sup>2</sup>	-10 bis 6	1	a_2_t	m/s <sup>2</sup>	0	
Typ VT 3		PKW, LKW, Motorrad, Spezielle Ladung (Holz,...)	Motorrad				
Relativanstand y VT 3	m	0 - m* Spurbreite	0,25	y-Ziel VT 3	m	0	
Relativanstand x VT 3	m	-250 bis 250	D_RU 2 - x + 15	x-Ziel VT 3	m	>5	
v_3	km/h	0 - 330	60	v_3_t	km/h	60	
a_3	m/s <sup>2</sup>	-10 bis 6	0	a_3_t	m/s <sup>2</sup>	0	

Tabelle 18: Definition der Start- und Zielwerte des Manövers "Ausscheren Vorauffahrender"

Dabei sollte das Ego-Fahrzeug die Geschwindigkeit des VT3 adaptiert haben und einen Sicherheitsabstand von < 5 m aufgebaut haben, welchen er stetig vergrößert. Da VT3 zum Start des Tests relativ nah vor Verkehrsteilnehmer zwei fährt, hat das Ego-Fahrzeug einen begrenzten Platz, um die Relativgeschwindigkeit von 70 km/h abzubauen und trotzdem nicht zu stark abzubremesen. Die Geschwindigkeitswerte des Verkehrsteilnehmers eins sind grobe Richtwerte, da dieser während des Manövers seine Geschwindigkeit flexibel der des Ego-Fahrzeugs anpasst und somit die Spurwechsellmöglichkeit des Ego-Fahrzeugs verhindert.

### 2.3.2.1.3. Anforderungen an das Testequipment

Das Testequipment wird zunächst abstrahiert. Es sind prinzipiell bewegliche Plattformen, Brückenkonstruktionen, normale Fahrzeuge, schienenbasierte Systeme und vieles mehr denkbar, um die Verkehrsteilnehmer zu repräsentieren. Um sich nicht von Beginn auf eine Lösung

einzu­schränken, werden die Anforderungen in Anforderungen hinsichtlich der Bewegung und der Darstellung aufgeteilt. Dabei können alle Anforderungen bezüglich der Bewegung des Testequipments nachher prinzipiell durch jedes denkbare System wie eine Brückenkonstruktion oder einen Seilzug geleistet werden. Die Anforderungen bezüglich der Darstellung beschreiben Mindestkriterien hinsichtlich der Repräsentation eines Verkehrsteilnehmers, der sowohl von der Größe als auch den Eigenschaften wie Radarwahrnehmung vergleichbar mit der Realität sein sollte. Wird als Testequipment für ein Auto z.B. ein reales Fahrzeug verwendet, sind die Anforderungen bezüglich der Darstellung im Gegensatz zu einer denkbaren Holznachbildung eines Fahrzeugs vollkommen erfüllt.

Aus den erstellten Testmanövern lassen sich Anforderungen an das Testequipment ableiten wie die benötigte Geschwindigkeit oder Beschleunigungen. Sie geben einen ersten Anhaltspunkt, in welchem Wertebereich das Testsystem zu verorten ist. Des Weiteren entstehen Anforderungen aus der Realitätsnähe und der Reproduzierbarkeit der Tests. Die Realitätsnähe der Tests ist wichtig, um durch die Testergebnisse auch Rückschlüsse auf das Verhalten des Autobahnchauffeurs im realen Straßenverkehr zu ziehen. Denn die Testmanöver sind zwar vereinfacht, sollen jedoch als zentrale Bausteine zur Validation und Verifikation des Systems beitragen können.

Eine weitere Anforderung, die sich aus der Realitätsnähe ergibt, ist die Tatsache, dass die Sensoren die eingesetzten Repräsentanten von Fahrzeugen in gleichem Maße erkennen sollen wie reale Objekte. Ein eingesetztes Ziel darf weder zu gut, noch zu schlecht durch die Sensoren wahrnehmbar sein und sollte deshalb so gut wie möglich ein reales Fahrzeug repräsentieren. Hiervon leiten sich Anforderungen hinsichtlich der Darstellung ab. Exemplarisch sollen erste Anforderungen an einen PKW hier ausgeführt werden. Die verwendeten Sensoren bestehen aus Lidar-, Radarsensoren sowie Kameras und eventuell Ultraschallsensoren. Für alle vier Messprinzipien muss die Repräsentation des Fahrzeugs möglichst nah an die Realität heranreichen. Für einen Radarquerschnitt (RCS, Radar Cross Section) eines PKWs sind zirka 100 m<sup>2</sup> ein grober Richtwert. Der Radarquerschnitt ( $\pi \cdot a^2$ ) ist eine der Hauptkenngrößen, um ein durch ein Radar zu detektierendes Objekt zu klassifizieren und beschreibt die größte Querschnittsfläche einer reflektierenden Kugel mit dem Radius a, die für einen Radar dieselben Messsignale ergeben würde. Je größer der Querschnitt ist, desto besser kann ein Objekt durch den Radar erkannt werden. Da Lidarsensoren Licht aussenden, ist es bei diesem Messprinzip wichtig die Glasoberflächen, die Licht durchlassen bei einem PKW zu berücksichtigen. Zudem sind stark reflektierende Flächen in einem Fahrzeug vorhanden. So sind die Rücklichter beispielsweise Retroreflektoren, die das Licht direkt reflektieren und dadurch einen sehr großen Messausschlag beim Lidar generieren. Auch dieses Verhalten ist bei der Darstellung eines Fahrzeugs zu berücksichtigen. Für die Kamera ist es wichtig, dass das Aussehen, also der Farbverlauf oder der Hell-Dunkel-Verlauf gut mit der Realität übereinstimmt. So ist z.B. auch der Schatten, der durch den Abstand des Unterbodens eines PKWs entsteht, entscheidend für die Erkennung und Klassifikation eines Fahrzeuges. Erste wichtige Parameter sind in Tabelle 19 exemplarisch für die Darstellung eines PKW zusammengefasst. Aus diesen und weiteren Parametern entstehen die Anforderungen an die Darstellung.

Arten	Fußgänger, Motorrad, PKW, LKW,	
<b>Max. Delta-Crash-Geschwindigkeit</b>	60 bis 130	km/h
<b>Kamera Anforderungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rücklichter</li> <li>• Kennzeichen</li> <li>• Abstand Unterboden</li> <li>• Reifen</li> <li>• Passende Abmessungen</li> </ul>	
<b>Lidar Anforderungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rücklichter mit Retroreflektor</li> <li>• Kennzeichen</li> <li>• Scheiben</li> </ul>	
<b>Radar Anforderungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ähnlicher Radarquerschnitt (RCS)</li> <li>• Änderungen Abstand -&gt; Vergleichbare Änderung RCS</li> <li>• Drehung -&gt; Vergleichbare Änderung RCS</li> </ul>	

*Tabelle 19: Zusammenfassung d. Anforderungen bzgl. der Darstellung eines PKW*

Aus der Reproduzierbarkeit der Tests leiten sich Anforderungen an die Messtechnik und Messmethoden ab. Durch die Komplexität des Systems können kleine geänderte Randbedingungen wie zusätzlicher Abstand zu einem Verkehrsteilnehmer eine andere Entscheidung bzw. Reaktion des Autobahnchauffeurs nach sich ziehen. Deshalb müssen beispielsweise die Anfangsbedingungen, die Positionen relativ zum Ego-Fahrzeug, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen enthalten, messbar und wiederherstellbar sein.

Ebenso ist es für die Auswertung der Tests unerlässlich, Messwerte aufzunehmen, die eine gewisse Genauigkeit besitzen, um die durchgeführten Manöver einordnen und bewerten zu können. Für die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung wurden die Anforderungen an den Test für Notbremsassistenten für Nutzkraftfahrzeuge herangezogen und mit zwei Kilometer pro Stunde angegeben. Ob dieser Wert ausreicht, ist zu hinterfragen und ebenso müssen die Anforderungen unter anderem hinsichtlich der Genauigkeit der Positionsmessung definiert werden. Weitere Anforderungen kommen von der Praxistauglichkeit der Tests. Es ist nicht zielführend ein Crashmanöver mit einem konventionellen Fahrzeug durchzuführen bei dem der Versuchsträger irreversibel beschädigt werden würde. Zudem sollte das Testequipment möglichst lange Zeit verwendbar sein, sodass nicht wegen eines leeren Energiespeichers die Versuchsreihe nach einer Stunde pausiert werden muss. Zusätzlich sollte das System transportabel sein, um es an mehreren Teststrecken einsetzen zu können und nicht mehrere Teststrecken baulich verändern zu müssen. Dadurch leitet sich ein maximales Gewicht ab und die Möglichkeit es je nach Design auseinander zu bauen, um es so transportieren zu können. Die Gestalt des Systems, das die Bewegung ermöglicht, ist nicht klar festgelegt. Aus diesem Grund können zur Länge und Breite keine direkten Angaben gemacht werden.

Jedoch muss sichergestellt werden, dass ein PKW-Repräsentant mit einer Länge von zirka 5 m und einer Breite von zirka 2,2 m bewegt werden kann. Ebenso ist die Höhe der Bewegungseinrichtung variabel, da sie entweder überfahren werden kann oder auch über dem Ego-Fahrzeug angebracht sein kann und deshalb kleiner als 125 mm oder größer als 2000 mm sein sollte, um Kollisionen zu vermeiden. Wird die Bewegungseinrichtung fest installiert, muss eine eventuell notwendige Durchfahrt von LKWs ebenso geprüft werden, wodurch die Höhenanforderung auch auf über 4 m steigen kann. In der folgenden Tabelle sind alle Anforderungen an die Bewegungseinrichtung die aus den Testmanövern resultieren wie die maximale Beschleunigung aber auch generelle Anforderungen aus der Reproduzierbarkeit oder Praxis-tauglichkeit festgehalten.

Bewegung	Wert	Einheit	Kommentare
<b>Material</b>			Keine Beeinträchtigung der Detektion durch die Sensoren seitens der Bewegungseinrichtung
<b>max. Geschwindigkeit</b>	140 (250/330)	km/h	Meist 140 km/h ausreichend, da HWP max. 130 km/h und in vielen Ländern generelle Geschwindigkeitsbegrenzung bei bis zu 130 km/h; Für Extremtests auf deutschen Autobahnen 250 km/h sinnvoll 330 km/h nur als oberes Maximum
<b>Geschwindigkeitsmessung Genauigkeit</b>	2	km/h	In UNECE R131 definiert für NKW AEB Tests
<b>max. Beschleunigung</b>	6	m/s <sup>2</sup>	Aus Test Cases
<b>max. Verzögerung</b>	10	m/s <sup>2</sup>	Aus Test Cases
<b>max. laterale Beschleunigung</b>	4	m/s <sup>2</sup>	2 m/s <sup>2</sup> auf Autobahn fast nie überschritten (2)
<b>Länge</b>	-	m	Transportfähigkeit; Aufnehmen von ~5 m langem PKW-Repräsentant
<b>Breite</b>	-	m	Transportfähigkeit; Aufnehmen von ~2,3 m breiten PKW-Repräsentant Motorrad- Repräsentant sollte 0,5m von äußeren Ende entfernt platzierbar sein

<b>Höhe</b>	< 125 > 2000	mm	Für Überfahrttests z. B. Tesla Model S 134 mm Bodenhöhe minus Federweg (15)
<b>Wendekreis</b>	>7 <12	m	Realistisches Verhalten für Ausweich-/Einschermanöver Realistisch für PKW 9-12 m (16)
<b>Genauigkeit Positionsmessung</b>	-	m	Ausarbeitung
<b>Synchronisierung und Senderate</b>	< 2	ms	Update Frequenz zur Kollisionsvermeidung (Zeitstempel, aktuelle Position,...) > 500 Hz : Bei 130 km/h: Ego-Bewegung von 7,22 cm
<b>Zeit bis Einsatzbereit bei leerem Energiespeicher</b>	< 1	h	Falls Energiespeicher Batterie -> Schnelle Lademöglichkeit oder Batteriewechsel
<b>Max. Nutzungsdauer</b>	> 4	h	Jeweils einen Vormittag/Nachmittag am Stück nutzbar
<b>Transport</b>			Möglichkeit des Aus- und Abbaus des Systems durch zwei Personen
<b>Gewicht</b>	<250	kg	Transport ermöglichen
<b>Robustheit</b>			Bewegungsablauf möglichst Wiederholbar durchführbar

Tabelle 20: Überblick der Anforderungen an das System zur Bewegung (HWP = Highwaypilot, gleichzusetzten mit dem Autobahnchauffeur)

### 2.3.2.1.4. Straßengeometrie und Topologie

Zuerst wird die Straßengeometrie sowie Topologie der Basisstrecke definiert siehe Abbildung 16. Der Verlauf der Straße orientiert sich in diesem Fall an den geltenden Richtlinien für Autobahnen z.B. min. Kurvenradius, max. Quer- und Längsneigung, Fahrbahnbreite und Anzahl der Fahrbahnen etc. Die einzelnen Faktoren lassen sich miteinander kombinieren.

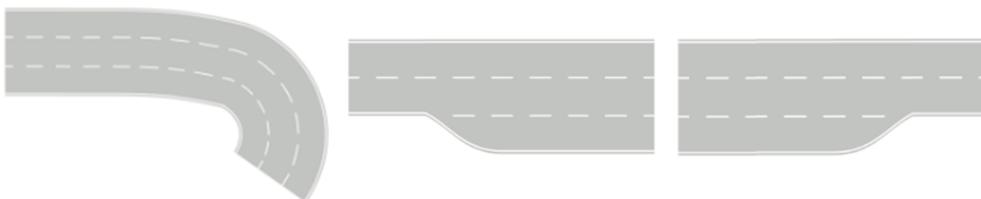


Abbildung 16: Beispiel für Straßengeometrie und Topologie

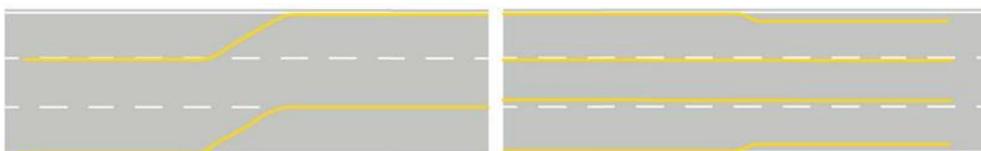


Abbildung 17: Bsp. Use Case für Situationsabhängige Anpassung der Strecke

Auf der zweiten Ebene werden situationsabhängige Anpassungen an der Basisstrecke durchgeführt. Ein Beispiel dafür sind Engstellen z.B. im Baustellenbereich, wo die Fahrbahn nicht mehr ihre ursprüngliche Breite besitzt siehe Abbildung 17.

Da das Fahrzeug selbständig die Umgebung sensiert und interpretiert, müssen Verkehrsregeln beherrscht werden, die in dem jeweiligen Land gefordert sind. Das PEGASUS Projekt fokussiert in diesem UAP vorerst nur den deutsche Verkehrsraum Raum.

### 2.3.2.1.5. Verkehrssituation

Nachdem die ersten beiden Ebenen definiert wurden, geht es in der dritten Ebene um dynamische Objekte siehe Beispiele in Abbildung 18. Der Verkehrsfluss lässt sich gezielt variieren. Dies geschieht durch das variieren der Anzahl der übrigen Verkehrsteilnehmer und der Differenzgeschwindigkeit zum Testfahrzeug. Des Weiteren lässt sich die zulässige Höchstgeschwindigkeit so wie die Abstände der einzelnen Fahrzeuge untereinander variieren. Dadurch lassen sich gezielt Szenarien wie Folgefahrt, Fahrstreifenwechsel etc. erstellen. Grundsätzlich können so unendlich viele dynamische Situationen erstellt werden.

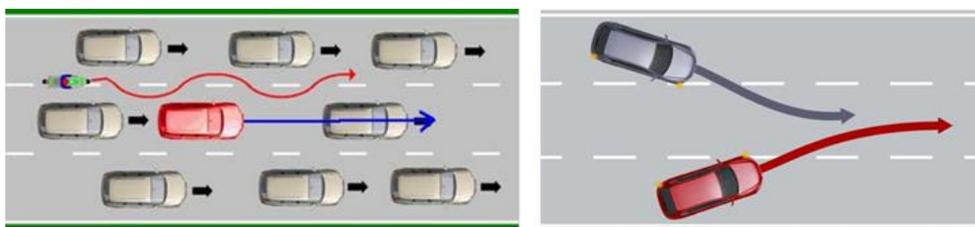


Abbildung 18: Beispiel für Verkehrssituationen bezogene Use Cases

### 2.3.2.1.6. Umwelt

In der vierten Ebene geht es um regionale und wetterbedingte Besonderheiten, welche in das Szenario eingebaut werden können. Bei regionalen Besonderheiten handelt es sich um länderspezifische Verkehrsschilder, Linienfarben etc. Bei den wetterbedingten Besonderheiten siehe Abbildung 19 ist neben der Tageszeit, wodurch unterschiedliche Lichtverhältnisse getestet werden können auch Niederschlag, Nebel etc. zu beachten.

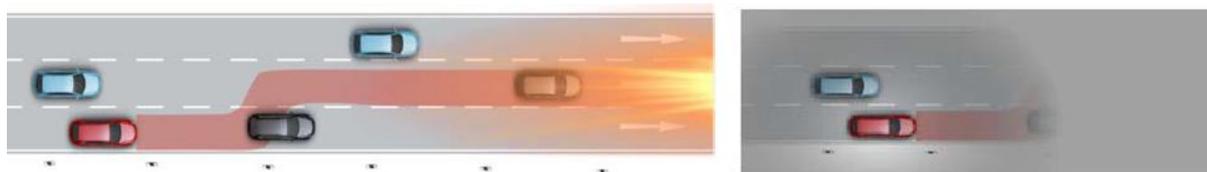


Abbildung 19: Beispiel für Umwelt

### 2.3.2.1.7. Zuordnung der Use Cases auf Testverfahren

Aus den zuvor definierten Anforderungen an ein Testkonzept lässt sich anhand einer Nutzwertanalyse eine Gewichtung für die Zuordnung der Use Cases für die Testverfahren entwickeln.

Die Nutzwertanalyse hilft bei der Entscheidungsfindung bei der Auswahl mehrerer Alternativen. Die Methode kommt immer dann zum Einsatz, wenn die Entscheidungsfindung nicht auf konkreten Zahlenwerten und Fakten geschieht. In folgenden Schritten wird die Nutzwertanalyse durchgeführt:

1. *Festlegung der Alternativen bzw. Entscheidungsvarianten*

Die verschiedenen Varianten, aus welchen eine ausgewählt werden soll, werden erfasst und festgehalten. Als Entscheidungsvarianten wurden die unterschiedlichen Testverfahren (Simulation, Teststrecke und Realversuch) gewählt.

2. *Definition von Bewertungskriterien*

Die relevanten Kriterien anhand derer eine Entscheidung getroffen werden soll werden festgelegt. Dies sind meistens Anforderungen an das Produkt, welche erfüllt werden müssen. Die Bewertungskriterien zuvor beschriebenen ergeben sich aus Kapitel 6.1 und wurden in Abbildung 21 in einem Spinnendiagramm dargestellt.

3. *Gewichtung der Bewertungskriterien*

Die einzelnen Kriterien werden mit Punkten bewertet. Der hier verwendete Bewertungsmaßstab ist 3 Punkte: sehr gut; 0 Punkte ungenügend

4. *Bewertung der Alternativen*

Nach der Vergabe der Punkte für die Kriterien werden nun die Punkte für die Alternativen vergeben und die gewichteten Punkte berechnet.

5. *Summierung und Auswahl*

Die Einzelgewichtungen werden summiert und ergeben die gewichtete Punktzahl pro Alternative. Die beste Alternative ist die mit der höchsten Punktzahl. 64

### **2.3.2.1.8. Ausgewählte Kriterien für die Gewichtung**

Nachfolgend wurden die relevanten Kriterien jeweils für den Zweck der Tests in den Bereichen „Simulation“, „Teststrecken“ und „Feldtest“ gewichtet.

#### **Repräsentativ/valide:**

Die nötige Testabdeckung muss erreicht werden um sagen zu können, dass es ausreicht für Fahrten in der Realität. Hierbei ist es notwendig, dass nicht nur Idealfälle getestet werden. Der Feldtest bietet hierbei die größte Vielfalt, daher wurde für Feldtest 3 Punkte vergeben. Auf einer Teststrecke ist es möglich, vieles zu testen, jedoch nicht alles, was vorkommt in der Realität, daher 2 Punkte für Teststrecke. Für Simulation wurde 1 Punkt vergeben, da hier die un erwarteten Situationen, welche es in der Realität gibt, nicht getestet werden können.

#### **Gewollte Variierbarkeit:**

Hierbei geht es um die Vielfalt der unterschiedlichen Testsituationen. Gewollte Variierbarkeit deshalb das sie auch reproduziert werden kann. Daher bekommt die Simulation hier 3 Punkte, da es einfach ist in der Simulation Situationen zu verändern. Auf der Teststrecke sind die Tests auch variierbar, jedoch hat die Teststrecke ihre Grenzen. Deshalb ist die Teststrecke mit 2 Punkten hinterlegt. Der Feldtest ist zwar sehr komplex, jedoch sind die Situationen nicht gewollt variiert und nicht reproduzierbar daher 0 Gewichtungspunkte.

#### **Selten auftretende Situationen:**

Situationen, die in der Realität selten auftreten, sollten nicht im Feldtest getestet werden, da zu viel Zeit vergehen würde, bis man diese seltene Situation vorfindet. Daher wurde hier der Feldtest mit 0 Punkten gewichtet. Für die Teststrecke sind diese Tests nicht primär wichtig.

Dadurch das nicht alles auf einer Teststrecke getestet werden kann, sollten in erster Linie die Dinge getestet werden, welche häufig im normalen Straßenverkehr vorkommen, daher hier nur mit 1 Punkt gewichtet. Jedoch sollten auch diese Situationen getestet werden. Dies ist in der Simulation kein Problem. Es ist relativ einfach, komplizierte und seltene Fälle zu simulieren und damit zu testen, daher für die Simulation 3 Punkte.

**Reproduzierbar/Beobachtbar:**

Im Feldtest ist die Beobachtbarkeit so wie die Reproduzierbarkeit nicht gegeben, da die Manöver auf Zufallsereignissen beruhen, daher wurde dieser mit 0 Punkten gewichtet. In der Simulation sind alle Manöver zu 100% reproduzierbar, daher ist Simulation mit 3 Punkten gewichtet. Bei einer Teststrecke sind die Manöver beobachtbar, aber auch wenn sie künstlich hergestellt werden nicht zu 100% reproduzierbar, daher 2 Punkte für Teststrecken.

**Zuverlässigkeit des Fahrzeugs:**

Beim Testen müssen nicht nur die einzelnen Manöver getestet werden, sondern auch die Zuverlässigkeit des gesamten Fahrzeugs mit allen Sensoren und Aktoren. Dies ist jedoch nicht in der Simulation möglich, daher wurden hier für Simulation 0 Punkte vergeben. Am besten kann man dies in der Realität testen, daher ist der Feldtest hier mit 3 Punkten zu beachten. Auch auf der Teststrecke kann die Zuverlässigkeit des Fahrzeugs getestet werden, aber nicht so umfangreich wie in der Realität, daher hier 2 Punkte für Teststrecken.

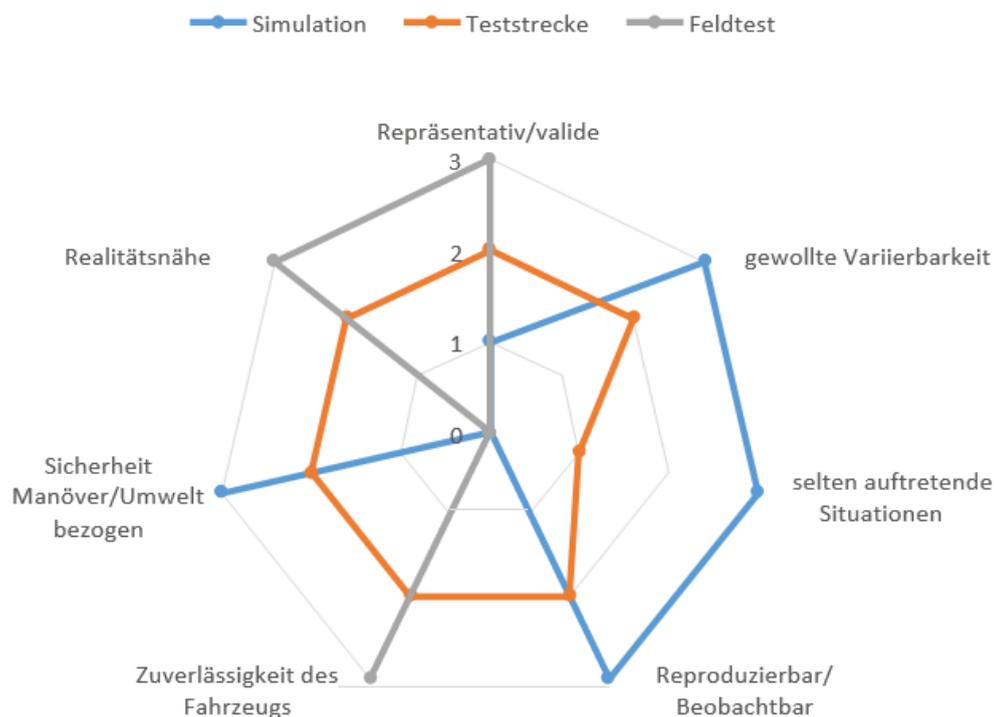


Abbildung 20: Gewichtung der Bewertungskriterien

**Sicherheit Manöver/Umwelt bezogen:**

Bei allen Test ist zu beachten, dass sie sicher durchführbar sind. Aber nicht nur die Manöver müssen sicher durchführbar sein, sondern auch die Umwelt darf nicht in Gefahr gebracht werden. Beim Feldtest sind andere Personen am Test beteiligt, die nicht wissen, dass sie zum Test gehören. Alleine das birgt ein großes Risiko. Daher gibt es für den Feldtest hier 0 Punkte.

Auf der Teststrecke wissen alle Beteiligten, dass sie sich in einem Test befinden. Jedoch ist es auch hier nicht völlig ausgeschlossen, dass etwas passieren kann, daher 2 Punkte für Teststrecken. In der Simulation können kritische Manöver problemlos nachgebildet werden ohne eine Gefahr für Testfahrzeug oder Testteilnehmer darzustellen, daher 3 Punkte für Simulation.

### Realitätsnähe:

In der Realität sind Verkehrssituationen nicht vorhersehbar durch andere Verkehrsteilnehmer. Egal wie komplex Szenarien in der Simulation sind lassen sich nie alle in der Realität auftretenden Verkehrssituationen und Umweltbedingungen nachbilden. Des Weiteren fehlen bei der Simulation die Hardware und die Interaktion zwischen Testfahrzeug und Straße. Daher ist der Feldtest mit 3 Punkten gewichtet, die Teststrecke mit 2 Punkten und die Simulation mit 0 Punkten.

Dieses Verfahren wurde auf die 41 Use Cases - *die im Vorfeld erarbeitet wurden* - angewandt. Exemplarisch wird hier in Abbildung 21 ein Auszug aus der Liste dargestellt.

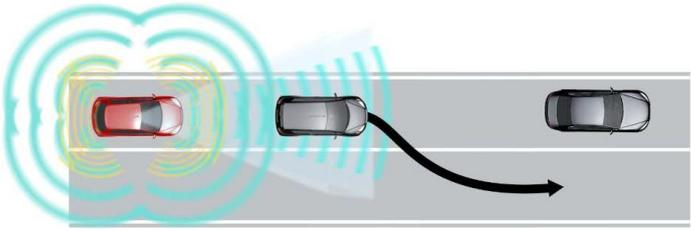
Vorrausfahrendes Fahrzeug stoppt auf der Nothaltelinie	Simulation	Teststrecke	Feldtest
			
Repräsentativ / valide	1	2	3
Gewollte Variierbarkeit	6	4	0
Selten auftretende Situationen	9	3	0
Reproduzierbar / beobachtbar	0	0	0
Zuverlässigkeit des Fahrzeugs	0	6	9
Sicherheit Manöver / Umwelt bezogen	9	6	0
Realitätsnähe	0	2	3
SUMME	25	23	15

Abbildung 21: Anwendungsbeispiel der Nutzwertanalyse auf einen Use Case

Für weitere Beispiele siehe Kapitel 2.3.3.5.

### 2.3.3 Definition der Anforderungen an Prüfgeländetests (UAP 3.3.1)

Auf Basis bestehender Erfahrungen wurde in Zusammenarbeit mit anderen Partnern ein Katalog von Anforderungen an Prüfgeländetests gestellt (UAP 3.3.1). Daraus wurde eine mögliche Straßenführung für ein Prüfgelände vorgeschlagen auf der eine Vielzahl typischer Szenarien dargestellt werden kann. Ferner wurde verfügbare Testhilfen und Targets auf Eignung geprüft, insbesondere ob sich mit ihnen das vollständige Prüfspektrum der PEGASUS-Szenarien abdecken lässt. Dabei wurden insbesondere mit Bezug auf die Sensorik heutige Lücken im Test-Equipment identifiziert, z.B. fehlende, realistische Darstellung von 2-Rad Kraft-rädern.

### **2.3.3.1 Einführung**

In diesem Unterarbeitspaket werden Anforderungen an das Prüfgelände abgeleitet. Nachfolgende Kriterien werden dabei in die Betrachtung mit eingebunden:

- Spezifikation von Infrastruktur, Geländebeschaffenheit, Strecken, etc.
- Anforderungen an eine hochgenaue Referenzkarte des Prüfgeländes.
- Spezifikation der Kommunikationsinfrastruktur auf dem Testgelände.

Der Fokus dieses UAPs lag dabei auf der Definition Anforderungen für Tests zur Validierung der Bosch-Sensor- und Funktionsmodelle aus AP 3.2. Weiterhin mussten Anforderungen an Targets bzgl. Beschaffenheit für unterschiedliche Sensortypen (z.B. Radar-/Video) berücksichtigt werden. Damit ließ sich dann eine erste Spezifikation der benötigten Straßeninfrastruktur aus den Anwendungsszenarien aus AP 1.1 ableiten.

Im Rahmen der Entwicklung von hochautomatisierten Fahrfunktionen (HAF) mussten verschiedenartige Tests zur Verifikation und Validierung durchgeführt werden, die über herkömmliche Testverfahren von Fahrerassistenzsystemen deutlich hinausgehen, da die Testsituationen nun komplexe Verkehrsszenarien abbilden müssen.

Im Rahmen der PEGASUS TP3-Projektarbeit und den damit verbundenen Entwicklungsaktivitäten von BOSCH wurden auf Grundlage der nachfolgenden erarbeiteten und diskutierten Use Cases für die HAF-Funktion „Autobahnchauffeur“ Anforderungen insbesondere an Fahrzeugtests auf Prüfgeländen abgeleitet.

### **2.3.3.2 Vorbetrachtungen**

Um den oben genannten Fokus diskutieren zu können musste zunächst auf die Versuchsfahrzeugumgebung sowie die damit verbundenen Randbedingungen und Einflussgrößen von der Funktion Autobahnchauffeur eingegangen werden. Überdies muss die Fragestellung, wie Szenarien von Fahrzeugtests sowie eines möglichen Testequipments aussehen könnten, um komplexe Verkehrsszenarien reproduzierbar und möglichst realitätsnah auf Teststrecken darzustellen, diskutiert und bewertet werden.

Folgend darauf konnte, basierend auf dieser Analyse, eine Definition getroffen werden, in welchem Maß, mit welcher Infrastruktur, mit welcher Geländebeschaffenheit, mit welchen Streckenarten sowie mit welchen Randbedingungen sich ein Prüfgelände für das Testen einer Autobahnchauffeur-Funktion eignet.

Der Aspekt der Reproduzierbarkeit war hierbei essentiell, da dies ein deutliches Alleinstellungsmerkmal von Prüfgeländetests im Vergleich zu realitätsnahen Tests auf der Autobahn darstellt. Letztlich wurde kein finaler Testkatalog entwickelt, sondern durch die Entwicklung von exemplarischen Test Cases bzw. Testszenarien erste Anforderungen an das Testequipment abgeleitet. Diese Szenarien und die daraus abgeleiteten grundlegenden Anforderungen an das Testequipment dienten im weiteren Entwicklungsverlauf sowohl zu Zwecken der Validierung als auch der Verifikation. Dabei beschreibt die Verifikation das Abgleichen der gestellten Anforderungen an das System (damit auch für unterschiedliche Sensortypen) mit der Systemperformance. Dies kann beispielsweise durch definierte Testmanöver umgesetzt werden.

Die Validierung geht über die Verifikation hinaus und überprüft, ob die gestellten Nutzungsziele der Funktion wie beispielsweise die Kontrollierbarkeit durch den Fahrer eines in einen „sicheren Zustand“ gebrachten (Gesamt-)Systems auch wirklich erfüllt.

Zunächst wurde durch die Betrachtung des Einsatzzwecks des Systems ein Parameterraum festgelegt. Dieser Parameterraum wird auf die Use Cases, auf die Entwicklung und der Definition der Testszenarien angewandt, indem bestimmte Parameter variiert werden. Von Extremfallbetrachtungen ausgehend, werden grundlegende Anforderungen an das Testequipment beschrieben.

### **2.3.3.3 Komponenten zur Umfeldwahrnehmung**

Um Anforderungen an ein Testgelände definieren zu können, wurden die Komponenten des Autobahnchauffeurs (Level-3 Fahrzeug) betrachtet. Der L3-Versuchsträger verfügt neben den standardmäßig verbauten Komponenten eines Fahrzeugs wie Aktuatoren auch über Sensoren, die zur Umfeldwahrnehmung dienen.

Dabei werden Radarsensoren, Kamerasysteme, Lidar- und Ultraschallsensoren eingesetzt, um möglichst alle Objekte zu erkennen. Viele verschiedene Sensoren mit verschiedenen Sensorprinzipien kommen zum Einsatz, um eine gewisse Redundanz der Sensormessungen zu erreichen.

Objekte werden mit ihrer Position und aktuellen Bewegung erkannt und zugleich klassifiziert, also zu Gruppen wie Fußgängern oder Personenkraftwagen (PKW) zugeordnet, werden. Dies macht erst die Kombination aller Sensorsignale in einem zuverlässigen Maße möglich. Radarsensoren können beispielsweise nur Objekte detektieren, die zu einem gewissen Anteil aus leitfähigen Materialien bestehen, was einen Transporter mit nicht durchgehendem Auflieger, der beispielsweise mit trockenem Holz beladen ist, nicht in der richtigen Form für Radarsensoren wahrnehmbar macht, da das Holz nicht detektiert wird. So entstehen durch die falsche Wahrnehmung des Radarsensors zwei voneinander unabhängige Objekte. Lidar-sensoren verwenden einen Laserstrahl, um Objekte wahrzunehmen. Somit sind lichtabsorbierende oder transparente Materialien schwer zu detektieren, da sie nur wenig Licht reflektieren und somit zu einem kleinen messbaren Ausschlag beim Empfänger führen. Sowohl für Radar- als auch für Lidarsensoren sind Objekte schwer messbar, wenn sie nicht in die Senderichtung reflektieren, was beispielsweise bei Lastwagen mit einer Plane der Fall ist, wenn dieser gerade um eine Kurve biegt. Dadurch werden die elektromagnetischen Wellen bzw. das Laserlicht in eine Richtung weg vom Empfänger/Sender reflektiert und sind so nicht durch die Sensorik wahrnehmbar. Hier könnten die kamerabasierten Sensoren aushelfen, um das Objekt zuverlässig wahrzunehmen. Kameras können hauptsächlich zur Klassifikation und Detektion von Objekten eingesetzt werden, haben jedoch Nachteile durch den Einfluss des Sonnenstands wegen der möglichen Blendung bzw. Sättigung des Sensorelements. Zudem ist im Versuchsträger eine Einheit zur Positionsbestimmung verbaut, die neben der Positionsbestimmung durch ein satellitenbasiertes Navigationssystem auch Messsignale wie Gierrate, Längs- und Querbesehleunigung verarbeitet, um das Fahrzeug zu lokalisieren. Weiterhin kann eine hochgenaue Karte zusätzliche Information zur Lokalisierung geben. Dritte Komponente ist eine schnelle und sehr leistungsfähige Messtechnikumgebung, um die Signale zu verarbeiten sowie ein Modell der Umgebung zu erstellen und die Trajektorie des Fahrzeugs zu planen.

Die Sensorsignale werden einzeln ausgewertet und daraus die Relativgeschwindigkeit sowie die Relativpositionen der Objekte im Fahrzeugumfeld aus Sicht des jeweiligen Sensors ermittelt. Alle Sensordaten werden im folgenden Schritt fusioniert, um die Abmessungen und das Vorhandensein zu schätzen sowie die Geschwindigkeitsbestimmung und die Klassifikation vorzunehmen. Dies bedeutet, dass alle Daten der Sensoren, also die Merkmale wie Geschwindigkeit und die Position eines wahrgenommenen Objekts, in die gemeinsame „Karte“ eingetragen werden. Durch die Sensordatenfusion werden false-positive-Fehler einzelner Sensoren erkannt und beseitigt. Des Weiteren können auch Objekte, die von einzelnen Sensoren nicht erkannt werden konnten (false-negative-Fehler) in dem Umweltmodell dargestellt werden. Mit der darauffolgenden Objekthypothese werden die einzelnen Messpunkte zu Objekten zusammengefügt. Dabei gibt es generell ein Freiraum- und ein Umfeldmodell. Das Freiraummodell stellt, wie der Name schon sagt, alle Punkte in der Umwelt dar, an denen zu hoher Wahrscheinlichkeit sich kein Objekt befindet und bildet somit alle statischen Objekte ab. Das Umfeldmodell enthält alle dynamischen Objekte mit der jeweiligen Position und ihrem aktuellen Geschwindigkeitsvektor. Durch Kombination der beiden Modelle entsteht ein Abbild des Fahrzeugumfeldes, welches sowohl statische als auch dynamische Objekte berücksichtigt. Ein weiterer wichtiger Punkt, ehe mit der Planung der Trajektorie begonnen werden kann, ist die Lokalisierung des Fahrzeugs. Dies wird zum einen über das globale Navigationssatellitensystem (GNSS) realisiert, wobei hier mehr die Information der aktuellen Strecke und der Absolutkoordinaten extrahiert werden. Nun lokalisiert sich das Ego-Fahrzeug innerhalb der Strecke und determiniert auf welcher Spur es sich befindet, wozu die Daten einer digitalen Karte in Kombination mit den Absolutkoordinaten Verwendung finden. Genauer kann die Lokalisierung durch Verwendung des erstellten Modells des Fahrzeugumfeldes und somit den Sensordaten werden, um beispielsweise die Position innerhalb der eigenen Spur mittels Referenzobjekten wie Brücken, Tunnel oder Spurmarkierungen zu bestimmen. Die Eigenbewegung wie aktuelle Geschwindigkeit oder Längs- und Querschleunigung kann u. a. den Sensoren (z. B. Beschleunigungs- und Raddrehzahlsensor) des eigenen Fahrzeugs entnommen werden. Unter Nutzung der Lokalisierung, des Modells des Fahrzeugumfeldes sowie der Eigenbewegung werden verschiedene mögliche Trajektorien berechnet. Mit der Berücksichtigung der erwarteten Bewegung der anderen Verkehrsteilnehmer wird eine sichere Trajektorie festgelegt. Von dieser Trajektorie werden u.a. die Sollgeschwindigkeit, die Beschleunigung und der Lenkwinkel gewonnen. In Kombination mit weiteren Sensordaten zum Beispiel zur Reibwertschätzung werden mittels verschiedener Regler, die unter anderem ein Über- oder Untersteuern des Fahrzeugs verhindern, Parameter wie der Lenkwinkel, die Lenkwinkelgeschwindigkeit oder das Motormoment errechnet, um die Bahnführung des Fahrzeugs im Sinne der Solltrajektorie umzusetzen. Die reale Trajektorie und die gemessenen Parameter fließen im nächsten Schritt wieder in die Trajektorienplanung ein.

In Abbildung 22 ist schematisch die Funktionsweise des Autobahnchauffeurs dargestellt. Dieser Prozess wird mehrmals in der Sekunde wiederholt, um Kollisionen zu vermeiden und eine optimale Spurführung zu ermöglichen. Somit können auch einzelne „Fehlmes-sungen“ bis zu einem gewissen Grad ausgeglichen werden.



Abbildung 22: Funktionsweise Autobahnchauffeur (Beispiel)

### 2.3.3.4 HAF-Testing auf Teststrecken

Wie eingangs erwähnt, sollen hochautomatisierte Fahrfunktionen mittels eines Gesamtestkonzepts evaluiert werden. Dazu gehören Tests mittels Simulation wie auch Tests auf Teststrecken und im realen Straßenverkehr. Deshalb gilt es einzuschränken, in wieweit Tests auf Teststrecken dazu ihren Beitrag leisten können. Die einzelnen Softwarekomponenten werden mittels SiL getestet. Teilsysteme wie Aktoren werden mittels HiL getestet und dabei auch verschiedenste Szenarien durchgespielt.

Bei Tests auf Teststrecken liegt der Fokus auf der Verifikation bzw. der Validierung des Gesamtsystems. Dabei sind im Allgemeinen sowohl simulierte Hindernisse, die den Sensoren „vorgetäuscht“ (ViL, Vehicle-in-the-loop) werden, als auch reale Hindernisse und Verkehrsteilnehmer denkbar. Tests auf Teststrecken machen zum einen in Situationen Sinn, bei denen HAF-Systeme vor der Freigabe für Straßentests auf Autobahnen überprüft werden sollen. Hierbei können Teststrecken einen abgegrenzten, geschützten sowie sicheren Versuchsraum bieten, um HAF-Systeme erstmals zu validieren. An die Realitätsnähe im realen Verkehr können Tests auf Testgeländen nicht herankommen, jedoch sind diese im Vergleich zur Simulation in einem deutlicheren Maße durch reale Objekte gegeben.

Einen zweiten Vorteil neben der Realitätsnähe von Tests auf Teststrecken, bieten der kontrollierte Ablauf und das abgeschirmte Gelände. Durch den kontrollierbaren Ablauf werden spezifische Szenarien nachstellbar und reproduzierbare Tests ermöglicht, wodurch ein Vergleich von Systemen realisiert werden kann. Ein weiterer Vorteil von Teststreckentests bietet die Möglichkeit Situationen, die zu Unfällen oder beinahe Unfällen führen können (=definierte Corner Cases), durchzuführen. Corner Cases können auf Teststrecken kontrolliert durchgeführt werden und die Funktionen des Systems gegebenenfalls optimiert werden. Hinzu kommt die

Möglichkeit, selten auftretende Situationen auf Teststrecken, im Vergleich zu allen anderen Testmethoden, wirtschaftlich und gleichzeitig realitätsnah darzustellen.

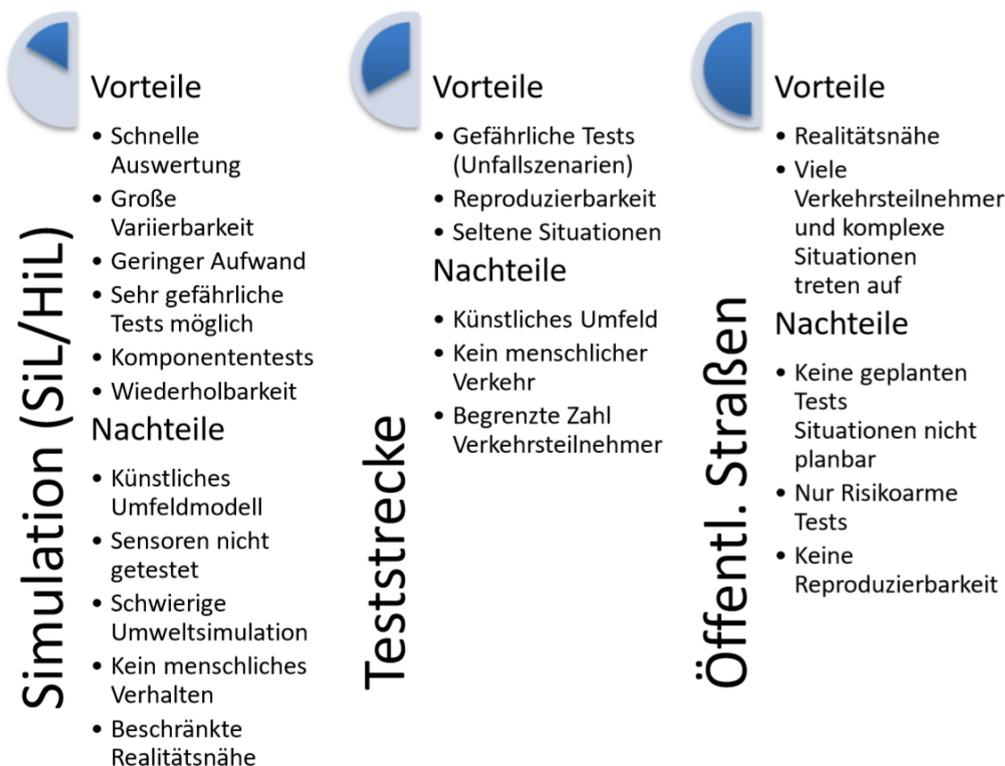


Abbildung 23: Vergleich von Testverfahren

Die obige stellt die möglichen Testmethoden vergleichend gegenüber und zeigt jeweils die besonders charakteristischen Stärken und Schwächen auf. Der zunehmende Kreis zeigt dabei den Aufwand, die Aussagekraft und die Realitätsnähe der verschiedenen Möglichkeiten zu Testen auf.

Durch diese Eigenschaften definieren sich die Einsatzgebiete der verschiedenen Tests, die sich ergänzen, um das komplette System inklusive aller Komponenten effizient testen zu können.

Im Hinblick darauf werden Tests auf Teststrecken verstanden und entwickelt. Sie sollen realitätsnah gefährliche, selten auftretende und anfangs ebenso typische Verkehrssituationen reproduzierbar, kontrolliert und vergleichbar abbilden und somit einen Test des Gesamtsystems ermöglichen und dabei mit so viel Varianz wie nötig die größtmögliche Aussagekraft besitzen.

Die Varianz ist beschränkt, da die Tests wirtschaftlich bleiben sollen, was einen möglichst effizienten zeitlichen und finanziellen Aufwand impliziert.

Es werden nachfolgend grundlegende Anforderungen an das Testequipment von erstellten Testszenerarien abgeleitet. Grundlagen für die Erstellung von Test Cases bieten unter anderem mögliche Anwendungsszenarien eines Autobahnbahnchauffeurs.

### 2.3.3.5 Use Cases für Teststrecken

Von den insgesamt 41 Use Cases ergaben sich nach der Anwendung der Nutzwertanalyse 18 Use Cases für die Anwendung auf einer Teststrecke. Nach dieser Auswertung wurden die

Use Cases nochmals reduziert um die Fahrmanöver, die nicht Strecken abhängig sind, wie z.B. andere Verkehrsteilnehmer, da diese den Verlauf und Aufbau der Teststrecke nicht beeinflussen. Nach dieser Selektion blieben noch 9 Use Cases übrig, welche teilweise in Test Cases umgewandelt wurden.

Die Folgefahrt (Abbildung 24) eignet sich zum Testen auf der Teststrecke und auf der Autobahn, da die Situation relativ häufig vorkommt und unter normalen Bedingungen nicht gefährlich ist. Jedoch lässt sich in der Realität nie ausschließen, dass ein Fahrzeug vor einem einschert oder plötzlich abbremst. Daher ist für die bessere Reproduzierbarkeit das Testen auf der Teststrecke am besten geeignet.

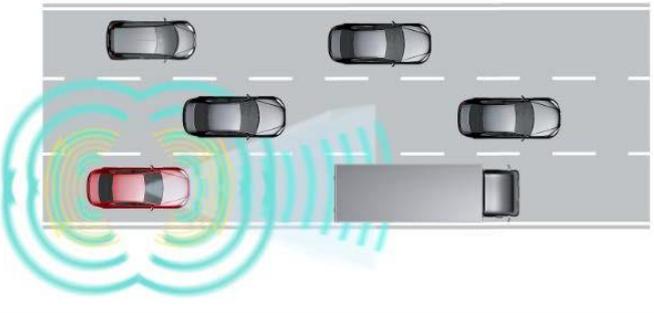
Folgefahrt	Simulation	Teststrecke	Feldtest
			
SUMME	21	28	24

Abbildung 24: Use Case Folgefahrt

In Abbildung 25 ist ein Spurwechsel des vorausfahrenden Fahrzeugs dargestellt. Dieser Use Case ist nichts Ungewöhnliches in der Realität. Jedoch ist hier zu beachten, wie der Spurwechsel durchgeführt wird z.B. setzt der VorrAusfahrende einen Blinker, verzögert er vor dem Spurwechsel usw.

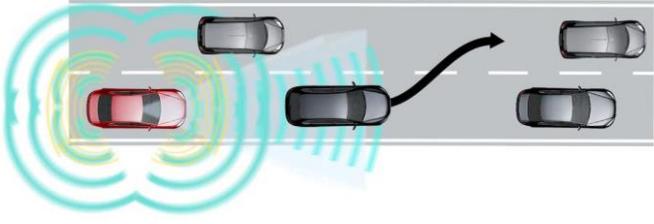
Vorrausfahrendes Fahrzeug absolviert einen Fahrbahnwechsel	Simulation	Teststrecke	Feldtest
			
SUMME	23	27	21

Abbildung 25: Use Case Spurwechsel VorrAusfahrendes Fahrzeug

Ein Fahrzeug, welches auf der eigenen Spur stehen geblieben ist, ist eine gefährliche Situation. Deshalb ist es sinnvoll, dieses Manöver zuerst in der Simulation zu testen siehe Abbildung 26. Jedoch sollte so ein Manöver auch auf der Teststrecke getestet werden um sicher zu stellen, dass die Simulation auch valide ist und das Fahrzeug als komplettes System freigeben zu können.

Stehengebliebenes Fahrzeug auf der eigenen Spur	Simulation	Teststrecke	Feldtest
<p>Das Diagramm zeigt eine dreistreigige Fahrbahn von oben. Ein rotes Fahrzeug ist in der linken Spur gestoppt. Ein weißes Fahrzeug fährt von links nach rechts in der mittleren Spur. Ein graues Fahrzeug fährt von links nach rechts in der rechten Spur. Ein roter Pfeil zeigt die Bewegung des roten Fahrzeugs an, das sich von der linken Spur nach rechts in die mittlere Spur bewegt, um das weiße Fahrzeug zu überholen. Ein grauer Pfeil zeigt die Bewegung des grauen Fahrzeugs an, das sich von der rechten Spur nach links in die mittlere Spur bewegt, um das weiße Fahrzeug zu überholen. Dies führt zu einer gefährlichen Situation, da sich beide Fahrzeuge in der mittleren Spur befinden.</p>			
SUMME	32	29	18

Abbildung 26: Use Case stehengebliebenes Fahrzeug auf der EGO-Spur

In der Abbildung 27 wechselt das Testfahrzeug zur selben Zeit wie ein anderes Fahrzeug die Fahrbahn in dieselbe Fahrbahn. Dieser Use Case ist äußerst gefährlich und kann zu erheblichen Schäden an den Fahrzeugen führen, falls es zu einer Fehlfunktion kommt. Daher sollte dies zuerst in der Simulation getestet werden, jedoch zur Freigabe nach der Simulation auch auf der Teststrecke.

Anderes Fahrzeug wechselt zeitgleich in die gleiche Fahrbahn	Simulation	Teststrecke	Feldtest
<p>Das Diagramm zeigt eine zweistreigige Fahrbahn von oben. Ein rotes Fahrzeug fährt von links nach rechts in der unteren Spur. Ein graues Fahrzeug fährt von links nach rechts in der oberen Spur. Ein roter Pfeil zeigt die Bewegung des roten Fahrzeugs an, das sich von der unteren Spur nach rechts in die obere Spur bewegt. Ein grauer Pfeil zeigt die Bewegung des grauen Fahrzeugs an, das sich von der oberen Spur nach rechts in die untere Spur bewegt. Dies führt zu einer gefährlichen Situation, da sich beide Fahrzeuge in der unteren Spur befinden.</p>			
SUMME	38	33	18

Abbildung 27: Use Case anderes Fzg. wechselt zeitgleich in die gleiche Fahrbahn

### 2.3.3.6 Test Case

Aus den Use Cases aus Kapitel 2.3.1 werden exemplarisch zwei Test Cases hergeleitet. Bei diesen wird von außen betrachtet, welches Fahrverhalten von dem Testfahrzeug erwartet wird und wie verhält es sich tatsächlich. Bei der Entwicklung von Test Cases ist zu unterscheiden in Straßen und stationäre Objekte, bewegte Objekte und System Überwachung inklusive Abschaltstrategien von Sensoren, Aktuatoren etc.

#### 2.3.3.6.1. Parameter für Test Cases

In Abbildung 28 ist ein Test Case dargestellt bei welchem das vorausfahrende Fahrzeug auf der Standspur anhält.

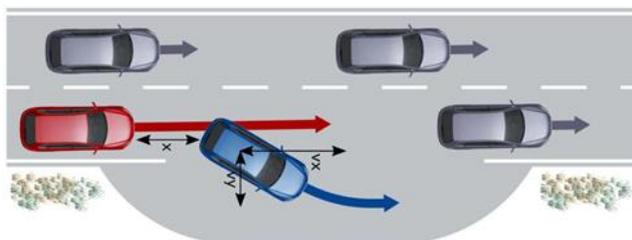


Abbildung 28: Test Case für vorausfahrendes Fahrzeug hält auf Standspur

**Ziel des Tests:**

Das Testfahrzeug kann die Situation richtig einschätzen, dass kein Fahrspurwechsel nötig ist, da das vorausfahrende Fahrzeug die eigene Spur verlässt und auf die Standspur wechselt.

**Test variablen:**

- x-Distanz zum Target Fahrzeug (Referenzpunkte von Stoßstange zu Stoßstange)
- y-Distanz zum Target Fahrzeug (Referenzpunkte von Stoßstange zu Stoßstange)
- $v_x$  Target Fahrzeug
- $v_y$  Target Fahrzeug

**Test Equipment:**

- Testfahrzeug ausgerüstet mit dGPS
- Target Fahrzeug mit dGPS
- Synchronisierung von dGPS der Fahrzeuge untereinander, um die relative Position der Fahrzeuge zueinander bestimmen zu können.

**Testaufbau:**

Parameter	Test 1	Test 2
Testfahrzeug	80 km/h	80 km/h
Target Fahrzeug	80 km/h	60 km/h
x am Anfang des Manövers	20 m	50 m
x am Ende des Manövers	20 m	10 m
y am Anfang des Manövers	0 m	0 m
y am Ende des Manövers	4 m	4 m

Tabelle 21: Testaufbau für Test Case: Vorausfahrendes Fzg. hält auf Standspur

In Abbildung 29 ist ein weiterer Test Case dargestellt, bei welchen zwei Fahrzeuge zur selben Zeit die Fahrbahn wechseln in die gleiche Fahrbahn.

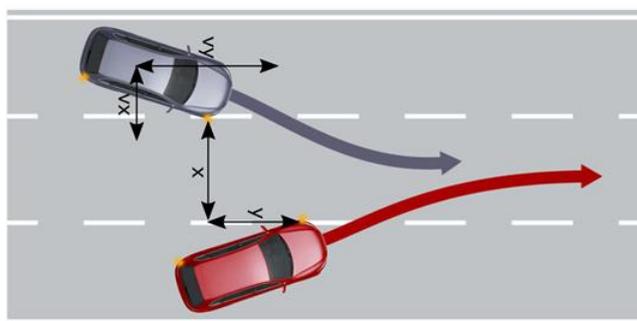


Abbildung 29: Test Case beide Fzge. wechseln zeitgleich in die gleiche Fahrbahn

**Ziel des Tests:**

Das Testfahrzeug erkennt rechtzeitig das andere Fahrzeug und bricht den Fahrspurwechsel ab.

**Test variablen:**

- x-Distanz zum Fahrzeug (von Stoßstange zu Stoßstange)
- y-Distanz zum Fahrzeug (von Stoßstange zu Stoßstange)
- $v_x$  andere Fahrzeuge
- $v_y$  andere Fahrzeuge

**Test Equipment:**

- Testfahrzeug ausgerüstet mit dGPS
- Target Fahrzeug mit dGPS
- Synchronisierung von dGPS der Fahrzeuge untereinander

**Testaufbau:**

Parameter	Test 1	Test 2	Test 3
Testfahrzeug	70km/h	80km/h	80km/h
Target Fahrzeug	80km/h	70km/h	80km/h
y zu Beginn des Tests	-5m	5m	0m
y am Ende des Tests	5m	-5m	0m
x zu Beginn des Tests	8m (zwei Fahrbahnen)	8m (zwei Fahrbahnen)	8m (zwei Fahrbahnen)
x am Ende des Tests	4m (eine Fahrbahn)	4m (eine Fahrbahn)	4m (eine Fahrbahn)

Tabelle 22: Testaufbau TC beide Fzge. wechseln zeitgleich in die gleiche Fahrspur

**2.3.3.6.2. Equipment für die Tests**

Zur besseren Reproduzierbarkeit der Tests empfiehlt sich der Einsatz von automatisch gesteuerten bewegten Targets sowie überfahrbare Plattformen und Fahrroboter. Des Weiteren entsteht durch den Einsatz von überfahrbaren Plattformen und 3D-Targets im Kollisionsfall kein Schaden an dem Testfahrzeug. Auf die Plattform können verschiedene Targets aufgebaut und problemlos ausgetauscht werden. Bei einem Crash wird das 3D-Target auf der überfahrbaren Plattform nicht zerstört, da es äußerst robust ist.

- **Fahrroboter:** Bei den Fahrrobotern ist zu unterscheiden, ob es ein reiner Lenkroboter ist bei welchem der menschliche Fahrer für das Beschleunigen und Bremsen selbst zuständig ist oder kombiniert mit einem Pedalroboter woraus sich die Möglichkeit ergibt, dieses Fahrzeug von einer Leitstation gesteuert, alleine über die Teststrecke fahren zu lassen.
- **Lenkroboter:** Lenkroboter sind Systeme, welche auf das Lenkrad aufgebracht werden ohne das Lenkrad austauschen zu müssen oder dass die Funktion des Airbags eingeschränkt wird. Durch Lenkroboter lassen sich hoch dynamische Fahrmanöver exakt reproduzieren. Idealerweise verfügen sie über ein intuitives HMI. Durch Echtzeit-Steuerung und GPS lassen sich die Fahrmanöver auf den Zentimeter genau reproduzieren. Die Lenkmanöver sind frei definierbar und bei abgeschaltetem Motor kann der Fahrer das Fahrzeug selbst fahren. Hersteller für Lenkroboter sind z.B. ABD, VEHICO und RMS.

- **Kombinierter Brems- und Gaspedalroboter:** Die Kombination von Brems- und Gaspedalroboter ermöglicht fahrerloses Fahren. Der Einsatz von diesen Robotern ermöglicht es, Tests reproduzierbarer zu gestalten. Zudem wird kein Fahrer benötigt, was vor allem bei risikobehafteten Grenzfällen oder bei sehr belastenden Fahrversuchen von Vorteil ist.
- **Fahrzeug-Führungssystem (Path-Following):** Das Fahrzeug-Führungssystem von ABD ermöglicht die Kombination von einem Lenkroboter mit einem Echtzeit-Feedback, einer GPS-gestützten Inertialplattform, wodurch die Möglichkeit besteht, das Fahrzeug entlang einer vordefinierten oder eingelernten Strecke mit einer Genauigkeit von zwei Zentimeter fahren zu lassen. Dies ist auch bei hohen Geschwindigkeiten möglich. Durch dieses System ist eine ausgezeichnete Reproduzierbarkeit gegeben.
- **Bewertung:** Zur idealen Reproduzierbarkeit und selbständiges Fahren der Manöver bietet sich die Kombination aus einem Brems- und Gaspedalroboter mit einem Fahrzeug-Führungssystem. Dadurch ist es möglich, die Fahrzeuge selbständig - überwacht durch eine Leitstation - über die Teststrecke fahren zu lassen.

### 2.3.3.6.3. Unterschiedliche reale Fahrzeuge mit menschlichen Fahrern

Hier soll ein möglichst breites Spektrum der auf der Autobahn vorkommenden Verkehrsteilnehmer abgebildet werden. Aber in erster Linie sind die am häufigsten auftretenden Fahrzeuge zu beachten. Laut der Statistik von Kraftfahrt-Bundesamt siehe Abbildung 37 sind die meisten Fahrzeuge in Deutschland Personenkraftwagen, Lastkraftwagen, Krafträder sowie Kraftomnibusse. Daher sollten diese Fahrzeugtypen nach Möglichkeit auf der Teststrecke als Fahrzeug eingesetzt werden, um die Erkennbarkeit zu testen. Zum Stichtag 01.01.2018 sah der Fahrzeugbestand in Deutschland wie folgt aus:

Krafträder	4.390.126	7,82 %
Personenkraftwagen	45.955.656	81,81 %
Lastkraftwagen bis 3,5 t zGM	2.527.429	4,50 %
Lastkraftwagen über 3,5 bis 7,5 t zGM	241.400	0,43 %
Lastkraftwagen über 7,5 t zGM	308.290	0,55 %
<b>Lastkraftwagen (Summe)</b>	<b>3.077.119</b>	<b>5,48 %</b>
Land-/forstwirtschaftliche Zugmaschinen	1.873.266	3,33 %
Sattelzugmaschinen	207.798	0,37 %
Sonstige Zugmaschinen	123.918	0,22 %
<b>Zugmaschinen (Summe)</b>	<b>2.204.982</b>	<b>3,93 %</b>
Kraftomnibusse	78.585	0,14 %
Sonstige Kraftfahrzeuge	464.642	0,83 %
<b>Kraftfahrzeuge insgesamt</b>	<b>56.171.110</b>	<b>100,00 %</b>

Tabelle 23: Fahrzeugbestand in Deutschland 2018 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2015)

Geht man jetzt auf die jährlich gefahrenen Kilometer (siehe Abbildung 30) der Fahrzeuge ein so sieht man, dass Personenkraftwagen nicht nur die häufigsten sondern auch die Fahrzeuge mit den meisten im Jahr gefahrenen Kilometer sind. Jedoch sollten, trotz des seltenen Auftretens von anderen Fahrzeugen, diese nicht vernachlässigt werden.

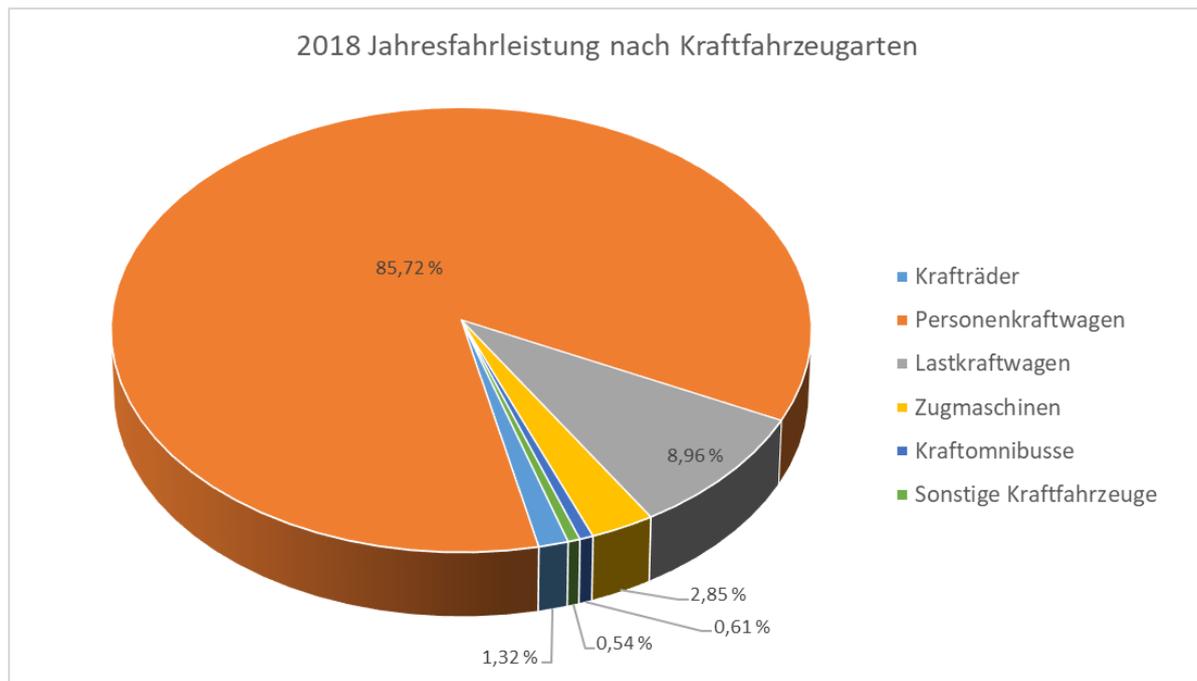


Abbildung 30: Prozentuale Aufteilung der Gesamtfahrleistung 2018 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2015)

Ein Holztransporter stellt z.B. für uns Menschen kein schlecht erkennbares Hindernis dar, für das hochautomatisierte Fahrzeug jedoch schon. Da Radarstrahlen von Holz absorbiert werden und nicht zurück strahlt das EGO-Fahrzeug der Meinung, dass kein Fahrzeug neben ihm ist. Es muss sichergestellt werden, dass auch Fahrzeuge mit spezieller Ladung von dem Testfahrzeug jederzeit erkannt werden. Ansonsten kann es wie in Abbildung 31 dargestellt zu einer kritischen Situation kommen, in dem das Testfahrzeug ein anderes Fahrzeug überholen möchte, obwohl die linke Spur durch einen Holztransporter befahren wird.

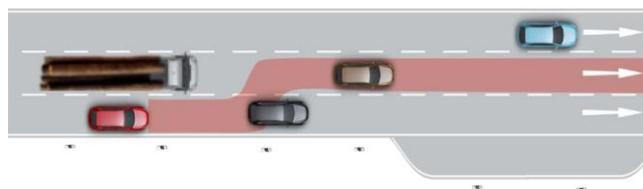


Abbildung 31: Use Case Holztransporter

Für das Stattfinden von Test Cases auf der Teststrecke muss dahingehend prinzipiell über die Anschaffung von mehreren realen Fahrzeugen nachgedacht werden z.B. Motorrad, LKW etc. Diese können gemietet oder gekauft werden. Auch ist darüber nach zu denken, diese von der Fahrfunktion zu automatisieren, d.h. diese evtl. mit einem Lenkroboter auszustatten. In welchem Ausmaß – auch über das PEGASUS Projekt hinaus – dies geschehen könnte, muss in einer Evaluierung von Seiten der Robert Bosch GmbH geschehen.

### 2.3.3.7 Anforderungen an die Teststrecke

#### 2.3.3.7.1. Bauliche Anforderungen

Aus den erarbeiteten Use Cases lassen sich Rückschlüsse auf die Teststrecke schließen. Für eine möglichst größte Realitätsnähe sollten auf der Teststrecke alle auf der Autobahn relevanten baulichen Herausforderungen umgesetzt werden. Für Autobahnen in Deutschland gibt

es die „Richtlinien für die Anlage von Autobahnen“ (RAA), welche sich mit dem Entwurf für Autobahnen beschäftigt. Die RAA versteht unter Autobahnen alle anbaufreien, zwei oder mehrstreifigen durchgehend planfrei geführten Straßen, welche für den schnellen Kraftfahrzeugverkehr frei gegeben sind.

Für Autobahnen der Kategorien AS0 bis ASII nach RIN siehe Tabelle 24 gilt die RAA.

Kategoriengruppe		Autobahnen	Landstraßen	anbaufreie Hauptverkehrsstraßen	angebaute Hauptverkehrsstraßen	Erschließungsstraßen
		AS	LS	VS	HS	ES
kontinental	0	AS 0		-	-	-
großräumig	I	AS I	LS I		-	-
überregional	II	AS II	LS II	VS II		-
regional	III	-	LS III	VS III	HS III	
nahräumig	IV	-	LS IV	-	HS IV	ES IV
kleinräumig	V	-	LS V	-	-	ES V

AS I	Bezeichnung der Kategorie, vorkommend
	problematisch
-	nicht vorkommend oder nicht vertretbar

Tabelle 24: Straßenkategorien nach RIN und Geltungsbereich der RAA (Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, 2008)

Autobahnen der Kategorien AS0 und ASI außerhalb und innerhalb bebauter Gebiete (Fernautobahnen) sowie Autobahnen der Kategorie ASII außerhalb bebauter Gebiete (Überregionalautobahnen) werden nach der EKA1 entworfen. Um die Verbindungsbedeutung (Verbindungsstufe) angemessen berücksichtigen zu können, erfolgt eine Differenzierung in die EKA1A (AS0 und I) und die EKA1B (ASII). Ihnen sind jeweils abgestufte Entwurfs Elemente für die Linienführung zugeordnet. Hierbei ist vor allem zu beachten, für welche Richtgeschwindigkeiten sie ausgelegt sind. Für ...

- Fernautobahnen (EKA1A) ist eine Geschwindigkeit von 130 km/h vorgesehen
- Überregionalautobahnen (EKA1B) ist eine Geschwindigkeit von 120 km/h vorgesehen
- Autobahnähnliche Straßen (EKA2) ist eine Geschwindigkeit von 100 km/h vorgesehen
- Für Stadtautobahnen (EKA3) ist eine Geschwindigkeit von 80 km/h vorgesehen

Entwurfsklasse	EKA 1 A	EKA 1 B	EKA 2	EKA 3
Bezeichnung	Fernautobahn	Überregionalautobahn	Autobahnähnliche Straße	Stadtautobahn
Beschilderung	Z 330 StVO (Autobahn)		Z 331 StVO (Kraftfahrstraße)	Z 330 oder Z 331 StVO
Wegweisung	blau		gelb	blau, gelb
zulässige Höchstgeschwindigkeit*	keine		keine	≤ 100 km/h
empfohlene Knotenpunktabstände	> 8000 m	> 5000 m	> 5000 m	keine
Verkehrsführung in Arbeitsstellen vierstreifiger Straßen	4+0 in der Regel erforderlich		4+0 nicht zwingend erforderlich	

Tabelle 25: Entwurfsklassen und Gestaltungsmerkmale (Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, 2008)

Für die Teststrecke relevant ist in erster Linie EKA1A, da hier die höchsten Geschwindigkeiten gefahren werden können. Jedoch kann es aus mangelndem Platz sein, dass einzelne Abschnitte nach der Entwurfsklasse EKA1B gestaltet werden. Zu beachten ist dabei dann die angepasste Geschwindigkeit. Die Breite der Fahrstreifen und Seitenstreifen für Autobahnen der Entwurfsklasse EKA1 sollten wie in Tabelle 26 sein:

<b>Fahrstreifen</b> Vier- und sechsstreifigen Autobahnen	Rechter Fahrstreifen → 3,75 m Linke Fahrstreifen → 3,5 m
<b>Fahrstreifen</b> Achtstreifigen Autobahnen	Die beiden rechten Fahrstreifen → 3,75 m Linken Fahrstreifen → 3,5 m
<b>Seitenstreifen</b> Vier- und sechsstreifigen Autobahnen	Breite min. 2,5 m
<b>Seitenstreifen</b> Achtstreifigen Autobahnen	Breite → 3,0 m

Tabelle 26: Abmaß für Fahr- und Seitenstreifen nach RAA (Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, 2008)

### 2.3.3.7.2. Mindestradius von Kreisbögen

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Mindestradius und die Mindestlänge für Kreisbögen nach EKA1A.

In der RAA sind Mindestradien und Mindestlängen von Kreisbögen festgelegt. Auf einer Autobahn sollte die Längsneigung max. 4% betragen und die Querneigung in einem Bereich von 2,5% - 6% liegen. Beträgt die Querneigung 6% so ist ein min. Radius von 900m und eine Länge von min. 75m vorzusehen. Dies berechnet sich wie folgt:

$$\min R = \frac{v^2}{3,6^2 * g * (\max fR * n + q)}$$

- minR [m] = Kurvenmindestradius
- V [km/h] = Geschwindigkeit
- g [m/s<sup>2</sup>] = Erdbeschleunigung
- q [-] = Querneigung
- n [-] = Ausnutzungsgrad  
Ausnutzung des max. radialen Kraftschlussbeiwertes n=0,4 (freie Strecke, q=6,0%)
- maxfR [-] = maximaler radialer Kraftschlussbeiwert = 0,925·fT

V	FT,RAA	minR /q=6,0%, n=0,4	minR /q=2,5%, n=0,1
80	0,32	280	925
90	0,30	370	1200
100	0,29	470	1500
120	0,27	720	2300
130	0,25	900	2700

Tabelle 27: min. Radien für Autobahnen

### 2.3.3.7.3. Mittelstreifenüberfahrten

Mittelstreifenüberfahrten dienen der bauzeitlich bedingten Überleitung des Verkehrs von einer Richtungsfahrbahn auf die andere. Die Länge der Überfahrten beträgt im Regelfall (bei einer Mittelstreifenbreite von 4,00 m) für das Überleiten von

- Zwei Fahrstreifen  $L = 135 \text{ m}$
- Drei Fahrstreifen  $L = 220 \text{ m}$

Hierdurch ist die sichere Führung von Fahrstreifen mit jeweils 3,75 m Breite und einem dazwischenliegenden Trennstreifen über den Mittelstreifen möglich. Auf geraden Streckenabschnitten ergeben sich für die S-förmige Überleitung der Fahrstreifen Radien von  $R = 350 \text{ m}$ . Damit ist eine Geschwindigkeit von  $V_{\text{zul}} = 80 \text{ km/h}$  sicher fahrbar.

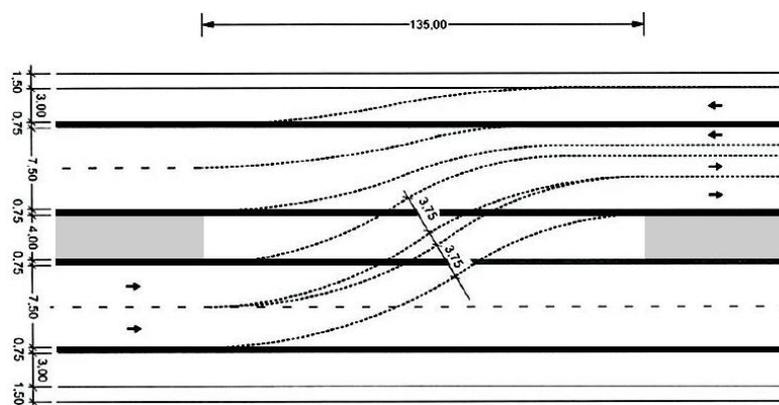


Abbildung 32: Mittelstreifenüberfahrt vierstreifige Autobahn (Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, 2008)

Für die Teststrecke sollte die Möglichkeit, eine Mittelstreifenüberfahrt durchführen zu können, eingeplant werden um Baustellensituationen zu testen. Die Herausforderung hier besteht darin, dass, das Testfahrzeug die gelben Markierungen als relevant betrachtet und diesen folgt und nicht der dauerhaften weißen Markierung.

### 2.3.3.7.4. Benötigte Streckenlänge

Anhand dieser Vorgaben für Deutsche Autobahnen lassen sich die Anforderungen für den Straßenverlauf auf einer Teststrecke ableiten und welchen Bedingungen ein Fahrzeug auf deutschen Autobahnen ausgesetzt ist um die Realität bestmöglich nachzustellen.

Des Weiteren ist zu beachten, wie lange ein Testfahrzeug benötigt, um auf die max. Geschwindigkeit von 130 km/h zu beschleunigen und ein Überholmanöver durchzuführen. Außerdem wird eine Funktion „Autobahnchauffeur“ sowohl für den Fernlastverkehr mit 40 Tonnen und 85 km/h als auch für Platooning-Ansätze eine essentielle Bedeutung in der Zukunft haben. Damit müssen auch diese Aspekte für bauliche Maßnahmen von Teststrecken Berücksichtigung finden. Weiterhin wird eine gewisse Versuchsdauer mit den entsprechenden Zielgeschwindigkeiten & Annäherungsgeschwindigkeiten zu berücksichtigen sein.

Werden nun die Fahrleistungsdaten verschiedener 40-Tonner betrachtet, so benötigen diese im Durchbeschleunigen aus dem Stand (0 km/h) bis 85 km/h allein zwischen 540-630 m bis die Zielgeschwindigkeit erreicht ist.

Erfordert ein Fahrversuch eine Messdauer von 60 s wird im Schwerlastverkehr bei 85 km/h bereits eine Wegstrecke von mehr als 1,4 km zurückgelegt. Im Pkw-Bereich bei 130 km/h bereits 2,17 km. In einer weiteren Betrachtung lässt sich die Zeit, die ein Überholmanöver erfordert, berechnen:

LKW [km/h]	PKW(ego) [km/h]	t [s]	s [m] Überholweg
80	160	5,47	243,00
80	150	6,25	260,36
80	140	7,29	283,50
80	130	8,75	315,90
80	120	10,94	364,50
80	110	14,58	445,50
80	100	21,87	607,50
60	160	4,37	194,40
60	150	4,86	202,50
60	140	5,47	212,63
60	130	6,25	225,64
60	120	7,29	243,00
60	110	8,75	267,30
60	100	10,94	303,75

PKW km/h	ego km/h	t [s]	s [m] Überholweg
100	110	39,6	1210,00
100	120	19,8	660,00
100	130	13,2	476,67
100	140	9,9	385,00
100	150	7,92	330,00
100	160	6,6	293,33

*Tabelle 28: Benötigte Zeit und Strecke für ein Überholmanöver*

Bei dem Überholmanöver darf aber nicht nur die reine Zeit zum Überholen berücksichtigt werden. Da zuerst das Fahrzeug vor einem detektiert werden muss und dann prüft das Testfahrzeug die Möglichkeit des Überholens und die Differenz-Geschwindigkeit zu dem Vordermann.

Damit lässt sich schlussfolgern, dass für das Grundlayout einer Teststrecke ein Rundkurs benötigt wird, damit zu Versuchsbeginn alle Versuchsbeteiligten mit einer gewissen Startgeschwindigkeit in die Geraden einfahren können.

Außerdem muss eine ausreichende Sicherheitsreserve bei möglichen Verzögerungen in der Versuchsdurchführung für die Versuchsteilnehmer vorgesehen werden.

Ausgehend von den eben genannten Zahlen und einem eingeschwungenen Fahrzustand sollte eine gerade Streckenlänge von mindestens 1,8 km bis 2 km vorhanden sein.

Aus diesen Betrachtungen sowie den Berechnungen wurde im Verlauf vom PEGASUS Projekt ersichtlich, dass die bisher vorhandenen möglichen Strecken z.B. im BOSCH-Prüfzentrum in Boxberg für die Funktion „Autobahnchauffeur zu kurz ist, da hier der gerade mögliche „Autobahn“-Teil im Hochgeschwindigkeitsoval nur ca. 360 m beträgt und danach direkt die starke Überhöhung der Steilwandkurven kommt. An dieser Stelle hat sich Bosch für eine Versuchsdurchführung bei der TRIWO GmbH in Pferdsfeld ausgesprochen bzw. diesen Vorschlag unterstützt.

### **2.3.3.7.5. Asphaltarten**

Auf deutschen Autobahnen kommen verschiedenen Asphaltdeckschichten, die obersten stark beanspruchten Schichten, zum Einsatz. Sie sind dem direkten Einfluss von Verkehr, Witterung und Auftaumitteln ausgesetzt.

#### **Aufgaben der Asphaltdeckschichten:**

- Sie soll dem Verkehr eine dauerhafte gut befahrbare Oberfläche ermöglichen
- Die direkte Einwirkung von Verkehr und Witterung wird so von den unteren Schichten ferngehalten

### **Anforderung an eine Asphaltdeckschicht:**

- Witterungsbeständigkeit
- Verschleißfestigkeit, Verformungs- und Ermüdungsbeständigkeit
- Verkehrssicherheit durch gute dauerhafte Ebenheit, Griffigkeit
- Geräuscharm befahrbare Oberflächen

Es erfolgt eine kurze Übersicht über die Asphaltarten, die geeignet sind für die Deckschichten auf Autobahnen in Deutschland.

a) Gussasphalt (MA mastic asphalt) DIN EN 13108-6

Gussasphalt ist eine Mischung aus gebrochenen groben und feinen Gesteinskörnungen, Füller und Bitumen wenn nötig aus weiteren Zusätzen.

b) Offenporiger Asphalt (PA porous asphalt) oder „Flüsterasphalt“

Der Offenporiger Asphalt wird an Stellen eingesetzt, an welchen die Fahrgeräusche reduziert werden sollen. Im Asphalt entstehen mehr Hohlräume durch einen hohen Anteil gröberer Gesteinskörner. Durch die Hohlräume kann das Wasser besser abfließen. Die Haltbarkeit des offenporigen Asphalts liegt bei ca. acht bis zehn Jahren wohingegen ein normaler Straßenbelag min. 20 Jahre hält.

c) Splittmastixasphalt (SMA stone mastic asphalt) DIN EN 13108-5

Splittmastixasphalt ist gekennzeichnet durch ein Gesteinskörnungsgemisch mit einem deutlich höheren Anteil an gebrochenen groben Gesteinskörnungen und Ausfallkörnung, hohem Bindemittelgehalt und stabilisierende Zusätze. SMA verträgt im Hinblick auf Verdichtbarkeit und Verformungsbeständigkeit größere Schwankungen in der Schichtdicke (beispielsweise bei unebener Unterlage), da SMA relativ unempfindlich gegen Nachverdichtung und Verformung ist.

#### **2.3.3.7.6. Fahrbahnmarkierungen**

Fahrbahnmarkierungen sind Verkehrszeichen im Sinne der Straßenverkehrsordnung (StVO). Sie werden auf Straßen in Deutschland entweder in Weiß als dauerhafte Markierung oder in Gelb als vorübergehende Markierung eingesetzt. Darüber hinaus müssen sie eindeutig erkennbar sein, eine fortlaufende optische Führung der Verkehrsteilnehmer gewährleisten und höchsten Belastungen standhalten. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen Markierungssysteme vorgeschriebene Mindestanforderungen hinsichtlich der Sichtbarkeit, Griffigkeit und Verschleißfestigkeit erfüllen. Diese Mindestanforderungen sind auf nationaler Ebene in den "Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Markierungen auf Straßen (ZTV M 13)" und den "Technischen Lieferbedingungen für Markierungsmaterialien (TL M 06)" festgelegt. Diese nationalen Regelwerke richten sich nach den gültigen europäischen Normen. Darüber hinaus wird noch zwischen herkömmlichen Markierungen (Typ I) und Markierungen mit erhöhter Nachtsichtbarkeit bei Nässe (Typ II) unterschieden. Auf Autobahnen kommt generell der Typ II Markierungen zum Einsatz.

Es wurde in Betracht gezogen, dass ein Teil der Fahrbahn auf der Teststrecke mit vorübergehender Markierung in weiß versehen wird, um unterschiedliche Szenarien darstellen zu können. Aber auch gelbe vorübergehende Markierungen, welche über den weißen aufgebracht

werden, sollten auf der Strecke aufbringbar sein, um Situationen wie eine Baustelle abbilden zu können.

#### **2.3.3.7.7. Verkehrsschilder**

§ 39 Verkehrszeichen. Regelungen durch Verkehrszeichen gehen den allgemeinen Verkehrsregeln vor. Verkehrszeichen sind Gefahrzeichen, Vorschriftzeichen und Richtzeichen. Als Schilder stehen sie regelmäßig rechts. Gelten sie nur für einzelne markierte Fahrstreifen, sind sie in der Regel über diesen angebracht.

Auch Zusatzzeichen sind Verkehrszeichen. Zusatzzeichen zeigen auf weißem Grund mit schwarzem Rand schwarze Sinnbilder, Zeichnungen oder Aufschriften, soweit nichts anderes bestimmt ist. Sie sind unmittelbar, in der Regel unter dem Verkehrszeichen, auf das sie sich beziehen, angebracht.

Verkehrszeichen können auf einer weißen Trägertafel angebracht sein. Abweichend von diesen Verkehrszeichen können in Wechselverkehrszeichen die weißen Flächen schwarz und die schwarzen Sinnbilder und der schwarze Rand weiß sein, wenn diese Zeichen nur durch Leuchten erzeugt werden.

Verkehrszeichen können an einem Fahrzeug angebracht sein (z.B. Einsatzfahrzeuge Polizei, Feuerwehr, Notarzt, Rettungsdienst, THW, etc.). Sie gelten auch, während das Fahrzeug sich bewegt. Sie gehen den Anordnungen der ortsfest angebrachten Verkehrszeichen vor.

Auf der Teststrecke sollte die Vielfalt der einzelnen Verkehrsschilder möglichst groß sein. Daher eignen sich vor allem Wechselschilder idealerweise als Schilderbrücke mit IRS aber auch feste Schilder ohne Kommunikationsmöglichkeit sollten vorhanden sein, um die Vielfalt am besten abzudecken. Des Weiteren ist es für die Teststrecke wichtig, auch Fahrzeuge mit Verkehrszeichen zu nutzen, um Test Cases für Baustellen oder Polizeieinsatz testen zu können.

#### **2.3.3.8 Topologie und Elemente der Teststrecke**

Nach dem im Kapiteln zuvor die Test Cases herausgearbeitet wurden ist es hier wichtig, wie die Teststrecke topologisch aussehen muss um das gesamte Testspektrum abbilden zu können. Die wesentlichen Elemente für die Funktion des Autobahnchauffeurs werden im Folgenden kurz vorgestellt.

##### **2.3.3.8.1. Witterung und Reibwerte**

Witterungsbedingte Einflüsse lassen sich sehr schlecht simulieren. Daher ist es wichtig, dies in der Realität zu testen, da LIDAR und Kamera aber witterungsanfällig sind, sollte dies zuerst auf einer Teststrecke getestet werden. Deshalb wäre es sinnvoll, einen Regengenerator auf einer Teststrecke anzubringen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass es nicht genügt, die Strecke zu bewässern. Dadurch ließen sich nur die Auswirkungen von Spritzwasser auf die Sensoren testen.

Es ist aber wichtig, dass die Tests so realistisch wie möglich sind. Als möglicher Ansatz kann man sich hier einer in der Landwirtschaft eingesetzten Bewässerungstechnik bedienen, bei welcher das Wasser gleichmäßig von Oben über der Strecke verteilt werden kann. Diese Anlage kann entweder in mehreren Bahnen hintereinander installiert werden oder als fahrbares Gestänge.

Durch die Beregnung lassen sich unterschiedliche  $\mu$ -Werte auf der Strecke reproduzierbar herstellen sowie Regen nachbilden. Alternativ kann Regen in kleineren Bereichen für Prinzipuntersuchungen mit Hilfe der Werksfeuerwehr erzeugt werden. Nebel kann partiell mit Nebelmaschinen generiert werden. Schnee, Dämmerung, Nacht, tiefstehende Sonne und schlechte Lichtverhältnisse lassen sich künstlich sehr schlecht auf einer Teststrecke herstellen. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass die Strecke auch in Randzeiten benutzt werden kann.

### 2.3.3.8.2. Kurven mit unterschiedlichen Radien und Querneigung

Kurven mit kleinen Radien stellen ein Problem für die Kamera dar, da sie nach vorne gerichtet ist und nicht dem Kurvenverlauf folgt. Auch für Tests der Fahrdynamik und das Gesamtverhalten des Testfahrzeugs sind solche Vorkommnisse auf Teststecken wichtig. Es muss auch getestet werden, wie das System im Testfahrzeug reagiert wenn in der Kurve ein Fahrzeug stehen geblieben ist oder ein Hindernis auf der Straße liegt.

### 2.3.3.8.3. Kuppen und Senken

Bei Kuppen und Senken ist die Haltesichtweite einzuhalten, siehe Abbildung 33. Sind Kuppen und Senken zu extrem ausgebaut, ist die Sichtweite sehr begrenzt und die Geschwindigkeit des Testfahrzeugs muss der Sichtweite seiner Sensoren angepasst werden. Ist eine Senke zu steil könnte das Testfahrzeug die Straße als stehendes Hindernis interpretieren und abbremsen.

- Augpunktshöhe  $h = 1,0$  m
- Zielpunkthöhe  $h = 1,0$  m – für Sichtweitennachweis (Stauende)
- Zielpunkthöhe  $h = 0,5$  m – eingerechnet (Sicherheit)

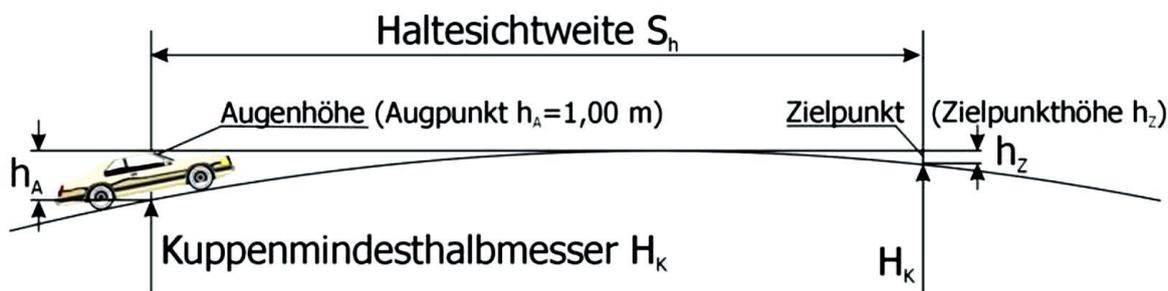


Abbildung 33: Bemessungsgrundlagen Kuppenhalbmesser

### 2.3.3.8.4. Auf- und Abfahrten

Es muss die Möglichkeit geboten werden sowohl Auffahrten wie auch Abfahrten auf der Teststrecke zu testen siehe Abbildung 34. Nach der RAA ist die kürzeste Strecke für eine Auf- und Abfahrt 150 m dies sollte auch auf der Teststrecke eingehalten werden. Zwischen der Auffahrt und Abfahrt sollte ein gewisser Abstand eingehalten werden.

Hierfür würden sich mindestens 1.000 m anbieten, dann kann auf der Geraden ein Überholmanöver getestet werden.

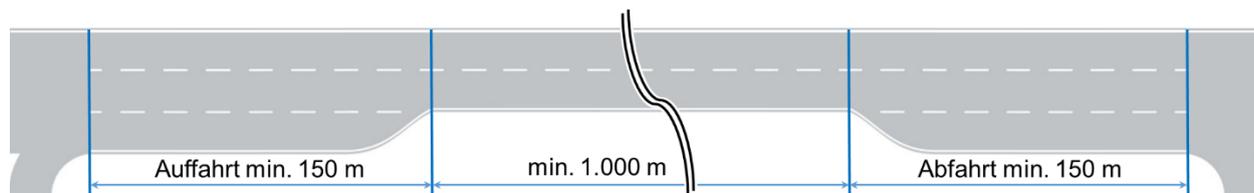


Abbildung 34: Auf- und Abfahrten

### 2.3.3.8.5. Tunnel und Brücken

Für das Testen von HAF wäre eine Brücke mit Dehnungsfuge sinnvoll. Der RADAR detektiert diese als stehendes Objekt und je nach Witterung oder andere negative Einflüsse auf die anderen Sensoren kann es dadurch zu einer Fehlentscheidung kommen. Bei Tunneln auf Teststrecken ist es wichtig, dass sie keine günstigen Attrappen aus Holz sind, ansonsten wird der Tunnel vom RADAR nicht wahrgenommen.

### 2.3.3.8.6. Autobahndreiecke und -kreuze

Um von der einen Autobahn auf die andere zu kommen, sind Autobahnkreuze unerlässlich. Verschiedene Bauformen sind in den nachfolgenden Abbildungen ersichtlich. Da das Testfahrzeug dies im späteren Anwendungsfall nach dem PEGASUS Projekt aber selbständig absolvieren soll, muss auch solch eine Situation vorher getestet werden. Wichtig hierbei ist, die min. Radien laut RAA zu beachten. Sind die Radien zu klein, sehen die Sensoren nicht genug um sicher ihre Umgebung zu detektieren.

Entwurfsklasse der durchgehenden Autobahn		EKA 1	EKA 1	EKA 3
Entwurfsklasse der stumpf angeschlossenen Autobahn („dritter Ast“)		EKA 1	EKA 3	EKA 3
linksliegende Trompete		+	+	+
rechtsliegende Trompete		-	•	•
Birne		•	•	+
Dreieck mit einem Bauwerk		+	+	+
Dreieck mit drei Bauwerken		+	+	+
Dreieck ohne einheitliche Definition der durchgehenden Fahrbahnen		-	-	+

Abbildung 35: Bauarten von Autobahn-Dreiecken

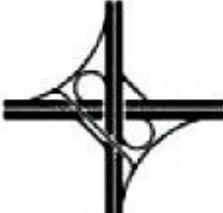
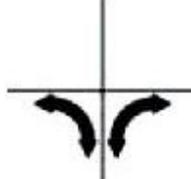
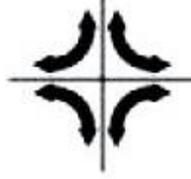
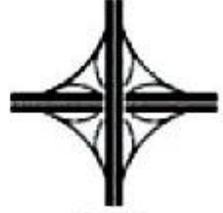
Lage der starken Eckströme	geeignete Systeme	
	 <p>(Bild 6.1-6.2)</p>	
	 <p>(Bild 6.3)</p>	 <p>(Bild 6.4)</p>
	 <p>abgewandelte Windenblöcke</p>	
	 <p>abgewandelte Windenblöcke</p>	 <p>(Bild 6.4, Variante 2)</p>
	 <p>(Bild 6.5 – abgewandeltes System)</p>	<p>entw. AN Köln-Ost</p>
	 <p>(Bild 6.5)</p>	 <p>(Bild 6.6)</p>

Abbildung 36: Bauarten von Autobahnkreuzen

#### **2.3.3.8.7. Fahrbahnverengungen/-erweiterungen**

Da auf Autobahnen immer wieder Fahrbahnverengungen und -erweiterungen auftreten ist es wichtig, dass das korrekte Einfädeln auf der Teststrecke getestet werden kann.

#### **2.3.3.8.8. Unterschiedliche Fahrbahnmarkierungen**

Im Baustellenbereich kommt es immer wieder dazu, dass eine gelbe Markierung über einer weißen Markierung liegt. Hier ist zu beachten, dass die gelbe Markierung Vorrang hat. Die richtige Wahrnehmung der einzelnen Fahrbahnmarkierungen ist hierbei sehr wichtig.

Je nach Tageszeit oder Witterung kann es zu Komplikationen kommen, da die Kamera kein ideales Sichtfeld hat. Auf der Teststrecke sollte es Fahrbahn-Markierungswechselsysteme geben.

#### **2.3.3.8.9. IRS Wechselverkehrszeichen**

Nicht nur feste Verkehrszeichen sollten auf der Teststrecke verbaut werden, sondern auch Wechselverkehrszeichen welche die Möglichkeit von Car2Infrastruktur bieten. Damit sind die Möglichkeiten der unterschiedlichen Verkehrssituationen nachzubauen gegeben.

#### **2.3.3.8.10. Verschiedene Geschwindigkeiten**

Hierbei wird getestet, ob sich das Testfahrzeug eigenständig an die Geschwindigkeitsvorgaben anpasst. Diese können variieren durch z.B. regenbedingte schlechte Sicht oder Stau etc.

#### **2.3.3.8.11. dGPS Stationen**

Trotz hochgenauem GPS ist ein permanentes dGPS Signal unabdingbar. Die Referenzdaten ermöglichen die Kontrolle, ob man sich auch dort befindet wo man laut Lokalisierung sein soll.

#### **2.3.3.8.12. Baustellenequipment**

Unter Baustellenequipment sind Pylonen, Schilder, Absperrschranke, Warn und Leitbake mit Licht, Baustellenfahrzeuge etc. zu verstehen.

#### **2.3.3.8.13. Gebäude**

Des Weiteren muss die Gebäude Infrastruktur die gängigsten Gebäude für Teststrecken vorweisen wie z.B. Werkstätten, Tankstelle, Garagen, Lagerfläche, Büros etc.. In diesen Gebäuden sollte auch eine Küche/Kantine vorhanden sein.

#### **2.3.3.8.14. Leitstand**

Auf der Teststrecke sollte es einen zentralen Leitstand geben, von dem aus die Überwachung der Fahrroboter auf der Teststrecke möglich ist. Des Weiteren ist es vorteilhaft, wenn vor Ort ein gewisser Fuhrpark für die Durchführung der Tests vorhanden ist.

#### **2.3.3.8.15. Weitere Anforderungen und Services**

Die Verfügbarkeit von einem Rettungsdienst sowie einer Feuerwehr muss zu jedem Betriebszeitpunkt gegeben sein.

Des Weiteren müssen die baulichen Umsetzungen der Teststrecke dem gängigen Prototypenschutz Reglement entsprechen, Sichtschutz, Zugangsbeschränkung und Security Service. Für eine 24h Nutzung könnte dies auch über ein Tor und eine Zutrittsberechtigungskarte geregelt werden.

### 2.3.3.9 Entwurf Teststrecke

Resultierend aus allen Betrachtungen ist in Abbildung 37 ist eine Entwurfsdarstellung einer HAF-Teststrecke wie sie Ideal für das Testen der Funktion Autobahnchauffeur wäre. Diese Darstellung geht deutlich über die Anforderungen an eine Teststrecke wie sie im PEGASUS-Projekt gefordert hinaus. Jedoch werden sich die HAF-Funktionen über die Grenzen des PEGASUS Projekts hinaus stetig weiterentwickeln und vom planungsstand einer Teststrecke bis zur baulichen Realisierung von Anforderungen vergehen in der Regel mehrere Jahre, sodass die getroffenen Betrachtungen bereits jetzt schon zukünftige Anforderungen berücksichtigen müssen.

Diese Teststrecke besitzt einen Tunnel, eine Brücke, ein Autobahndreieck, Auf- und Abfahrten sowie Fahrbahnverengungen und -erweiterungen, wodurch es möglich ist alle Use Cases zu testen.

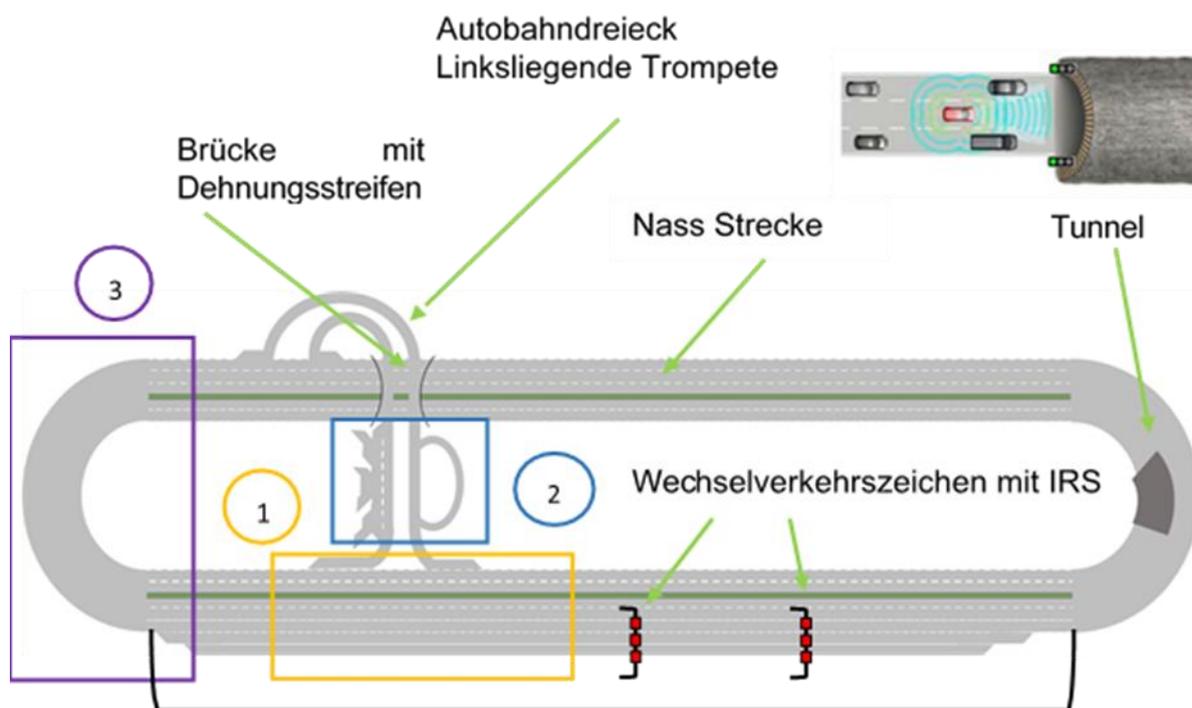


Abbildung 37: Optimale Teststrecke für HAF

In Abbildung 37 sind drei Teilbereiche markiert (Nr.1 = gelb, Nr.2 = blau, Nr.3 = violett). Diese Teilbereiche werden im Folgenden im Detail unter bildlicher Verdeutlichung der Use Cases dargestellt. Der Auszug Nr. 1 (gelber Testbereich) von der HAF-Gesamtteststrecke dargestellt. In diesem Streckenabschnitt lassen sich nachfolgende Use Cases testen:

- Mittelstreifenüberfahrt im Baustellenbereich
- Einfädeln auf die durchgehende Fahrbahn
- Langsameres Fahrzeug schert vor dem Testfahrzeug ein (→Autobahnchauffeur)
- Zweifacher Spurwechsel (→Autobahnchauffeur)
- Vorausfahrendes Fahrzeug hält auf Nothaltelinie (→Autobahnchauffeur)
- Testfahrzeug hält auf Nothaltelinie (aus mittlerer oder rechter Fahrspur)
- Nothaltelinie ist zum Befahren freigegeben

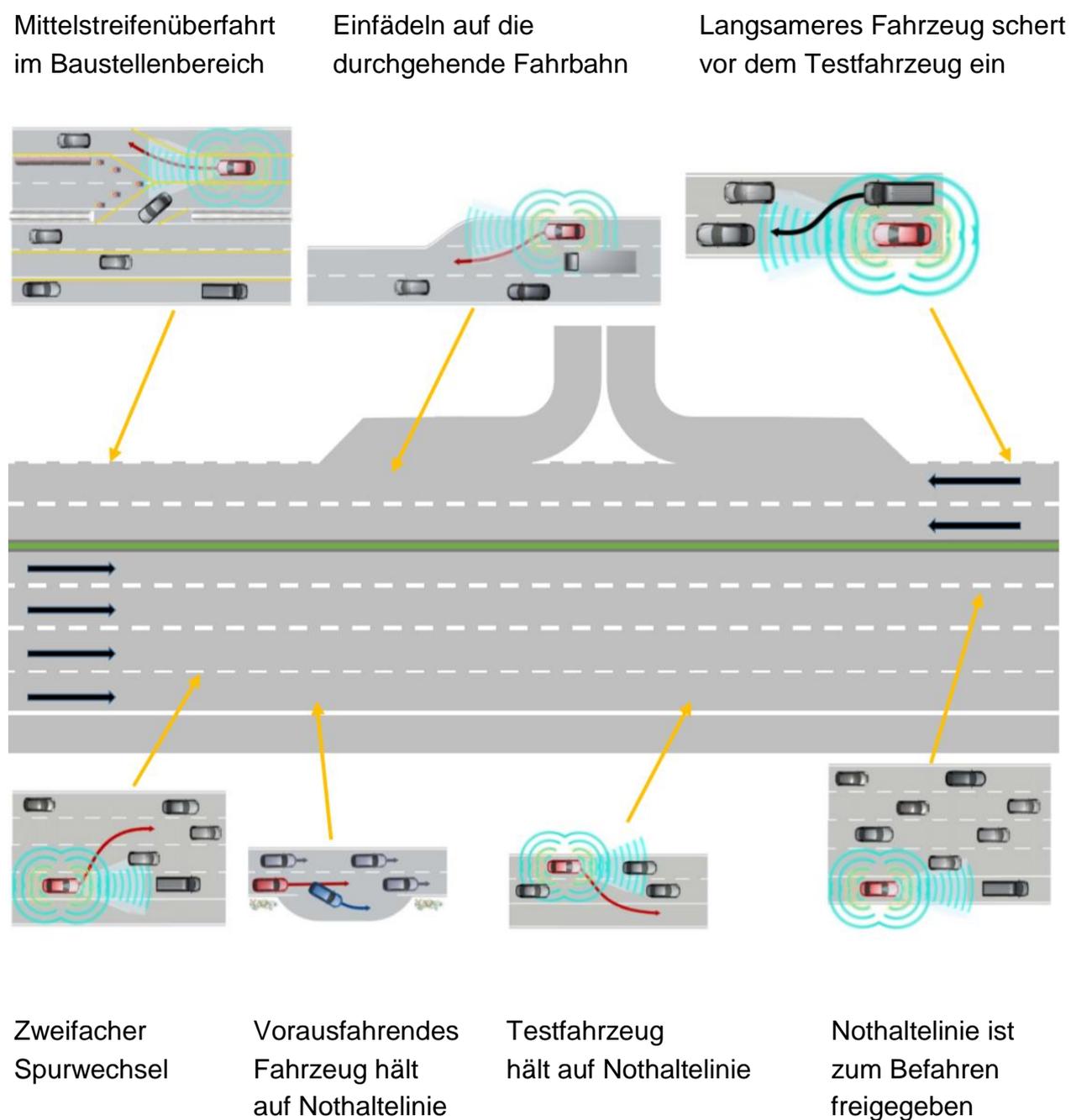


Abbildung 38: Auszug Nr.1 von der HAF-Gesamtteststrecke mit versch. Use Cases

Abbildung 38 ist der Auszug Nr.2 (blauer Testbereich) von der Gesamtteststrecke. Wie im Folgenden ersichtlich lassen sich hier folgende Use Cases testen.

- Verflechtungsbereich

- Auf- und Abfahren von der Autobahn (auch Permanentbetrieb)
- Einscheren in Ab- und Auffahrt (→Autobahnchauffeur)

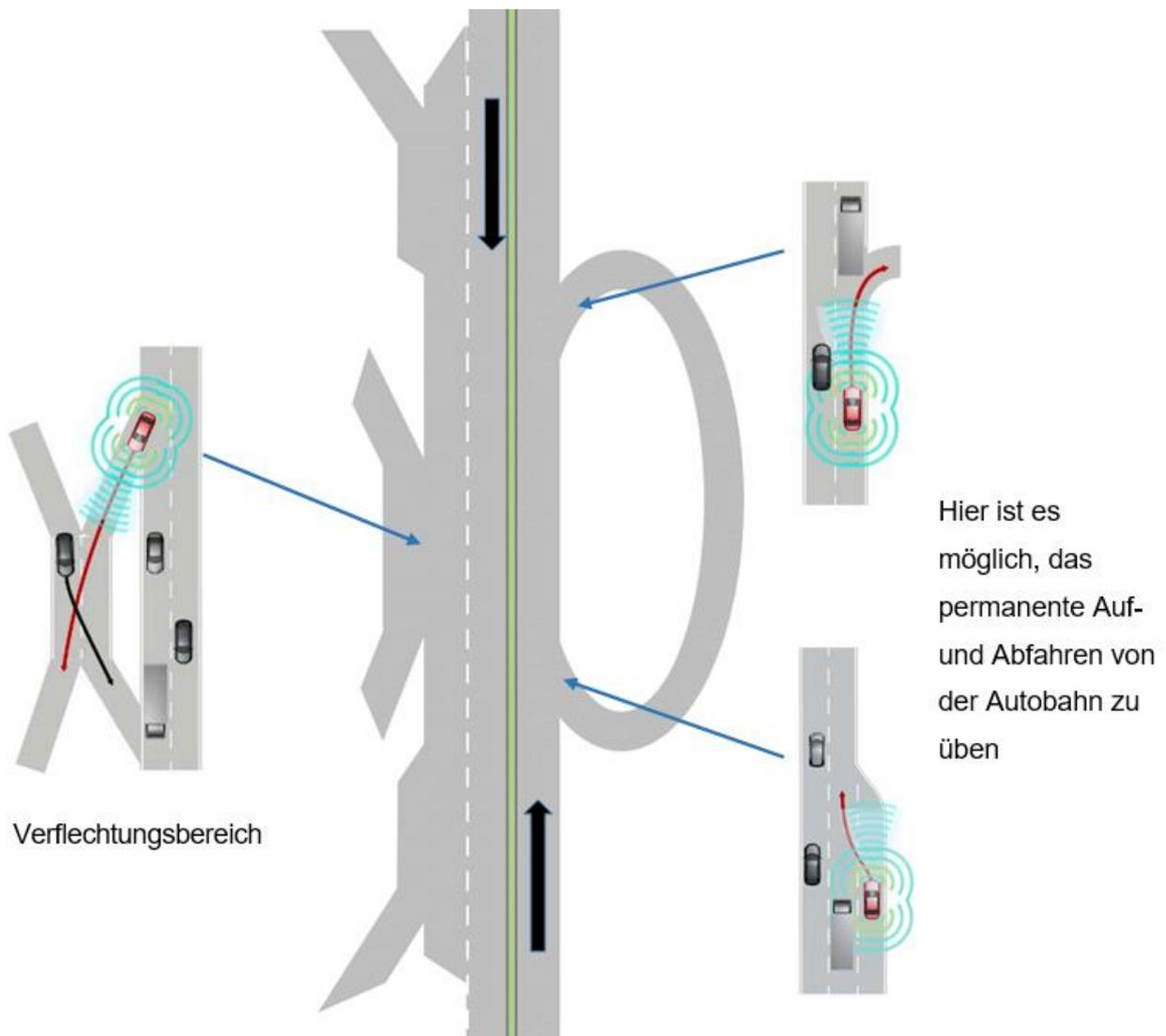


Abbildung 39: Auszug Nr.2 von der HAF-Gesamtteststrecke mit versch. Use Cases

Hieraus ist ersichtlich, warum Kurven auf einer Teststrecke unerlässlich sind. Wie im Folgenden ersichtlich lassen sich hier folgende Use Cases testen.

- Umfeld Wahrnehmung im Kurvenbereich (→Autobahnchauffeur)
- Hindernisse im Kurvenbereich
- Ein- und Ausschervorgänge im Kurvenbereich (→Autobahnchauffeur)
- Tunnelfahrten (gegenüberliegender Kurvenbereich) (→Autobahnchauffeur)

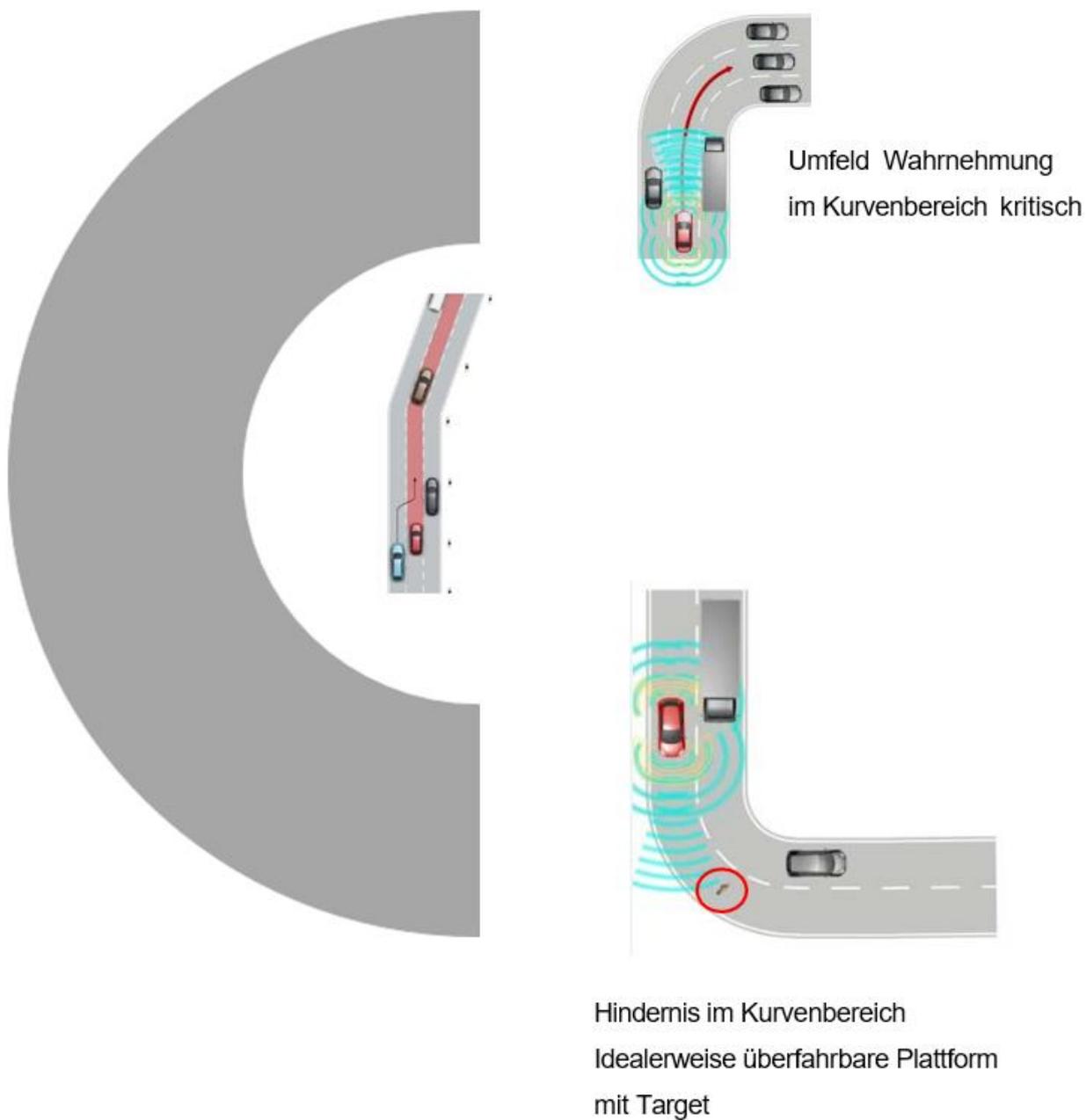


Abbildung 40: Auszug Nr.3 von der HAF-Gesamtteststrecke mit versch. Use Cases

### 2.3.3.10 Bewertung

In folgender Tabelle ist eine Bewertung der einzelnen Komponenten auf einer Teststrecke für das Testen von HAF abgebildet.

	Kosten	Platzbedarf	Notwendigkeit	Umsetzbarkeit
Streckenlänge	Sehr hoch	hoch	neutral-hoch	Zum Teil

Tunnel	hoch	neutral	neutral	Ja
Unterschiedliche Radien	neutral	neutral	hoch	Ja
Brücke	hoch	hoch	niedrig	Nein
Autobahnkreuz/ Autobahndreieck	hoch	hoch	neutral	Nein
Witterungen - Regen - Schnee - Nebel	niedrig	niedrig	hoch	Zum teil
Unterschiedliche $\mu$ -Werte	niedrig	niedrig	hoch	Ja
Kuppen und Senken	neutral	neutral	niedrig	Zum Teil
Querneigung	neutral	neutral	niedrig	Zum Teil
Auf- und Abfahrten	neutral	neutral	hoch	Ja
Unterschiedliche Fahrbahnmarkierung (Farbe, Streckenverlauf)	niedrig	niedrig	hoch	Ja
IRS Wechselverkehrszeichen	neutral	niedrig	hoch	Ja
Unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche	niedrig	niedrig	hoch	Ja
Gebäude (Werkstatt, Büros, Leitstand)	hoch	hoch	Hoch	Ja
dGPS Stationen	neutral	niedrig	hoch	Ja

Tabelle 29: Bewertung der Streckenelemente

Nach der Bewertung der einzelnen Komponenten der Teststrecke ist das Resultat, dass einige Komponenten nicht zwingend auf der Teststrecke umgesetzt werden müssen.

#### 2.3.4 Umsetzung mit Versuchsträgern (UAP 3.3.2, 3.3.3 und UAP 3.4.2)

Die Umsetzung mit Versuchsträgern konzentrierte sich darauf, Daten im Feld zu sammeln, um sie dann der PEGASUS-Datenbank zur Verfügung zu stellen.

Das bisher komplexeste Sensorset aus reiner Sicht von Fahrassistenz-Systemen war bisher ein 1R1V System, welches aus einem Frontradar („1R“) und einer Front-Videokamera („1V“) besteht. Diese wurden meistens direkt über ein Bussystem miteinander verbunden.

Die Absicherung des Gesamtsystems wurde von der des etablierten Radars übernommen, weshalb ein Dauerlauf angedacht war. Die entsprechend hohe Anzahl aufzuzeichnender Stunden valider Daten war eine Prämisse, um aussagekräftige Schlüsse zur False Positive Rate (fälschlich detektierte Objekte) ziehen zu können.

Das für die Fzg.-Architektur beauftragte HAF-Team war für den Planungsteil zuständig, welches Sensorset wie verbaut und aufgezeichnet werden muss. Das beinhaltet die Auswahl der Komponenten, Bestellung der Komponenten, Schaltpläne und Absprachen mit Anforderungsgeber. Ebenso wird hier der Fahrzeugaufbau sowie die Inbetriebnahme koordiniert und durchgeführt.

Das Sensor-Team hingegen hatte den Fokus pro Sensorgattung die Definition zu liefern wie dieser aufzuzeichnen ist und mit welcher Software. Ein weiteres Team setzte die internen Vorgaben zur Sensordatenaufzeichnung im Fahrzeug um. Bosch betreibt eine Prototypen-Werkstatt, diese setzte den von HAF-Team geplanten Umbau am Fahrzeug um. Das SW-HAF Team hat den Fokus auf der Validierungs-Toolchain. Angefangen bei Checker-Tools, welche die qualitative Analyse der Messdaten vornehmen, über Aufbereitungen der Daten für die entsprechenden SIL- (Software-in-the-loop) und HIL- (Hardware-in-the-loop) Umgebungen, bis hin zum Durchführen der Reprozessierung der Messdaten unter Verwendung aktualisierter ECU (Radar, Kamera, Zentralsteuergerät) Software. Das HAF-Integrationsteam ist zuständig für die System-Integration.

#### **2.3.4.1 Fahrzeug-Dauerlauf-1R1V**

Aus diversen Gründen konnten Daten mit mehr Sensoren als einem Radar plus einem Videosensor (1R1V) dem Projekt nicht zur Laufzeit zur Verfügung gestellt werden. Daher wurde auf eine Flotte Fahrzeuge mit 1R1V-Sensoren zurückgegriffen.

Der Effektive Start des Dauerlaufs mit zehn Golf-Fahrzeugen Fahrzeugen konnte in Q1/2019 erfolgen. Die Dauerlaufdaten umfassten Stadt-, Überland- und Autobahnfahrten. Für PEGASUS wurden dabei nur die Autobahndaten verwendet.



*Abbildung 41: DL-Fahrzeuge auf Dauerlauffahrt in Schweden*

Zu Beginn wurden Dauerlaufdaten in Deutschland aufgenommen. Um ein breiteres Spektrum an Dauerlaufdaten zu generieren sind Teile der Fahrzeugflotte nach Europa, USA, Japan und Australien entsendet worden. Parallel zur Erfassung von Messdaten wurden der MF4-Konverter programmiert, anhand von ersten Daten getestet sowie erste Testdateien für die PEGASUS Datenbank zur Verfügung gestellt.

## 2.3.5 Auswertung der Felddaten (UAP 3.4.3)

### 2.3.5.1 Proof-of-Concept

Zunächst wurde vom Projekt ein Proof-of-Concept verlangt, d.h. ein kleiner Testdatensatz sollte früh im Projekt in die Datenbank geladen und geprüft werden. Da zu diesem Zeitpunkt die geplante Testflotte noch nicht zur Verfügung stand, wurde auf einen anderen Versuchsträger zurückgegriffen.

Bosch nutzte im PEGASUS Projekt zur Befüllung der PEGASUS-Datenbank für den „Proof-Of-Concept“ u.a. die ROS-Datenbank der Tesla Model S Level-3 Fahrzeuge, vgl. Abbildung 42. Die Teslafahrzeuge haben die Freigabe vom Regierungspräsidium Stuttgart im öffentlichen Straßenverkehr die eine Level-3-Funktion im Feld zu testen. Auf dieser Datenbasis wurde ein ROS-Konverter programmiert, getestet und vom fka Aachen überprüft und anschließend die Proof-of-Concept Daten dem Fka Aachen zur Verfügung gestellt.



Abbildung 42: Level-3 Bosch Fahrzeuge für die Funktion „Autobahnchauffeur“

### 2.3.5.2 Daten für die Testflotte

Um später im Projekt die Daten aus der Testflotte zu konvertieren, musste aufgrund des Unterschiedlichen Datenformats (ROS im Proof-of-Concept, MF4 in der Testflotte) ein neuer Konverter für das geplante PEGASUS-Format erstellt werden.

### 2.3.5.3 PEGASUS Datenkonvertierung

Auf die Vorgehensweise der Datenkonvertierung wird in den folgenden Abschnitten detailliert eingegangen.



Abbildung 43: Prozess zur Datenkonvertierung

#### 2.3.5.3.1. Toolchain und Workflow ROS-Konvertierung

Die Konvertierung der rosbag-Dateien setzt das folgende Tooling voraus.

- ROS Installation (Distribution: Kinetic)
- Bosch - ROS Stereo Video Camera (SVC) Decoder. Für Spurlinienerkennung & Referenzvideo
- Matlab Installation

Die Bagfiles einer Messung sind zusammen mit deren Parameterdateien abgelegt. Die für PEGASUS erforderlichen Signale sind in den Topics „/vehicle\_global\_pose“, „/mops/dynamic\_world“, „/driving/AdmaMeasurement“ und „/driving/svc2\_decoder/lines“ enthalten. Die Signale der SVC sind kodiert und müssen daher zuerst dekodiert werden.

Dies erfolgt mithilfe des SVC-Decoders (ROS-Node). Dazu wird das Bagfile in Echtzeit abgespielt und mit der SVC ROS-Node dekodiert. Zeitgleich wird ein weiteres Bagfile der dekodierten ROS-Topics aufgenommen. Weiterhin wird die ROS-Node zur Erzeugung des Referenzvideos gestartet. Dieser Workflow kann mit nachfolgender Befehlskette umgesetzt werden.

Das aufgenommene Bagfile enthält nun alle erforderlichen Signale zur Erzeugung des PEGASUS Datensatzes.

#### 2.3.5.3.2. Toolchain/Workflow MDF-Konvertierung für die Daten der Testflotte

Die Konvertierung der MDF-Dateien setzt das folgende Tooling voraus.

- Matlab Installation
- MDF-Exporter Installation

Das Exportieren der MDF Messungen nach Matlab erfolgt durch ein eigenes Tool. Dieses verwendet json Konfigurationsdateien, welche die zu exportierenden Signale spezifizieren.

Da die Messfahrten sowohl in urbanem Gebiet, außer Orts als auch auf Autobahnen stattfinden, ist es erforderlich die potentiellen Messfahrten zuerst zu ermitteln. Dies erfolgt durch die Sichtung der Referenz Videos der Testfahrzeuge. Die Dateinamen der Referenz Video Dateien der den Anforderungen entsprechenden Messungen werden in eine Liste eingetragen. Mithilfe dieser Liste ist es möglich die weitere Konvertierung der MDF-Dateien automatisiert abzarbeiten.

#### 2.3.5.3.3. Erzeugung PEGASUS Datensatz

Die Konvertierung der ROS-Daten erfolgt wie bei den MDF-Daten. Unterschieden wird jedoch beim Importieren der Messung in Matlab. Dies erfolgt durch die Funktion „bagReader“ welche aus einem angegebenen bagfile ein spezifiziertes ROS-Topic in ein Matlab cell Array konvertiert. Die Funktion „bagReader“ wird von „unl-nimbus-lab“ unter

<https://github.com/unl-nimbus-lab/bag2matlab>

zur Verfügung gestellt.

#### 2.3.5.3.4. Upload der Daten in die Datenbank

Alle ROS- und MF4-Daten wurden vor der Konvertierung aufwändig manuell gesichtet und für die Konvertierung vorbereitet, da die Datenbasis nicht ausschließlich Daten aus Autobahnfahrtsituationen beinhaltet haben. Zudem wurde nach Sequenzen mit Ein- und Ausschervorgängen manuell gesucht. Die verfügbaren HAF und 1R1V-Daten von BOSCH wurden dann in zu Beginn manuell, später automatisiert konvertiert. Die Daten wurden jeweils initial vom fka-Achen erfolgreich getestet. Bis zum Projektende konnten jedoch nicht alle Daten hochgeladen werden (Stand finaler Upload: 16.500 km), da die MF4-Daten aus dem Dauerlauf auch noch parallel zur Konvertierung und Datensichtung eingefahren wurden. Über das PEGASUS-Projekt hinaus hat Bosch die im Projekt zugesagten Daten weiter gesichtet und konvertiert (23.500 km).

### 2.3.6 Erarbeitung von Sensor-Modellkonzepten (UAP 3.2.1)

Im Projekt PEGASUS hat Bosch im Unterarbeitspaket 3.2.1 und Unterarbeitspaket 3.2.2 aktiv mitgearbeitet. Im Unterarbeitspaket 3.2.1 wurde erstmal erarbeitet, dass eine generische Implementierung des Radar-, Video- und LiDAR- Sensormodells im Rahmen von PEGASUS erreicht werden soll. Zusätzlich wurden in diesem Unterarbeitspaket 3.2.1 die Anforderungen an die Sensormodelle erarbeitet und definiert.

Für die Anwendung in PEGASUS wurden von den Konsortialpartnern mit wesentlichen Beiträgen von Bosch zwei Sensor-Modellkonzepte erarbeitet: Phänomenologische und physikalische Sensor-Modelle.

**Phänomenologische Modelle** bilden das System nicht auf System- sondern auf Phänomenebene ab. Auf die Sensormodelle bezogen heißt das, dass nicht die Signalausbreitung, -detektion und –Verarbeitung sondern nur die beobachtbaren Phänomene modelliert werden. Die Eingangsgrößen sind hierbei die Objekte und sensorrelevanten Eigenschaften, die Ausgangsgrößen Objekte, wie sie vom Sensor (und nachgelagerter Verarbeitung) erfasst werden samt den zugehörigen Sensorausgaben.

**Physikalische Modelle** hingegen erfassen nicht Objekte in ihrer Gesamtheit, sondern modellieren die Wechselwirkung des (elektromagnetischen Signals) mit seiner Umgebung bis hinunter zur Auflösungsgrenze der Sensorik (Signalausbreitungsmodell). Im weiteren Verlauf wird auf Sensorkomponentenebene die Signaldetektion und –Verarbeitung modelliert (Sensormodell). Physikalische Modelle erfordern Kenntnis über die exakte Geometrie und der sensorrelevanten Materialeigenschaften.

Jedes dieser Modelle hat anwendungsbezogen seine Berechtigung. Während phänomenologische Modell in der Lage sind, die wichtigsten Sensoreffekte abzubilden, und gleichzeitig performant sind, haben physikalische Modelle das Potenzial, ohne apriorisches Wissen über die Phänomene die Sensorausgaben zum Preis längerer Rechenzeit hochgenau zu modellieren. Um eine große Anzahl an Szenarien in absehbarer Zeit zu simulieren, wird man daher eher auf phänomenologische Modelle zurückgreifen, während man für die Simulation einer begrenzten Anzahl von Corner Cases und zur sicherheitsrelevanten Freigabe von Fahrfunktionen eher physikalische Modelle verwenden wird.

In PEGASUS wurden anfangs beschlossen, beide Ansätze parallel zu verfolgen. Für das Kamera- und Radarmodell hat sich aber gezeigt, dass einerseits die notwendigen Eingangsdaten, also 3D-Geometrie und Materialparameter, nicht im ausreichenden Maß zur Verfügung standen, und andererseits die Schnittstellenanforderungen der Simulationsumgebungen zu spezifisch waren, um in der PEGASUS Toolchain erfüllt werden zu können.

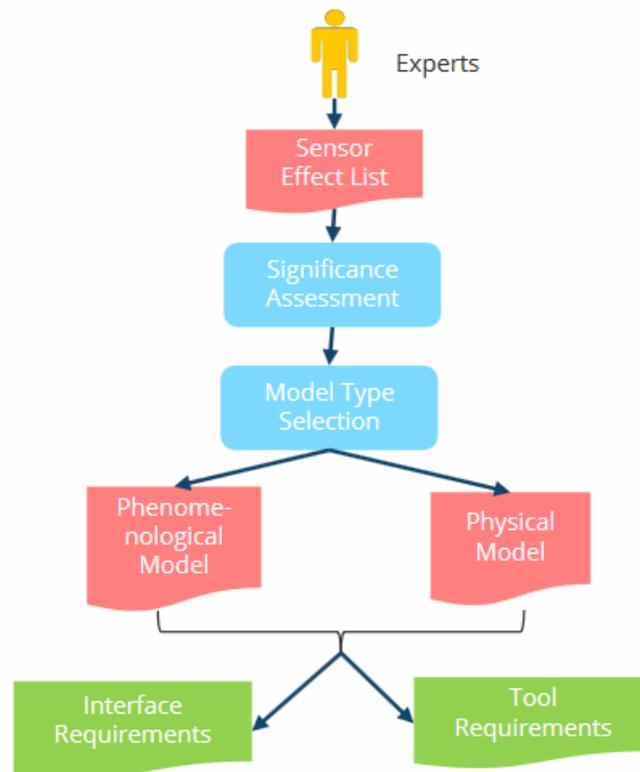


Abbildung 44: Vorgehen zur Ableitung des Modelltyps und der Modellanforderungen

### 2.3.7 OSI Sensormodell Schnittstelle (UAP 3.2.1)

Ein nicht zu unterschätzendes Hindernis beim Austausch von Sensormodellen ist die Schnittstellenproblematik. Bezogen auf den Kamera- und Radarsensor sind dies eingangsseitig die Schnittstelle zwischen der Umwelt- und Sensorsimulation und ausgangsseitig die Schnittstelle zwischen Sensorsimulation und Fahrfunktion. Aufgrund dieser Problematik, an der häufig der Austausch von Sensormodellen scheitert, wurde in PEGASUS auf Basis eines Inputs von BMW gemeinsam eine solche Schnittstelle definiert, die in der PEGASUS Toolchain zum Einsatz kommen soll.

Der Schnittstellenaspekt ist im Sinne der Schaffung eines Standards außerwettbewerblich und wurde mit Beendigung von PEGASUS der ASAM übergeben (ASAM OSI, 2020). Die Schnittstelle soll eine offene sein, was auch in der Namensgebung für die Schnittstelle Eingang findet: **O**pen **S**imulation **I**nterface (OSI) (OpenSimulationInterface, 2020). Unter den Konsortialpartnern finden sich Vertreter sowohl der Umwelt- und Sensorsimulation als auch der Fahrfunktion. Damit waren alle Kompetenzen für die Definition dieser Schnittstelle vorhanden.

Anspruch dieser Schnittstelle ist es, eine hierarchische Datenstruktur zu definieren, die sowohl sämtliche Sensor- wie auch Fahrfunktion-relevanten Parameter enthält. Durch die offene Architektur ist auch jederzeit eine Anpassung und Ergänzung der hierarchischen Datenstruktur möglich. Vonseiten Bosch besteht der Beitrag zu OSI in der Definition der Kamera- und Radarsensor-relevanten Parameter.

#### 2.3.7.1 Schnittstellenkonzept

In mehreren gemeinsamen Workshops wurde folgendes Schnittstellenkonzept für das Open Simulation Interface erarbeitet:

1. Als Basisschnittstelle soll das bereits etablierte Functional Mock-up Interface (**FMI**) (FMI, 2020) genutzt werden.
2. Die Datenfelder werden durch Google Protocol Buffers (**ProtoBuf**) definiert (Protobuf, 2020), die diese sowohl schnelle Kommunikation erlauben als auch sehr speicher-sparmsam sind. Außerdem erlauben Protobufs die Verwendung einer hierarchischen Datenstruktur.
3. Das Model-Packaging soll durch Functional Mock-up Units (**FMUs**) geschehen, da diese bereits weitverbreitet sind und von zahlreichen Tools bereits unterstützt werden.

Eine FMU ist eine komprimierte Datei (ZIP-Datei), die in der Mindestausstattung ein Modell in Form einer Programmbibliothek (DLL- oder SO-Datei) sowie eine Modellbeschreibung (modeldescription.xml) enthält. Sie kann zusätzlich noch Quellcode, Dokumentation, weitere Kompilate für verschiedene Betriebssysteme und andere Informationen enthalten.

### 2.3.7.2 Sensormodellbezogene Datenfelder

Die Eingangsdaten für die Sensormodelle enthält in der Version OSI 3.1 die Datenstruktur `osi3::SensorView`. Diese bedient sowohl Radar-, Kamera-, LiDAR-, Ultraschall- als auch generische Sensoren.

Für Kamera und Radar sind in Bezug auf die Sensorkonfiguration die Unterstrukturen `osi3::CameraSensorView` und `osi3::RadarSensorView` relevant (siehe Abbildung 45).

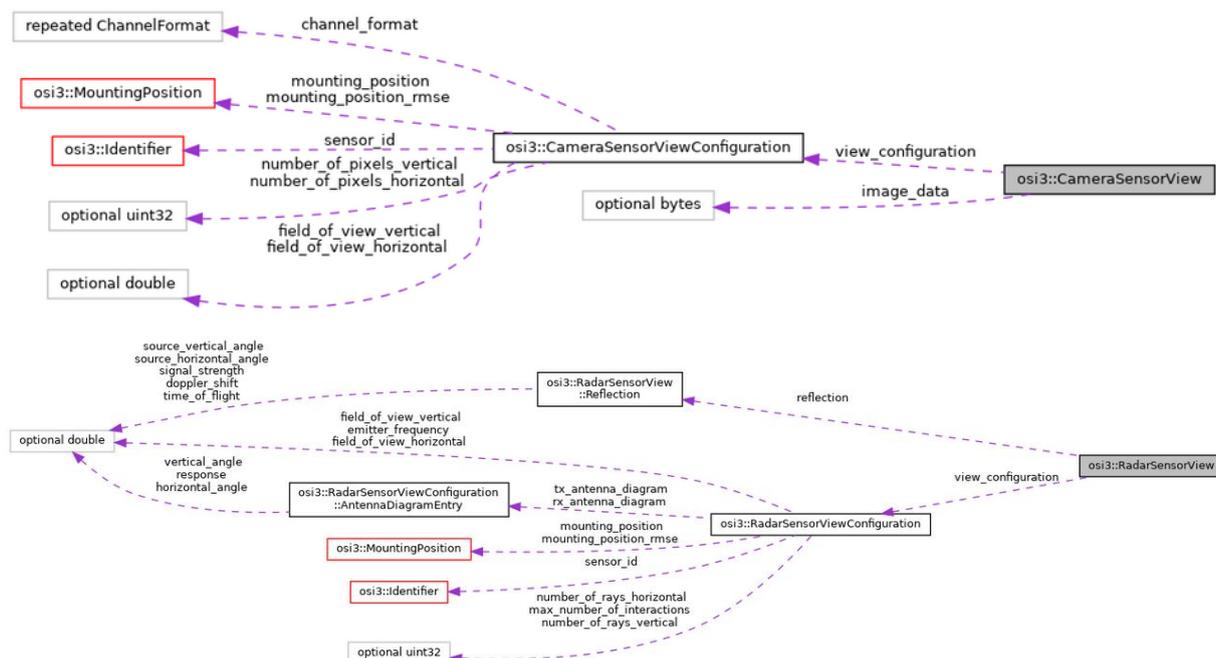


Abbildung 45: Unterstrukturen `osi3::CameraSensorView` und `osi3::RadarSensorView` der Struktur `osi3::SensorView` (OSI Documentation, 2020)

Besonders wichtig für den PEGASUS-Anwendungsfall sind die Parameter für die Verbauposition und Sensorausrichtung sowie der horizontale und vertikale Sichtbereich (Field of View, FoV). Ebenfalls enthalten in der Struktur sind Parameter, die für die Konfiguration eines physikalischen Modells und die Weiterverarbeitung der Daten wichtig sind. Für die Kamera wären dies etwa die horizontale und vertikale Pixelauflösung sowie die Bilddaten und für den Radar Raytracingparameter (z.B. horizontale und vertikale Strahldichte) und Strahlinformationen

(Signalstärke, Dopplerverschiebung, Laufzeit, etc.). Es sei an dieser Stelle schon gesagt, dass in PEGASUS jedoch der Fokus auf den phänomenologischen Modellen liegt. Gerade die Definition der Sensorkonfigurationsparameter erfolgte im engen Austausch zwischen den Sensormodellierern und dem OSI Team.

Die eigentlichen Sensoreingangsdaten finden sich in der weiteren Unterstruktur `osi3::GroundTruth`, die alle sensorrelevanten Eigenschaften detektierbarer Objekte im Szenario enthält (siehe Abbildung 46). Die phänomenologischen Sensormodelle nehmen diese idealen Objekte auf, verarbeiten sie sensorspezifisch und geben die vom jeweiligen Sensor detektierten Objekte wieder aus. Diese Objekte besitzen dann nur noch jene Eigenschaften, die vom Sensor ableitbar sind und besitzen auch sensortypische Unsicherheiten. Die Ausgabe der detektierten Objekte erfolgt über die Strukturen `osi3::DetectedMovingObject` und `osi3::DetectedStationaryObject`. In PEGASUS lag der Fokus auf den bewegten Objekten, weshalb auch nur die von den Sensormodellen verarbeitet werden. Einen Überblick über die Datenstruktur von `osi3::DetectedMovingObject` gibt Abbildung 47.

Zuletzt sei noch die Struktur `osi3::FeatureData` genannt, die die Ausgabe von Objektdaten aus physikalischen Modellen erlaubt (siehe Abbildung 48). Für Kameramodelle wären dies Bilddaten auf Pixelebene und für Radarmodelle eine Liste von Detections (bzw. Locations) für jedes detektierte Objekt. Durch die Konzentration auf phänomenologische Modelle in PEGASUS wird durch die vorliegenden Sensormodelle diese Struktur nicht befüllt.

Die Definitionen der hier beschriebenen Kamera- und Radarsensor-relevanten Parameter basieren auf den Inputs der Bosch-Sensormodellierer.

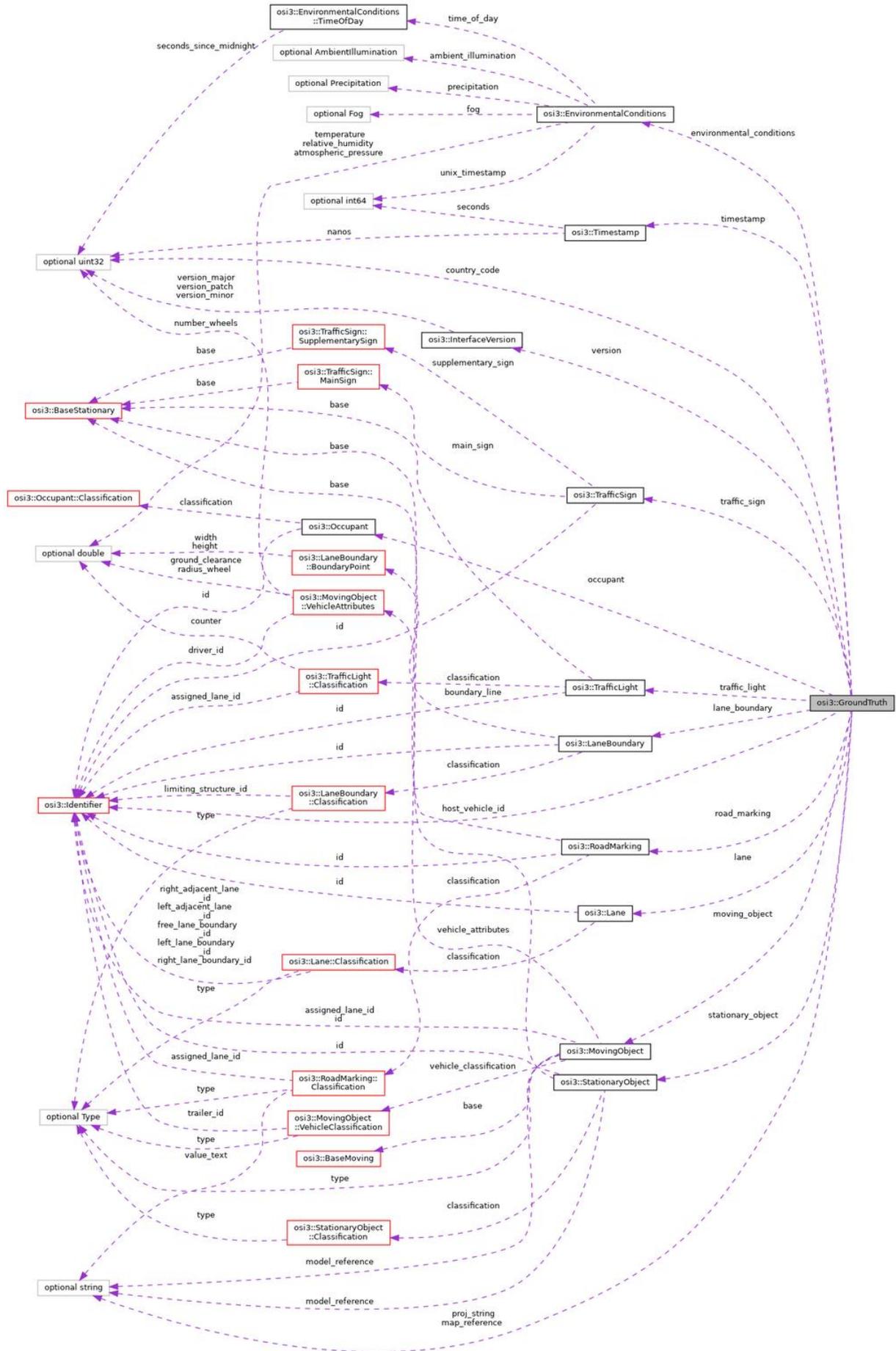


Abbildung 46 Unterstruktur `osi3::GroundTruth` der Struktur `osi3::SensorView` (OSI Documentation, 2020)

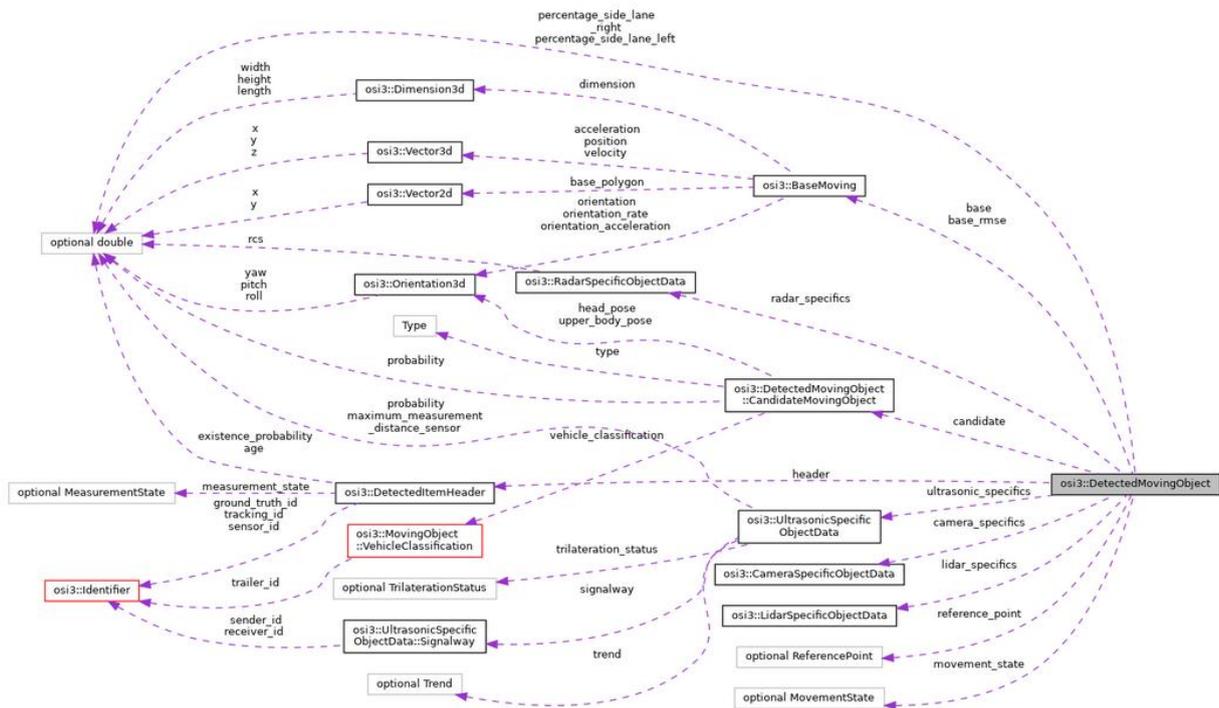


Abbildung 47: Datenstruktur der Sensorausgabe `osi3::DetectedMovingObject` für phänomenologische Modelle (OSI Documentation, 2020)

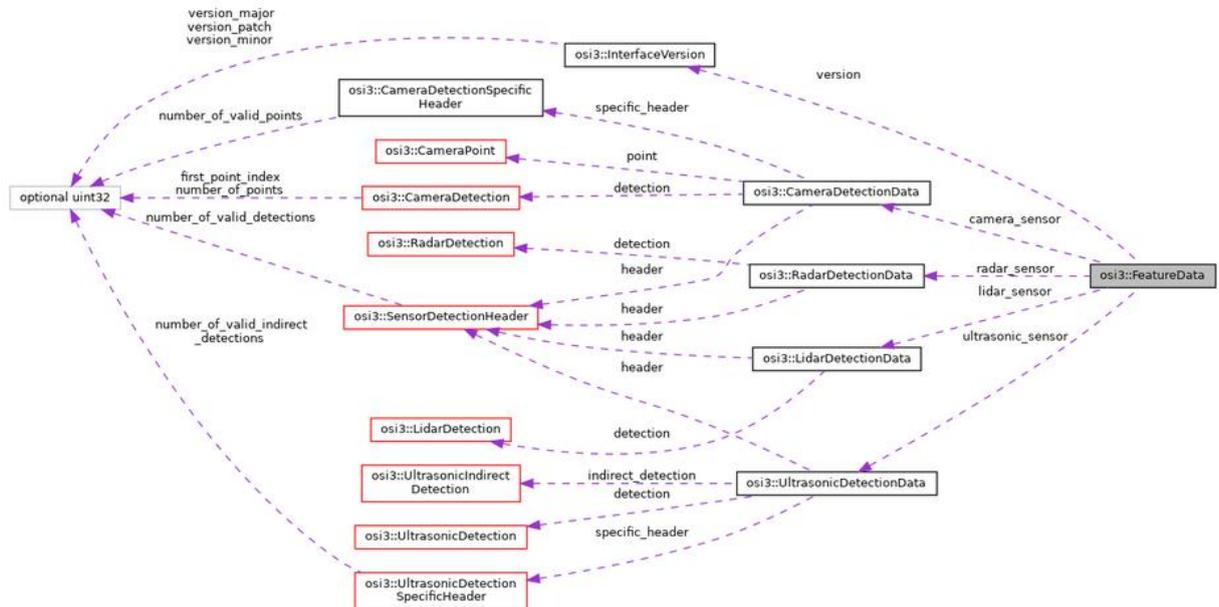


Abbildung 48: Datenstruktur der Sensorausgabe `osi3::DetectedMovingObject` für physikalische Modelle (OSI Documentation, 2020)

### 2.3.7.3 Sensormodellrelevante Änderungen in OSI 3

Ein Ziel von PEGASUS besteht in der Schaffung einer zukunftsorientierten, offenen Schnittstelle für Sensormodelle. Daher wurde OSI über den Einsatzzweck von PEGASUS hinaus

konzipiert, um eine langfristige Einsatzfähigkeit zu gewährleisten. Durch die Verwendung von OSI im Verlauf von PEGASUS für die gesamte Toolchain von Umgebungssimulation bis Fahrfunktion ergab sich die Gelegenheit, die Schnittstellendefinition iterativ den praktischen Bedürfnissen, die im Einsatz entstanden, anzupassen.

In Version 2 hat OSI bereits einen Reifegrad erreicht, mit dem bereits die Einsatzfähigkeit von OSI zum Halbzeitevent demonstriert werden konnte. In der Folgeversion OSI 3 kamen noch weitere Änderungen hinzu, die OSI zukunftstauglich machen sollen. Durch die Inputs der Sensormodellierer (Mitarbeiter der Partner Bosch, FZD, Conti) konnte insbesondere die Rohdatenschnittstelle, wie sie für physikalische Sensormodelle benötigt wird, hinzugefügt werden. Beispiele für Datenfelder für die physikalischen Sensormodelle, wie sie in OSI 3.1 enthalten sind, wurden im vorigen Abschnitt gegeben.

Es ist noch anzumerken, dass die Rohdatenschnittstelle aufgrund der Komplexität und Spezifität der Daten, eine besondere Herausforderung darstellt, die im Rahmen von PEGASUS nicht vollständig bewältigt werden konnte. Damit die Rohdatenschnittstelle zur Anwendung gelangt, sind sicher noch weitere Iterationen vonnöten. Durch den Transfer von OSI zur ASAM hat PEGASUS dafür eine solide Grundlage geschaffen.

### 2.3.8 Sensormodell Radar (UAP 3.2.2)

Im Unterarbeitspaket 3.2.2 trug Bosch das im folgenden beschriebene Radar-Sensormodell bei.

Die nächsten Abschnitte beschreiben die Sammlung der für den PEGASUS-Usecase relevanten Radareffekte, daraus folgend die Ableitung der Modellanforderungen und schließlich das phänomenologische und physikalische Radar-Sensormodell.

#### 2.3.8.1 Radareffekte

Zusammen mit dem Konsortialpartner FZD für das Sensormodell relevante Radareffekte identifiziert. Die Effekte sind in Tabelle 30 gelistet und wurden mit den aus den Referenzszenarien resultierenden Anforderungen abgeglichen und entsprechend priorisiert im Sensormodell implementiert.

Die Tabelle umfasst sowohl phänomenologische als auch physikalische Effekte. Effekte, die im phänomenologischen Modell nicht oder nur unzureichend abbildbar sind, wurden entsprechend nicht implementiert.

Ursache	Bemerkungen	Wirkungen	Parameter	Inputs
<b>Field of View (FoV)</b>	Antennendiagramm	Randobjekte nicht (gut) erfasst	Antennendiagramm	Belegungsfunktion
<b>Rauschen</b>	Thermisches Rauschen (Grundrauschen), Amplituden-/Phasenrauschen	Schlechteres SNR, FN	Verteilungsfunktion, Boltzmannkonstante	Temperatur
<b>Verdeckung</b>	Objekt verdeckt anderes Objekt	Objektverlust (nicht und nicht)	Trajektorie anderer Objekte	Geometrie/Pose der Objekte und Umgebung

Ursache	Bemerkungen	Wirkungen	Parameter	Inputs
		mehr wieder auffindbar)		
<b>Mehrfach-reflexionen</b>	Bodenreflexionen	verdeckte Objekte werden unter Fahrzeug sichtbar	Reflexionskoeffizient Boden	aus Datenbank (des Tools) Wetterbedingungen
<b>Mehrfach-reflexionen</b>	Bodenreflexionen	Interferenz -> schlechteres SNR		
<b>Dreifachreflexion</b>	Dreifach: Obj-Ego-Obj	Scheinbar doppelte Distanz		
<b>Reflexion an reflektierender Fläche</b>	Leitplanke, LKW-Wand, Schiene, Tunnel, Boden, etc.	Scheinobjekt	Reflexionskoeffizient von Umgebungsobjekten	aus Datenbank (des Tools)
<b>Auflösung Elevation</b>	beeinflusst durch Amplitudenunterschiede der verschiedenen Antennen und durch Interferenzeffekte	Fehleinschätzung der Unter- und Überfahrbarkeit	Größe der Winkelzellen/Auflösungszellen	Öffnungswinkel, Anzahl, Position/Ausrichtung der Strahler (Antennen); Straßenbelag
<b>Auflösung Azimut</b>	Verschiedene Methoden möglich (Monopuls, Scanning, etc.)	Zwei (ferne) Objekte erscheinen als eines, weil in Azimut nicht trennbar	analog zu Verdeckung	analog zu Verdeckung
<b>Auflösung Distanz</b>	Trennfähigkeit beeinflusst durch Bandbreite, Modulation, Amplitudenrauschen	Objektverschmelzung Messunsicherheit in Distanz Objekt jenseits der Maximaldistanz erscheint näher (Mehrdeutigkeit)	analog zu Verdeckung	analog zu Verdeckung
<b>Auflösung Relativegeschwindigkeit</b>	Trennfähigkeit beeinflusst durch Modulation, Rauschen der Dopplerverschiebung	Messunsicherheit der Geschwindigkeit Unterscheidung Stand- und Bewegt Ziel	analog zu Verdeckung	analog zu Verdeckung
<b>Signalbeeinträchtigung/dämpfung durch Wetter, Verschmutzung</b>	verursacht Dämpfung und Clutter	Schlechteres SNR -> Verschlechterung der Messgrößen (bis FN) FP (Gischt, Schneeschleppe)	Dämpfungsmodell	Wetter (in Abstufungen)

Ursache	Bemerkungen	Wirkungen	Parameter	Inputs
<b>Fahrzeugbewegung während der Aufnahme</b> (bspw. Stauung des Signals, Rolling-Shutter [bei Kameras], Scan-Effekte [bei LiDAR])	Änderung FoV durch Bremsen/Beschleunigen (Nicken)?	erhöhter Clutter Zielverlust beeinträchtigte Elevationsbestimmung	Fahrdynamikmodell (von Tool/OEM)	Pose des Sensors
<b>Latenz / Latenzschwankungen</b>	Zykluszeit länger durch hohe Temperatur (Prozessorlast, Umgebung)	Objekte werden nicht rechtzeitig erkannt Fall 1: in Folge oben genannter Effekt - keine frühere Detektion möglich; Fall 2: kein Update erfolgt (z.B. hohe Sensortemperatur/Prozessorlast)	nicht relevant	
<b>Transmissionseigenschaften von durchdrungenem Material</b> (z.B. bei Verbau hinter Stoßfänger)	Metalliclack, Verschmutzung, Schnee/Eis	Schlechteres SNR/Reichweite, FN	Transmissionseigenschaften (inkl. Beugung/Brechung/Streuung) aus Datenbank in Hinblick auf Änderung der Antennencharakteristik	Sensorposition in Bezug auf Stoßfänger o.ä.
<b>Clutter</b>	Unerwünschte Echos rauer Flächen. Bsp. raue Straßenoberfläche.	SNR erhöht -> FN Peaks über Schwelle -> FP	Streumodell der Objekte/Straße	Objektposition und -pose
<b>starker überfahrbarer Streuer</b>	Gullideckel, Coladose, niedrige Metallschwelle	FP	RCS-Charakteristik	Objektposition und -pose
<b>Reflexion von Stoßfänger</b>	Winkel > 18° von Vertikale notwendig	Übersteuerter ADC	Reflexionscharakteristik Stoßfänger	Sensorposition in Bezug auf Stoßfänger .ä.
<b>Störungen im gleichen Frequenzband</b>	andere Radare, Jammer, ...	Übersteuerung (FN), bewegte Scheinziele (FP)	abgedeckt durch MOSARIM	
<b>Wechselnde Reflexionszentren auf Objekten</b>		Von Messung zu Messung springt		

Ursache	Bemerkungen	Wirkungen	Parameter	Inputs
		der Reflexionspunkt auf dem Objekt (Fahrzeugen).		

Tabelle 30: Gesammelte Radareffekte

### 2.3.8.2 Modellanforderungen

In Abstimmung mit den Konsortialpartnern wurden mit wesentlichen Beiträgen von Bosch die Anforderungen an das Radar-Sensormodell gesammelt und priorisiert.

ID	Anforderungen an die Schnittstelle	Prio
D2		
D2.1	Umgebungsobjekte (statisch und dynamisch; Klassifikatoren)	muss
D2.2	Wetter (Regen (leicht mittel stark), Schnee (leicht mittel stark), Nebel (Sichtweite [m] (Mensch))	muss
D2.3	Sensorintegration, Verbauposition	muss
D2.4	Sensorspezifikation (z.B. Modulationsart, )	muss
D2.5	Reflektionscharakteristik der Umgebungsobjekte (Objektklasse; z.B. PKW, Leitplanke, Verkehrsschild, Straßen, Tunnel, Brücken, ...)	muss
D2.6	Ego-Vehikel-Daten (z.B. Position, Rotation, Geschwindigkeit, Beschleunigung)	muss
D2.7	Fahrbahntopologie (z.B. Abzweigungen, Steigung, Gefälle, Krümmung, Anzahl Fahrstreifen..)	muss
D2.8	Fahrbahnaufbauten (Tunnel, Brücken)	muss
D2.9	Dynamischer Ein-/Ausschalter (Trigger) (z.B. Simulation Sensorausfall) (über sog. User-Events)	muss
D2.10	Dynamische und statische Objekte (Position, globale Bewegungsdaten, Typklassifikation: Fußgänger/LKW/PKW), (Konfidenz abh. on "Rückstreuquerschnitt" in einer späteren Phase)	muss
D.2.10.1	Alle statischen und dynamischen Objekte der Szene erzeugen gemäß Parameter "Rückstreuquerschnitt" eine Anzahl von Radarreflexen mit Position und lateraler Geschwindigkeit	kann
D2.12	Umgebung als Standard 3D-Datenbasis (als Parameter)	muss
D2.13	Dynamisches Aufschalten von Effekten	muss
D2.14	Verbauposition und geometrische Eigenschaften (FoV),	muss
D2.15	Physikalische Eigenschaften des Sensors (Trennfähigkeit im FoV, Reflektionswahrscheinlichkeiten im FoV, etc.)	muss
D2.16	Ermöglichen der Einspeisung von Effekten in Verarbeitungskette	muss

Tabelle 31) und die Umgebungssimulation (siehe Tabelle 32).

Die Sammlung der Anforderungen erstreckte sich aufgrund der Komplexität und einigen Abstimmungsbedarfs auf das gesamte erste Projektjahr. Dennoch war im Anschluss die Machbarkeit und die konkrete Anwendung im weiteren Projektverlauf noch nicht vollständig klar. In der Umsetzung wurde daher auf die geänderten Anforderungen und die Möglichkeiten, die die Tools und Schnittstellen anbieten, Rücksicht genommen, weshalb das finale Sensormodell in diesen Punkten von den ursprünglichen Anforderungen abweicht.

ID	Anforderungen an das Sensormodell	Prio
D1		
D1.1	Das Radarsensorikmodell soll das statistisch Verhalten eines Sensors auf der Objektdatenschnittstelle abbilden.	muss
D1.2	Die für die statistische Modellierung notwendigen Sensorikphänomene TP (true positive), FN (false negative), TN (true negative), FP (false positive) sowie fehlerhafte und verrauschte Messgrößen sind nachzubilden.	muss
D1.3	Das Sensormodell muss zum Zwecke des Austauschs zwischen Plattformen/Simulationsumgebungen eine standardisierte Schnittstelle nutzen (z.B. FMI) (inhaltlich und technologisch);	muss
D1.5	Einfluss weiterer Radar-Sensoren z.B. Gegenfahrzeug, weitere 'eigene' Sensoren	kann
D1.6	Das Radar-Sensormodell (physikalisches Modell) muss eine Modulationsart berücksichtigen können	muss
D1.8	Das Simulationsmodell berücksichtigt Verbauposition inkl. Ausrichtung (Parametersatz)	muss
D1.9	min. Echtzeit wg. möglicher Anbindung an HIL	muss
D4.1	Ray Tracing Framework für physikalischen Ansatz seitens Simulationstool verfügbar	muss
D4.2	RCS-Reflektivitätsmodell für Objekte hinterlegt oder hinterlegbar	muss
D4.3	Radarrelevante Materialparameter( Permittivität, Rauheitswert) für Objekte hinterlegt oder hinterlegbar	muss

ID	Anforderungen an die Schnittstelle	Prio
D2		
D2.1	Umgebungsobjekte (statisch und dynamisch; Klassifikatoren)	muss
D2.2	Wetter (Regen (leicht mittel stark), Schnee (leicht mittel stark), Nebel (Sichtweite [m] (Mensch))	muss
D2.3	Sensorintegration, Verbauposition	muss
D2.4	Sensorspezifikation (z.B. Modulationsart, )	muss
D2.5	Reflektionscharakteristik der Umgebungsobjekte (Objektklasse; z.B. PKW, Leitplanke, Verkehrsschild, Straßen, Tunnel, Brücken, ...)	muss

ID	Anforderungen an die Schnittstelle	Prio
D2.6	Ego-Vehikel-Daten (z.B. Position, Rotation, Geschwindigkeit, Beschleunigung)	muss
D2.7	Fahrbahntopologie (z.B. Abzweigungen, Steigung, Gefälle, Krümmung, Anzahl Fahrstreifen..)	muss
D2.8	Fahrbahnaufbauten (Tunnel, Brücken)	muss
D2.9	Dynamischer Ein-/Ausschalter (Trigger) (z.B. Simulation Sensorausfall) (über sog. User-Events)	muss
D2.10	Dynamische und statische Objekte (Position, globale Bewegungsdaten, Typklassifikation: Fußgänger/LKW/PKW), (Konfidenz abh. on "Rückstreuquerschnitt" in einer späteren Phase)	muss
D.2.10.1	Alle statischen und dynamischen Objekte der Szene erzeugen gemäß Parameter "Rückstreuquerschnitt" eine Anzahl von Radarreflexen mit Position und lateraler Geschwindigkeit	kann
D2.12	Umgebung als Standard 3D-Datenbasis (als Parameter)	muss
D2.13	Dynamisches Umschalten von Effekten	muss
D2.14	Verbauposition und geometrische Eigenschaften (FoV),	muss
D2.15	Physikalische Eigenschaften des Sensors (Trennfähigkeit im FoV, Reflektionswahrscheinlichkeiten im FoV, etc.)	muss
D2.16	Ermöglichen der Einspeisung von Effekten in Verarbeitungskette	muss

Tabelle 31 Gesammelte Anforderungen an die Schnittstelle zum und vom Sensormodell

ID	Anforderungen an das Simulationsmodell	Prio
D4		
D4.1	Ray Tracing Framework für physikalischen Ansatz seitens Simulationstool verfügbar	muss
D4.2	RCS-Reflektivitätsmodell für Objekte hinterlegt oder hinterlegbar	muss
D4.3	Radarrelevante Materialparameter(Permittivität, Rauheitswert) für Objekte hinterlegt oder hinterlegbar	muss
D4.4	Reflexliste (d, v, Winkel, Amplitude)	muss
D4.5	Außentemperatur	muss
D4.6	Straßenzustand (trocken, nass (Wasserfilmdicke)	kann

Tabelle 32 Gesammelte Anforderungen an das Simulationsmodell bzgl. Kanalsimulation

### 2.3.8.3 Phänomenologisches Sensormodell

Unter Berücksichtigung gesammelter Radareffekte (siehe 2.3.8.1) wurde von Bosch ein phänomenologisches Radar-Sensormodell entwickelt. Eine erste Version des Sensormodells

wurde zeitnahe nach dem Vorliegen des von BMW und ADC bereitgestellten Dummy-Sensormodells im ersten Projektdrittel unter Verwendung der OSI 2 Schnittstelle erstellt und zum PEGASUS Halbzeitevent präsentiert. Das Modell wurde dann iterativ verbessert und schlussendlich in der finalen Version mit OSI 3 Schnittstelle beim PEGASUS Halbzeitevent eingesetzt.

Das Sensormodell nutzt ein- und ausgangsseitig OSI als Schnittstelle und ist als Functional Mock-up Unit (FMU) in die Toolchain einbindbar. Dabei liest wie in Abbildung 49 dargestellt das Sensormodell die Ground Truth Information über OSI aus der Umgebungssimulation aus und übergibt die radarspezifisch modifizierten Objekte der Fahrfunktion.

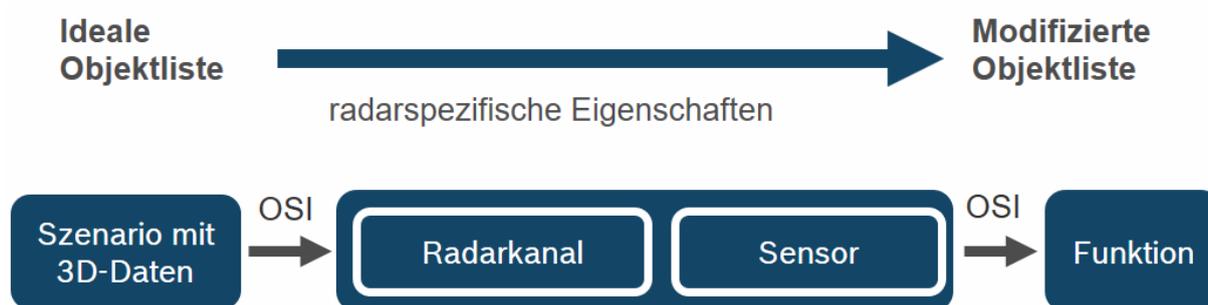


Abbildung 49: Konzept und Aufbau der phänomenologischen Radarsimulation

Das Radar-Sensormodell deckt u.a. folgende Merkmale ab:

- Berücksichtigung des FoVs
- Verdeckung durch andere Fahrzeuge
- abstandabhängige Detektionswahrscheinlichkeit (Radargleichung)
- Auflösungsvermögen (Rauschen) von Abstand, Geschwindigkeit und Azimut.
- Sensorrauschen
- Trennfähigkeit nahe beieinanderliegender Objekt
- Sichtbarkeit verdeckter Objekte durch Reflexionen

Unter Berücksichtigung all dieser Effekt wird für jedes Objekt ein Signal-Rauschverhältnis (SNR) abgeschätzt und daraus abgeleitet, ob das Objekt detektiert werden kann und wie in diesem Fall dessen Existenzwahrscheinlichkeit ist. Detektierbare Objekte, deren Winkel-, Distanz- und Geschwindigkeitsabstand geringer als die Trennfähigkeit des Radarsensors ist, können vom Sensor nicht mehr getrennt voneinander wahrgenommen werden und verschmelzen zu einem Objekt. Für die detektierten Objekte wird in Bezug auf deren Position und Geschwindigkeit nicht der ideale Wert (Ground Truth) sondern ein verrauschter Wert ausgegeben, der sich aus der Auflösung des Radarsensors ableitet.

Zur Demonstration der Funktionstüchtigkeit des phänomenologischen Radar-Sensormodells wurde dieses testhalber an IPG CarMaker angekoppelt. Die Sensorausgänge wurden mangels verarbeitender Fahrfunktion in CarMaker visualisiert. Dies erfolgte durch eine Einrahmung detektierter Objekte und begleitender Einblendung einer Textbox mit den wichtigsten

Sensorausgaben. Als Anwendungsfall dienen die PEGASUS Testszenarien. Ein Beispiel ist in adf zu sehen.

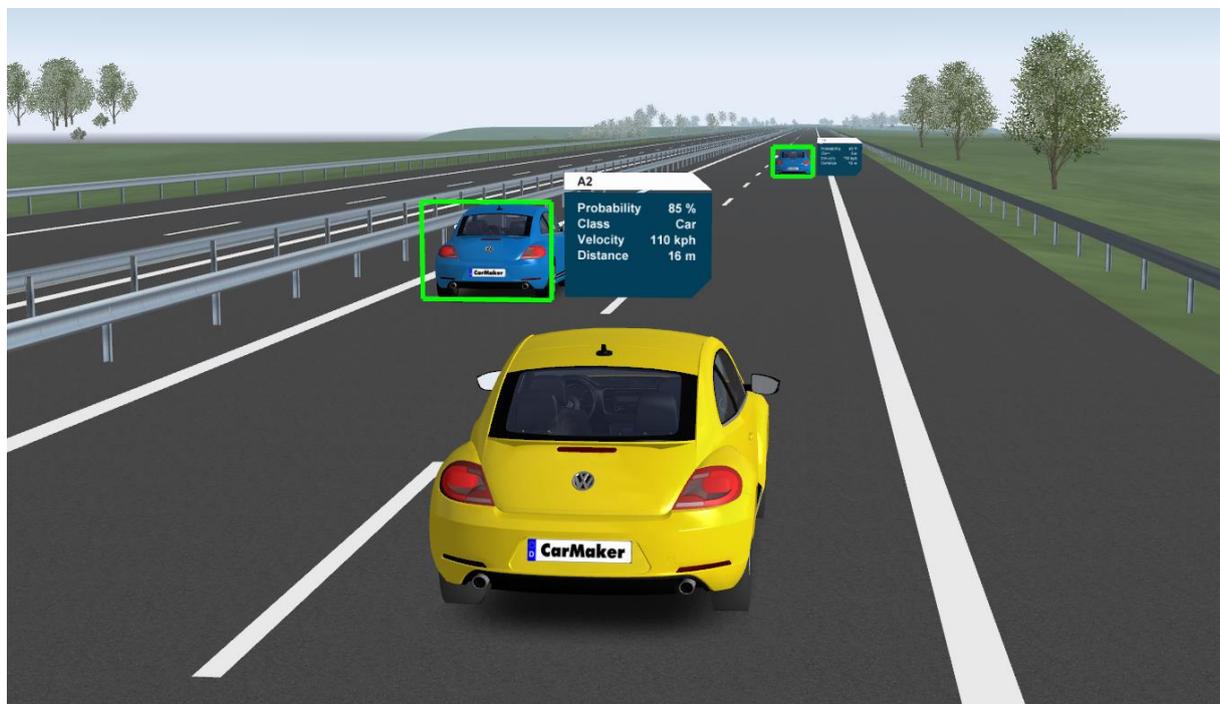


Abbildung 50: Einschererszenario in IPG CarMaker mit visualisierten Sensorausgaben (grüner Rahmen bzw. Sensorwerten in Textboxen)

Basis für das Radar-Sensormodell war das OSMPDummySensor Modell, das auf der Gitlab-Seite von OSI publiziert ist (OSMP, 2020). Von diesem wurde die OSI-Kommunikationsstruktur übernommen und das Dummy-Sensormodell durch das Radar-Sensormodell ersetzt.

Das Radar-Sensormodell wurde den Konsortialpartnern auf bilateraler Ebene zur Verfügung gestellt. Zur PEGASUS Laufzeit konnte jedoch die Toolchain mit eingebundenen Sensormodellen nicht vollständig demonstriert werden. Auf die Gründe wird im folgenden Kapitel näher eingegangen. Aus diesem Grund wurde beim Halbzeit- und Abschlussevent das Sensormodell in dieser Form präsentiert.

#### 2.3.8.4 Physikalisches Sensormodell

Im physikalischen Sensormodell wird der Sensor nicht anhand der beobachtbaren Phänomene, sondern mithilfe physikalischer Effekte modelliert.

In einem ersten Schritt wird dazu die elektromagnetische Wellenausbreitung zwischen Sendee- und Empfangsantenne(n) modelliert – dies bezeichnet man als **Kanalmodell**. Die exakteste Beschreibung für die elektromagnetische Wellenausbreitung liefern dafür die Maxwellgleichungen. Da eine Beschreibung auf dieser Ebene jedoch eine hypergenaue Parametrierung der Umwelt erfordert und in der Berechnung extrem zeitaufwändig ist, wird die Wellenausbreitung zumeist durch die Verfolgung von Strahlen (Raycasting, -launching, -tracing) modelliert.

Der erste Ansatz mit Maxwellgleichungen wird im Allgemeinen nur bei räumlich sehr beschränkten Problemen angewandt und eignet sich daher mit derzeit verfügbarer Rechenleistung nicht für ausgedehnte Verkehrsszenarien, wie sie in PEGASUS von Bedeutung sind.

Die vom Kanalmodell erhaltene analoge Impulsantwort der Sendeantenne wird dann im **Sensormodell** weiterverarbeitet. Dazu wird die Sensorhardware von der Empfangsantenne bis hin zum Analog-Digital-Converter (ADC) modelliert. Dieses digitale Signal wird in weiterer Folge von der – im besten Fall originalen – digitalen Signalverarbeitung (DSV) verarbeitet. An dieser Stelle liegen dann die vom Sensor detektierten Radarreflexe vor.

Im realen Steuergerät werden diese Reflexe geclustert, Objekten zugeordnet und gegebenenfalls klassifiziert. Im PEGASUS-Kontext ist die Schnittstelle jedoch bei den Radarreflexen, die über das OSI-Feld `osi3::RadarDetections` ausgegeben werden. Eine Übersicht über diese Signalkette ist in Abbildung 51 dargestellt.

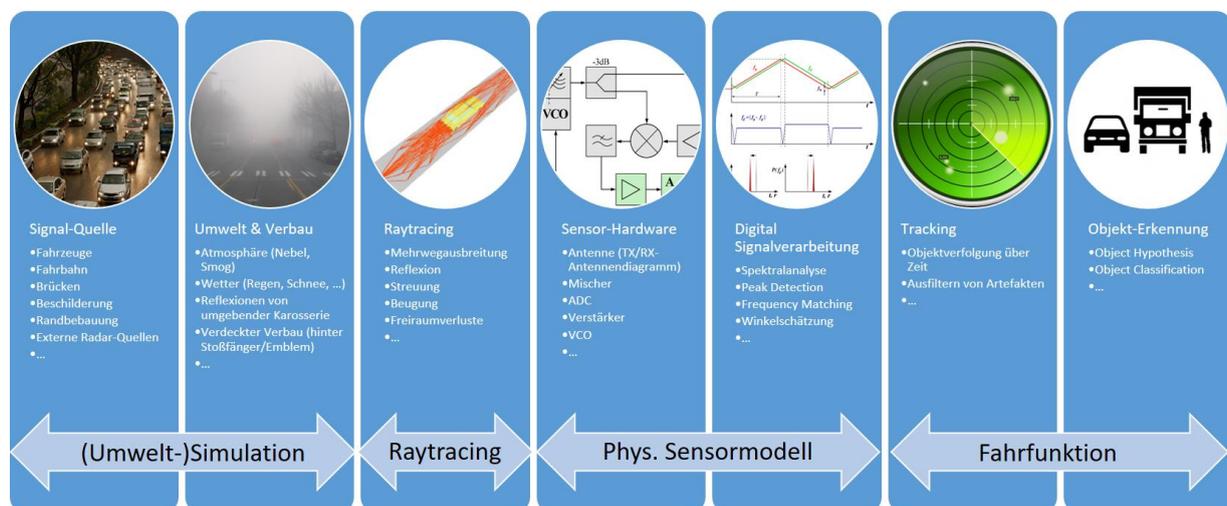


Abbildung 51: Signalkette der physikalischen Radarsimulation

In der Anwendung stellte sich die Frage, ob das Kanalmodell (mittels Raytracing) der Sensor- oder der Umgebungssimulation zuzuordnen ist. Rein praktisch bietet es sich natürlich an, das Raytracing gleich in der Umgebungssimulation durchzuführen, da in dieser die 3D-Geometrie und Materialbeschreibung des Szenarios bereits vorliegt und die Toolhersteller über Expertise in der Durchführung verfügen. Andererseits liegt die Kompetenz über relevante Radareffekte bei der Wellenausbreitung eher beim Sensormodellierer und die Ausprägung der elektromagnetischen Welle (Frequenz, Amplitude, Polarisation, Modulation, Phasenlage, etc.) wird durch den Sensor vorgegeben. Daher ist es notwendig, die Kanalsimulation als eigenständige Simulationskomponente zu betrachten. Damit besteht die Freiheit, ob sie von der Umgebungs- oder Sensorsimulation abgedeckt wird. Die notwendige Parametrierung der elektromagnetischen Welle wie oben beschrieben wird durch OSI ermöglicht. Damit teilt die Sensorsimulation vor Start der Umgebungssimulation dieser die Parameter der elektromagnetischen Welle mit (`osi3::SensorViewConfiguration` (OSI Documentation, 2020)).

Bezüglich dieser Parameter sei aber angemerkt, dass die Kanalsimulation nicht mit einem Vielfachen der Sendefrequenz (z.B. 77 GHz) durchgeführt werden kann, was zur Vermeidung einer Unterabtastung und zur Bestimmung der Phasenlage notwendig wäre. Nicht einmal die

modulationstypischen Frequenzrampen, die bei weitaus geringeren Frequenzen liegen (kHz-Bereich), können aktuell abgebildet werden. Daher wird die Kanalsimulation lediglich mit einer Frequenz durchgeführt, wie sie für die Fahrfunktion notwendig ist. Dafür ist meist eine zwei-stellige Wiederholungsrate ausreichend. Die Effekte auf das Signal, die z.B. aus Modulation, Phasenlage und Sendeleistung resultieren, müssen dann in einem Nachverarbeitungsschritt berechnet werden. Umgekehrt muss aber z.B. die Änderung der Polarisierung und die Signaldämpfung von der Kanalsimulation berechnet werden, weil die aus der konkreten Ausprägung des simulierten Szenarios folgen.

Im Verlauf von PEGASUS hat sich in Bezug auf das physikalische Sensormodell herauskristallisiert, dass die Anforderungen inkompatibel mit derzeitigen den technischen Möglichkeiten sind. Die Gründe dafür sind:

1. Verfügbarkeit exakter 3D-Modelle (insbesondere von Fahrzeugen), die auch den radarrelevanten inneren (metallischen) Aufbau enthalten
2. Verfügbarkeit von radarspezifischen Materialparametern (z.B. Permittivität und Oberflächenrauigkeit im Radarbereich)
3. Schnittstellen zwischen
  - a. Umgebungssimulation und Kanalsimulation
  - b. Kanalsimulation und Sensorsimulation
  - c. Sensorsimulation und Fahrfunktion
4. Verfügbarkeit und ausreichende Performanz der Kanalsimulation

Daher einigte sich Bosch mit den Konsortialpartnern darauf, die Umsetzung in der Toolchain auf das phänomenologische Modell zu beschränken.

Zu den Schnittstellen sei angemerkt, dass diese zwar diskutiert und nach Möglichkeit bereits in OSI integriert wurden, diese bis zum Projektende von PEGASUS aber nicht den Reifegrad, der für die Umsetzung erforderlich wäre, erreicht hat. Der Tatsache, dass sowohl die Definition einer anwendungsnahen, akkuraten und vollständigen Schnittstelle als auch die Erstellung eines solchen Sensormodells eine äußerst umfassende Aufgabe ist, wurde dadurch Ausdruck verliehen, dass dieser Fragestellung ein eigenes öffentlich gefördertes Nachfolgeprojekt (SET Level 4to5) gewidmet wurde.

Die Machbarkeit eines solchen physikalischen Radarmodells wurde seitens Bosch dadurch angetestet, indem der Raytracer RSI (Raw Signal Interface) vom Konsortialpartner IPG verwendet wurde, um von einer Referenzszenario eine Impulsantwort zu erzeugen, die dann von einem physikalischen Sensormodell nachverarbeitet werden kann. Es wurden keine prinzipiellen Probleme festgestellt, das vollständige physikalische Radarmodell aber aus oben genannten Gründen nicht umgesetzt.

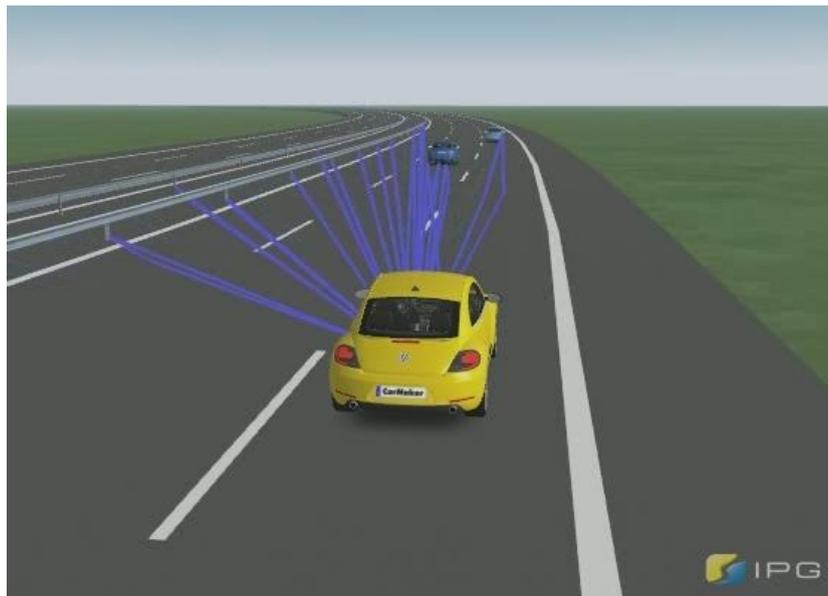


Abbildung 52: Raytracing des Radarsignals mithilfe des RSI von IPG CarMaker. Nur jene Strahlen sind dargestellt, die auch wieder auf den Radarempfänger (RX) treffen.

### 2.3.9 Sensormodell Kamera (UAP 3.2.2)

Im Unterarbeitspaket 3.2.2 „Modelle, Schnittstellen und Werkzeuge“ hat Bosch an der Video Sensor-Simulation mitgearbeitet und eine Implementierung des Modells in das Projekt eingebracht. Bei der Implementierung des Kamera-Sensormodells lag der Fokus auf dem phänomenologischen Sensormodell. In einer weiteren Iteration war geplant das physikalische Sensormodell zu implementieren. Da die Schnittstelle zu der Laufzeit von PEGASUS nicht zur Verfügung gestellt wurde, wurde jedoch das physikalische Sensormodell nicht implementiert.

Das phänomenologische Kamera – Sensormodell wurde auf der Vorlage des OSMP Dummy Sensors implementiert (OSMP, 2020). Die wichtigsten Effekte die implementiert wurden sind zum Beispiel

- die Implementierung der Sichtbarkeit im Kamera-Sichtfenster bzw. die Nicht-Sichtbarkeit außerhalb des Sichtfensters. (horizontaler und vertikaler Öffnungswinkel)
- Sensor-Sichtweite
- die Existenzwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Entfernung
- Verdeckung durch andere Verkehrsteilnehmer
- Sensor-Rauschen

Das Sensormodell wurde als FMUs für Ubuntu 16.06 für Windows 7 und 10 bilateral zur Verfügung gestellt.

Durch die Einbindung der Sensormodelle ist es einem Anwender möglich virtuell zu testen und die unterschiedlichen Detektionseigenschaften der einzelnen Sensoren zu vergleichen.

#### 2.3.9.1 Kameraeffekte

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3.2.1 hat Bosch sich mit weiteren Konsortialpartnern über mögliche Anforderungen an die Sensormodelle und deren Schnittstellen unterhalten. Nach längeren Diskussionen haben wir in einer Tabelle die wichtigsten Effekte dokumentiert und nach Machbarkeit im Projekt PEGASUS priorisiert. Dabei mussten wir ebenfalls in Betracht

ziehen, dass einige Effekte von der Toolumgebung noch nicht unterstützt werden können, sodass eine Implementierung im Rahmen von PEGASUS nicht machbar war. Der Vollständigkeit halber haben wir in der folgenden Tabelle alle diskutierten Effekte aufgelistet.

Ursache	Bemerkungen	Wirkungen	Parameter	Inputs
Field of View (FoV)	Sichtwinkel vertikal und horizontal	Eingeschränkte Erfassung	Sichtwinkel horizontal und vertikal	Sensorposition und Kippung
Rauschen	Thermisches Rauschen (Grundrauschen), Amplituden-/Phasenrauschen	Schlechteres SNR, FN	Verteilungsfunktion, Boltzmannkonstante	Temperatur, Belichtungseinstellung
Verdeckung	Objekt verdeckt anderes Objekt	Objektverlust	Trajektorie anderer Objekte	Geometrie/Pose der Objekte und Umgebung
Signalbeeinträchtigung/-dämpfung durch Wetter, Verschmutzung	verursacht Dämpfung und Reduzierung der Sichtweite	Schlechteres SNR -> Verschlechterung der Messgrößen (Gischt, Nebel)	Dämpfungsmodell	Wetter (in Abstufungen über das OSI Modell parametrisiert)
Beleuchtung	z.B. tiefstehende Sonne die zur Blendung der Kamera führt, Nachtszenen, hell dunkel Übergänge	false negative durch Blendung oder zu geringes SNR (Dunkelheit/Rauschen);	Nur physikalisch realistisch abbildbar	Beleuchtungsindex [enum]: - hell (Tag, Sonnenschein) - mittel (Tag, bewölkt/bedeckt) - gering (Dämmerung) - dunkel (Nacht, kein Sonnenlicht)
Auflösung (Imager)	Ab einer gewissen Entfernung werden zwei Objekte nur noch als eins wahrgenommen	Trennbarkeit von Objekten nicht möglich	Auflösungsgesetz, wann sind zwei Objekte noch voneinander unterscheidbar	-Pixelanzahl und Größe Brennweite Linse
Fahrzeugbewegung während der Aufnahme	Änderung FoV durch Bremsen/Beschleunigen (Nicken), Rolling-Shutter Motion Blur	Zielverlust beeinträchtigte Objektdetektion, Verschmieren der Kanten	Fahrdynamikmodell (von Tool/OEM), zeitliche Auslese des Imagers,	Pose des Sensors
Latenz / Latenzschwankungen	Objekte kommen verzögert auf dem Datenbus an	Objekte werden nicht rechtzeitig erkannt Fall 1: in Folge oben genannter Effekt - keine	Latenzstatistik	Objektliste mit Zeitstempel

Ursache	Bemerkungen	Wirkungen	Parameter	Inputs
		frühere Detektion möglich; Fall 2: kein Update erfolgt (z.B. hohe Sensortemperatur/Prozessorlast)		
Belichtungszeit	Unterschiedliche Belichtungszeiten werden zusammengesetzt zu einem Frame	Motion Blur, HDR Effekte, Sättigung	Belichtungszeitmodell	Realistische Luminanzdaten der Welt
Sensorausfall	Temporärer Ausfall der Kamera	Objektverlust	Störungsmodell	-
Bildverzeichnung	Objekte wirken verzeichnet/ nicht mehr realistisch, speziell am Bildrand	Objektverlust, bzw. falsche Klassifizierung des Objektes am Rand	Verzeichnungsmodell	Rohbild
Bildvignettierung	Unterschiedliche Bereiche des Bildes haben unterschiedliche Intensitäten	Detektion wird schwieriger wenn der Kontrast nicht mehr ausreicht	Vignettierungsmodell	Rohbild
Bildverschmutzung	Regentropfen, Schlieren, Verdeckungen der Linse	Objektverlust, Detektion wird schwieriger, Falsche Objekte werden erkannt	Verschmutzungsmodell	Rohbild

Tabelle 33: Kamera-Sensormodell-Effekte

### 2.3.9.2 Modellanforderungen

Im Projekt wurde bei den Konsortialpartnern abgefragt, welche Anforderungen an das Kamera-Sensormodell gestellt werden. Daraus ist die nachfolgende Tabelle entstanden. Zusätzlich hat Bosch mit anderen Partnern zusammengefasst, welche Eingangsgrößen das Sensormodell von der Toolumgebung benötigt. Diese Anforderungen wurden unter anderem mit den Schlagworten „muss“ und „soll“ priorisiert. Einige Effekte konnten jedoch im Projekt nicht implementiert werden, da auf der einen Seite die Schnittstellen nicht implementiert waren und auf der anderen Seite die Parameter von den Toolherstellern nicht befüllt werden konnten.

ID	Anforderungen an das Sensormodell	Relevant für	Prio
D1	<b>Was soll das Simulationsmodell können? Wofür wird es eingesetzt?</b>		
D1.1	Das generische Sensorikmodell soll das stat. Verhalten eines Sensors auf der Objektdatenschnittstelle, Freiräume und Spurmarkierungen abbilden.	BMW	muss

ID	Anforderungen an das Sensormodell	Relevant für	Prio
D1.2	Die für die stat. Modellierung notwendigen Sensorikphänomene sind zu definieren	BMW	muss
D1.2.2	Fehler und Drop-Outs aufgrund Gegenlicht	BMW	muss
D1.2.3	Fehler und Drop-Outs aufgrund Teernähten auf der Fahrbahn	BMW	soll
D1.2.4	schnelle Übergänge Hell-Dunkel oder umgekehrt (Tunnel Ein- und Ausfahrt)	BMW	muss
D1.2.5	Fehler und Drop-Outs bei Dämmerung , Nacht	BMW	muss
D1.2.6	Field of View (Optik)	ADC	muss
D1.2.7	Objektverschmelzung und -trennung	ADC	muss
D1.2.8	Latenz / Latenzschwankungen	ADC	muss
D1.2.9	Blendung	ADC	soll
D1.2.10	Schatten	ADC	soll
D1.2.11	Fahrzeugdynamik (Pitch, Roll)	ADC	muss
D1.2.12	Messungenauigkeiten	ADC	muss
D1.3	Das Sensormodell muss zum Zwecke des Austauschs zwischen Plattformen/Simulationsumgebungen eine standardisierte Schnittstelle nutzen (z.B. FMI)	ADC	muss
D2	<b>Welche Eingangsgrößen benötigt dieses Simulationsmodell (Schnittstelle)</b>		
D2.1	Umgebungsobjekte (statisch und dynamisch)	BMW	muss
D2.2	Wetter (Regen, Schnee, Nebel)	BMW	muss
D2.3	Sensorintegration, Verbauposition inkl. Besonderheiten (Scheibe, Radom)	BMW	muss
D2.4	Sensorspezifikation	BMW	muss
D2.5	Reflektionscharakteristik der Umgebungsobjekte (Objektklasse; z.B. PKW, Verkehrsschilder, ...)	ADC	soll
D2.6	Ego-Vehikel-Daten	ADC	muss
D2.7	Fahrbahnmarkierung	ADC	muss
D2.8	Fahrbahntopologie	ADC	muss
D2.9	Beleuchtung (Sonne, Fremdlicht, Tag/Nacht)	ADC	muss
D2.10	Dynamischer Ein-/Ausschalter (f. Simulation Sensorausfall)	ADC	muss

Tabelle 34 Gesammelte Anforderungen an das Kamera-Sensormodell

### 2.3.9.3 Phänomenologisches Kamera-Sensormodell

Die phänomenologischen Kameraeffekte, die Bosch implementiert hat, basieren auf den Eigenschaften der Standard-Fahrerassistenz-Kameras. Das Modell ist jedoch parametrisierbar und kann unterschiedliche Kameras repräsentieren.

Als Eingabe erhält das phänomenologische Sensormodell eine Objektliste mit allen Objekten in der Szene. Im Sensormodell wird diese Objektliste sensorspezifisch verändert, sodass als Ausgabe eine modifizierte Objektliste herauskommt.

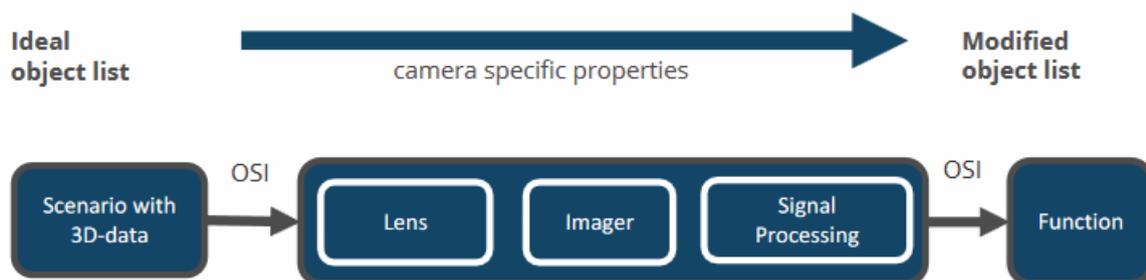


Abbildung 53: Konzept und Aufbau des phänomenologischen Kameramodells

Genauer gesagt werden die Objektlisten innerhalb des Kameramodells aufgrund von parametrisierten Phänomenen auf Basis einer vorher zu bestimmenden, für das jeweilige Kameramodell charakteristischen Statistik verfälscht.

Für das Kamera-Sensormodell hat Bosch anhand der obigen Tabellen die im Projektrahmen machbaren Kameraeffekte implementiert. Unter anderem filtert das Kamera-Sensormodell die „Ground Truth“ Objekte nach Sichtwinkel (horizontal und vertikal) und Sichtweite aus. Weitere Objekt-Modifikationen im Sensormodell entstehen durch implementierte Effekte wie

- Sensor-Rauschen (z.B. durch Temperatur)
- Verdeckung durch andere Verkehrsteilnehmer
- Existenzwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Entfernung
- Dämpfung der Detektionswahrscheinlichkeit durch Regen oder Nebel
- Zufällige Störungen des Sensors

Zusätzlich werden die detektierten Objekte mit Bezeichnungen wie „Car“ oder „Pedestrian“ klassifiziert. Durch die Linsen-Verzeichnung und Vignettierung nimmt die Detektionswahrscheinlichkeit zum Rand hin ab. Dies ist ebenfalls ein Effekt welcher im phänomenologischen Modell enthalten ist. Mit Hilfe einer Stereo-Kamera kann die Tiefen-Distanz zum nächsten Objekt berechnet werden. Die Genauigkeit schwankt auch mit größerer Distanz, welche ebenfalls im Modell berücksichtigt wird. Alle Effekte hat Bosch versucht, so realistisch wie möglich zu implementieren, sodass eine Validation der Effekte möglich ist.

Das phänomenologische Kamera-Sensormodell hat Bosch sowohl in die Umgebungssimulation IPG CarMaker als auch in Vires VTD integriert. Ein Ausschnitt eines Szenarios in IPG CarMaker sieht man in Abbildung 54. Die vom Sensormodell erkannten Objekte werden mit einer grünen 2D Bounding Box markiert. Zusätzlich erhält das detektierte Objekt eine Informationstafel welche die Detektionswahrscheinlichkeit, Klasse, (reale) Geschwindigkeit und

die Distanz visualisiert. Die Daten werden vom Sensormodell befüllt. Die Möglichkeit, diese Daten zu visualisieren, wurde von IPG CarMaker zur Verfügung gestellt.

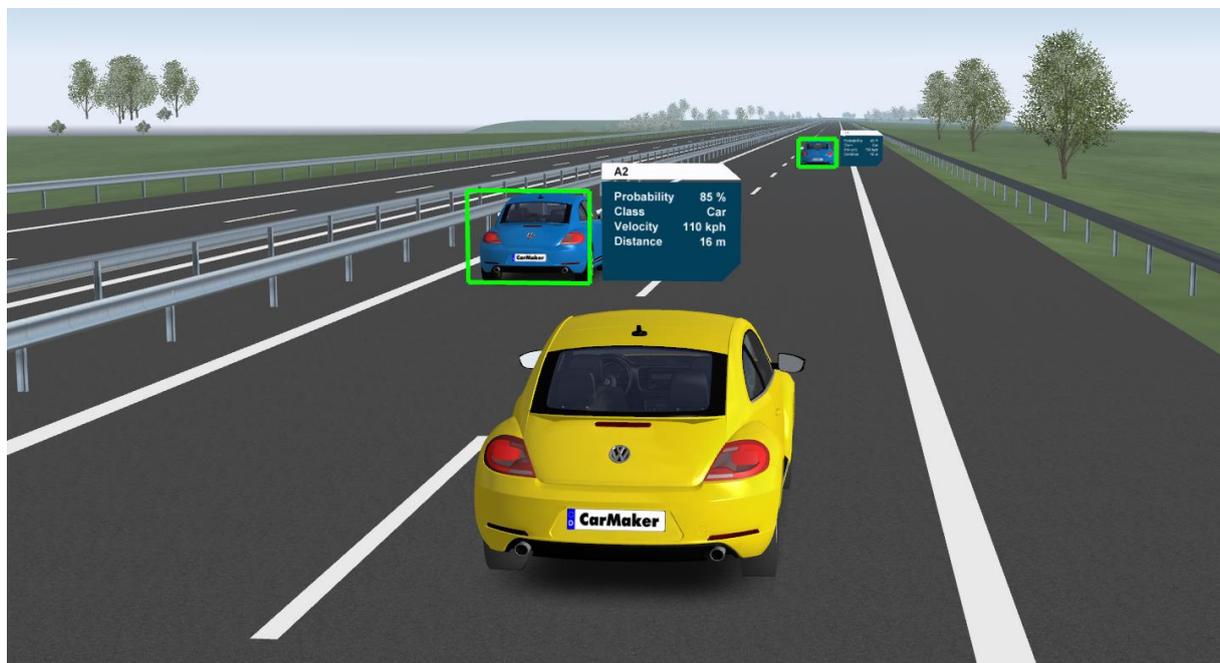


Abbildung 54: Darstellung der Kamera-Sensorsimulation mit den Informationstafeln

Zusätzlich erlaubt es IPG CarMaker, über IPG Control die einzelnen Werte in einer Grafik darzustellen (siehe Abbildung 55 rechts). Hier werden die Detektionswahrscheinlichkeiten der zwei Objekte sowie deren Distanz zum Ego-Fahrzeug aufgetragen. Man erkennt, dass die Detektionswahrscheinlichkeit zunimmt, je kürzer die Distanz zwischen Ego-Fahrzeug und Objekten ist. Dies wurde im Modell auf diese Weise implementiert. Ändert sich diese Distanz nicht mehr, bleibt auch die Detektionswahrscheinlichkeit bis auf das implementierte Rauschen konstant. Die Sensorstörungen machen sich an den gezackten Kurven und ebenfalls an variierenden („zitternden“) Bounding Boxen bemerkbar.

Die Erkennung von stationären Objekten, wie Schildern oder Traffic Lights wurde in diesem Modell noch nicht implementiert.

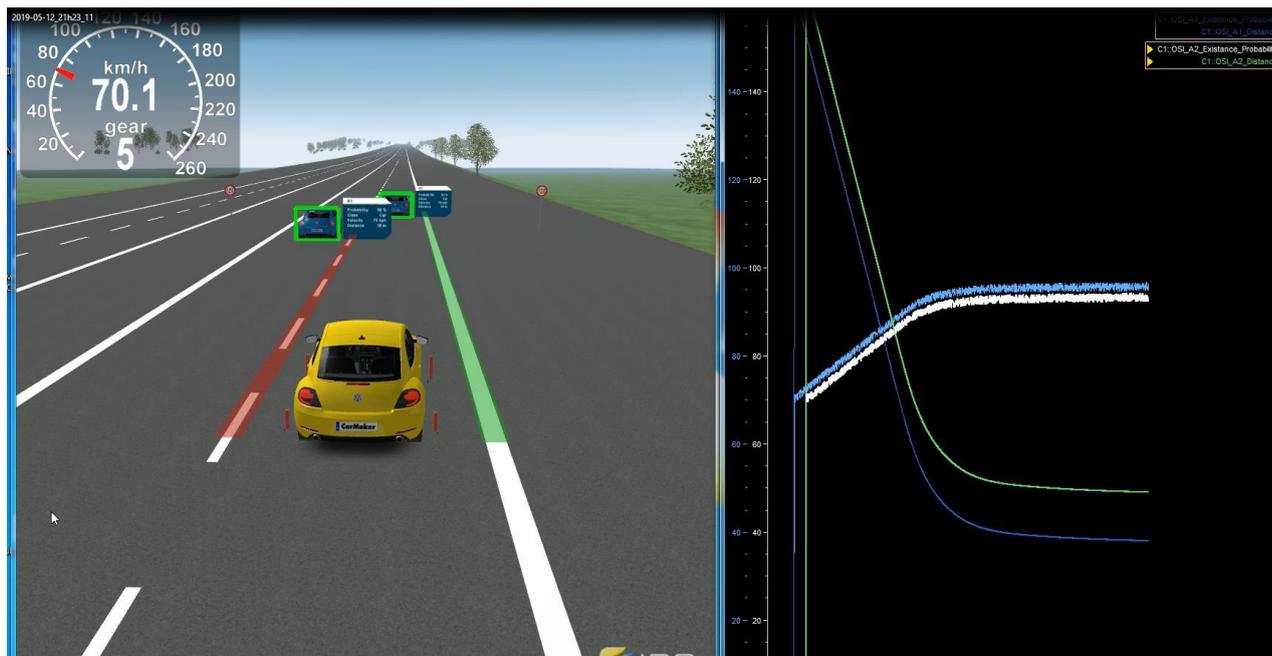


Abbildung 55: Darstellung des Video Sensormodells in IPG CarMaker

Auf der anderen Seite haben wir das Sensormodell von Bosch in die Umweltsimulation von Vires VTD eingebunden (siehe Abbildung 56). Hier werden ebenfalls die detektierten Objekte mit einer gelben 3D Bounding Box markiert. Die nicht detektierten Objekte erhalten eine weiße 3D Bounding Box. VTD übergibt hier die Objekte an die Kamera-Simulation über die OSI-Schnittstelle. Die Darstellung der Ground-Truth Objekte und der detektierten Objekte läuft außerhalb von VTD in dem 3D-Visualisierungstool von ROS namens „rviz“.

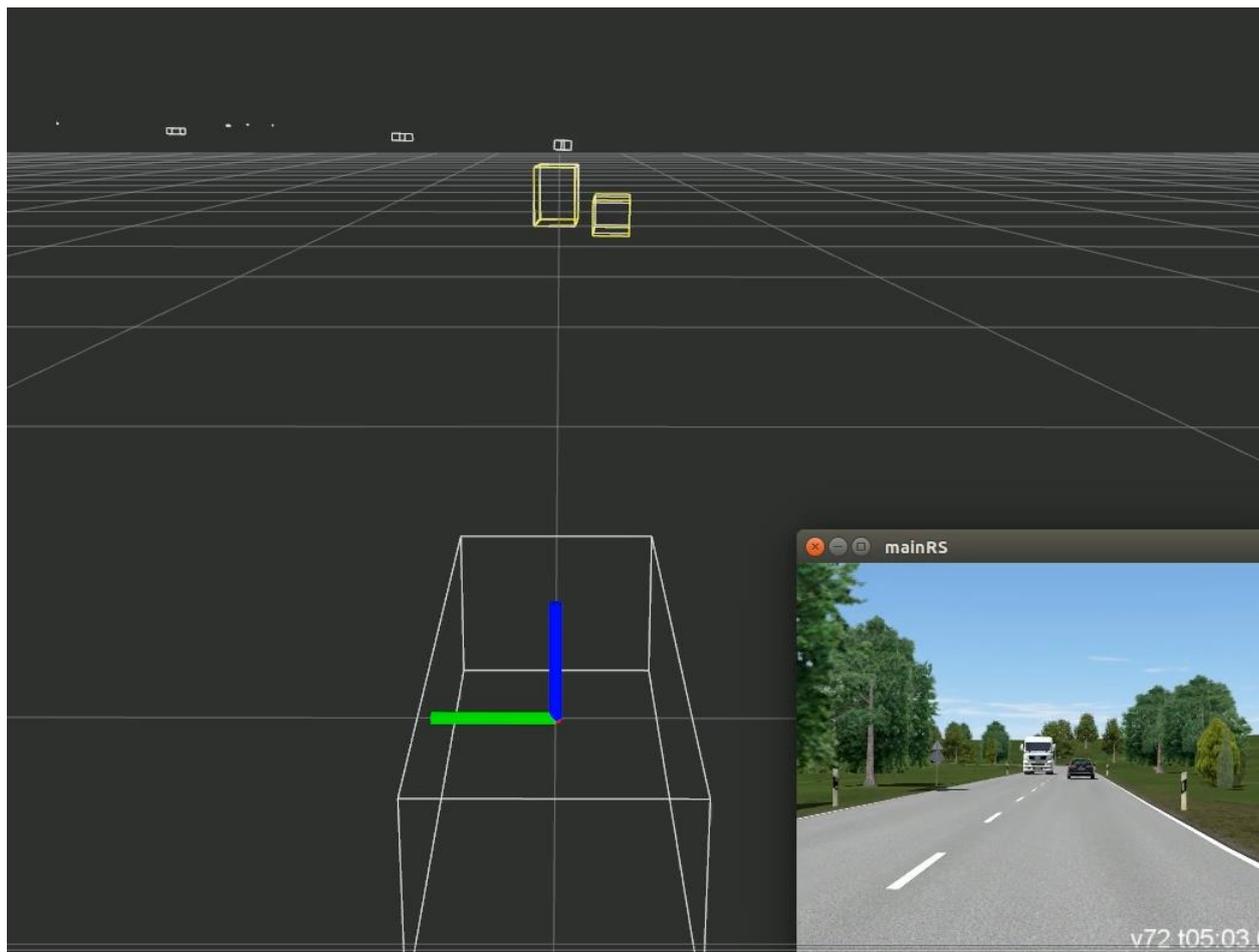


Abbildung 56: Darstellung des Kamera Sensormodells mit VTD und ROS rviz

Dies soll auch darstellen, dass die Sensormodelle kompatibel zu jedem Umweltmodell sind, welches die OSI Schnittstelle bedient. Sensormodelle können auch beliebig ausgetauscht werden und eine Integration ist einfach zu machen.

#### 2.3.9.4 Physikalisches Kamera-Sensormodell

Im Weiteren plante man, im Rahmen des PEGASUS Projektes die physikalische Sensorsimulation zu entwickeln. Dies würde bedeuten, dass die Umgebungssimulation nicht nur die Objektlisten „Ground Truth“ sondern auch die Rohdaten übergibt. Jedes Sensormodell hat unterschiedliche Ansprüche an die Rohdatenschnittstelle. Das Kamera- Sensormodell z.B. benötigt als Input mindestens 8MP RGB Bilder mit jeweils 20 Bit pro Kanal und 30-60 FPS um die folgenden Effekte realistisch abzubilden

- Beleuchtungssituationen (z.B. Blendung durch tiefstehende Sonne)
- Motion Blur
- Schattenwurf (→ Fehldetektionen)
- Bildverschmutzung
- Streulichteffekte
- Belichtungseffekte

Die Werte in den Bildern sollen realistischen Leuchtdichtewerten entsprechen.

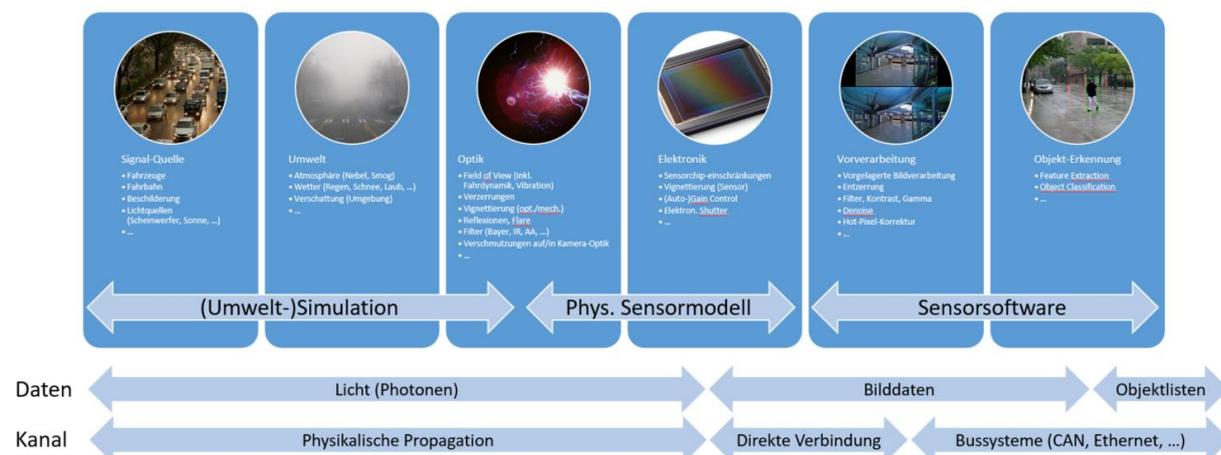


Abbildung 57: Signalverarbeitungsarchitektur der Kamera-Sensorsimulation

Um die Verwendung physikalischer Sensor-Modelle zu ermöglichen wurde das OSI-Interface erweitert und unter der Bezeichnung OSI 3.0 veröffentlicht. Diese Kamera-Rohdatenschnittstelle war Resultat aus mehreren Diskussion zwischen Bosch und Continental. Zusätzlich haben wir eine Priorisierung vorgenommen, welche Schnittstellen zu welchem Zeitpunkt implementiert werden sollten. Zusammengefasst ist dies in der folgenden Tabelle.

Messages	Prio
osi_detectedroadmarking.proto	4
osi_detectedtrafficlight.proto	4
osi_detectedtrafficsign.proto	4
osi_environment.proto	1
osi_featuredata.proto	1
osi_groundtruth.proto	1
osi_hostvehicledata.proto	5
osi_lane.proto	4
osi_object.proto	2
osi_occupant.proto	5
osi_roadmarking.proto	4
osi_sensordata.proto	1
osi_sensorview.proto	3
osi_sensorviewconfiguration.proto	3

Tabelle 35: Priorisierung in der Umsetzung der Schnittstellenkomponenten

Eine physikalische Kamera-Sensormodellierung wurde aber aus Zeitgründen im Projekt nicht mehr implementiert. Die Schnittstellen wurden nicht rechtzeitig im Projekt zur Verfügung gestellt.

Um das physikalische Sensormodell vollständig implementieren zu können, muss die OSI Schnittstelle noch erweitert werden. Viele Fragen, wie die Beschreibung der Materialoberflächen, blieben im PEGASUS Projekt unbeantwortet und werden in Folgeprojekten diskutiert.

### 2.3.10 Validierung von Sensormodellen (UAP 3.2.2)

Zusammen mit den anderen Konsortialpartnern wurde ein Konzept für die Validierung von Sensormodellen erarbeitet, welches auf dem Vergleich von gemessenen und simulierten Sensor-Ausgaben des gleichen Szenarios basiert und eine entsprechende Metrik definiert. Dieses Konzept wurde auch beim Abschlussevent präsentiert.

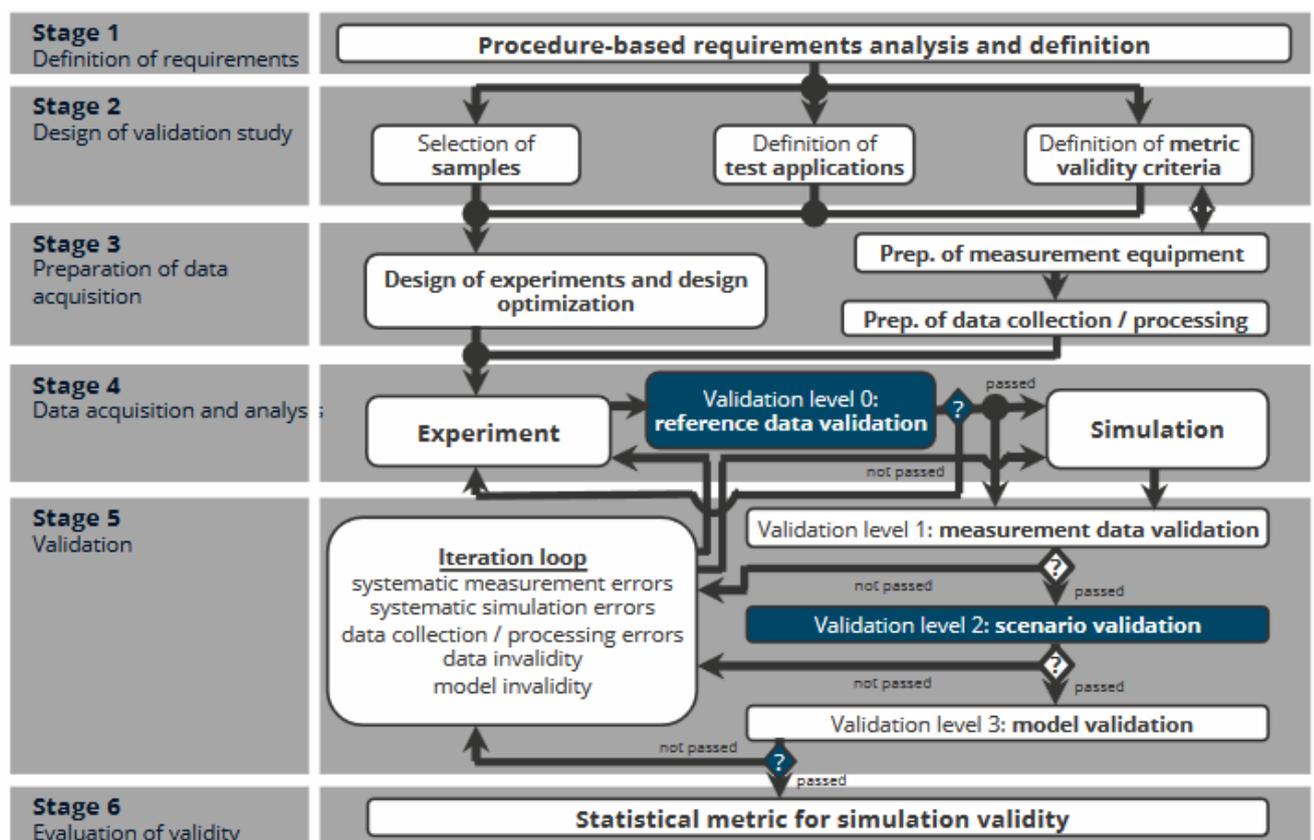


Abbildung 58: Schema zur objektiven Ermittlung der Modellqualität durch statistische Validierung

Eine exemplarische Umsetzung des Validationskonzeptes ist im Rahmen von PEGASUS nicht erfolgt. Ausschlaggebend dafür ist Problematik, das gemessene Szenario detailgetreu in die Simulation zu übertragen. Die erforderliche Ground Truth (exakte 3D-Geometrie und Trajektorien aller bewegten Objekte) muss hierfür von einer Referenzsensorik (z.B. LiDAR und Kamera) erfasst und in ein kompatibles Format für die Überführung in die Simulation gebracht werden. Die praktische Durchführung hätte jedoch den leistbaren Umfang von PEGASUS überstiegen, weshalb man sich im PEGASUS im Sinne der Erarbeitung einer Methode auf die Erstellung des Konzeptes beschränkte.

### **2.3.11 Abweichungen zur ursprünglichen BOSCH-spezifischen Aufgabenstellung in TP 3**

Der in der VHB ursprünglich angesetzte Fokus auf Validierung der Sensorik passte schlussendlich nicht zu einer Eingrenzung, die das Projekt getroffen hatte: Die HAF eher auf einer Black-Box-Ebene zu testen. Die PEGASUS Datenbank fokussierte sich durch die reine Auswertung der Objektdaten ebenfalls auf Verkehrssituationen auf der Autobahn. Die Umfeldwahrnehmung als Sub-System ließ sich nicht sauber in diesen Kontext einordnen. Entsprechend waren durchgeführte Prüfgeländetests stark auf Verkehrssituationen fokussiert und nicht geeignet für eine Betrachtung der Leistungsfähigkeit der Sensorik. Daher wurden Änderungen an UAP 3.3.2 und UAP 3.4.1 vorgenommen. Anstatt Test auf dem Prüfgelände aufzubauen, wurde Daten auf der Autobahn eingefahren, konvertiert und der PEGASUS-DB zur Verfügung gestellt. Bis zum Projektende konnten jedoch nicht alle Daten zur Verfügung gestellt werden.

Ferner konnte das Sensormodell-Validationskonzept nicht umgesetzt werden, siehe dazu auch Kapitel 2.3.10.

## **2.4 TP 4: Ergebnisreflektion und Einbettung**

### **2.4.1 Methodik der Ergebnisreflektion und Ergebnisreflektion (UAP 4.1.2 und 4.2.1)**

Für das PEGASUS Projekt wurde ein Prozess zur Ergebnisreflektion entwickelt, mit dem der Fortschritt des Projekts regelmäßig anhand von Metriken bewertet wurde. Dabei wurden Metriken definiert, welche in Workshops befüllt wurden. Diese Ergebnisse wurden dann in Nachbereitungsworkshops strukturiert und zusammengefasst um schließlich den TP-Leitern zur Verfügung zu stehen. Für die interne Ergebnisreflektion durch die Partner wurden Fragebögen erarbeitet, verwendet und ausgewertet. BOSCH hat dabei mit einem Mitarbeiter die Inhalte mitgestaltet.

#### **2.4.1.1 Fragebogen**

Zur Beantwortung der PEGASUS internen Reflexion (UAP4.1.1) wurden – als erster Schritt der Reflexion – im TP4 Grundüberlegungen zu einer möglichen Fragebogenstruktur angestellt und diese in einem ersten Ansatz skizziert. Bosch-seitig wurde dieser Ansatz in enger Abstimmung im TP4 diskutiert und mit dem Partner OFFIS weiterentwickelt und bei allen PEGASUS Mitarbeitern (U)AP-Ebene ausgerollt.

Der Fragebogen verfolgte das Ziel, die Rückverfolgbarkeit sowie die Durchgängigkeit der PEGASUS-Aktivitäten und deren Ergebnisse sicherzustellen. Die Ergebnisreflexion besteht aus zwei Teilen:

- I. Zum einen soll für jedes UAP die Integration der Arbeiten sowie der Ergebnisse in die PE-GASUS Gesamtmethode erfasst werden um die Durchgängigkeit, Konsistenz und Vollständigkeit der PEGASUS-Gesamtmethode in Relation zu den UAP-Arbeiten sicherzustellen.
- II. Zum anderen soll sichergestellt werden, dass die Grundlagen sowie die Argumentationen auf derer die PEGASUS-Ergebnisse entstanden sind; dokumentiert sind, um die Rückverfolgbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Der Fragebogen setzt im Wesentlichen den Fokus auf zwei Aspekte: „Top-Down Reflexion“ sowie „Bottom-Up Reflexion“. Diese werden im Folgenden kurz motiviert:

#### 2.4.1.1.1. Top-Down Reflexion der PEGASUS-Ergebnisse (Fokus1)

PEGASUS hat das Ziel, einen Beitrag zum Sicherheitsnachweis automatisierter Fahrzeuge zu liefern. Dazu werden sowohl ein Vorgehen als auch die zu verwendenden Bausteine (Szenarien, Metriken, usw.) des Vorgehens in PEGASUS definiert. PEGASUS muss das definierte Vorgehen und deren Arbeitsergebnisse nachvollziehbar machen und somit die Frage beantworten können, auf welcher Grundlage die PEGASUS-Ergebnisse entstanden sind, und wie diese zum Sicherheitsnachweis beitragen. Um diese Fragestellung zu reflektieren, wurde der Top-Down Ansatz entwickelt, der überprüft, ob nachvollziehbar dokumentiert ist, auf welcher Grundlage die Bausteine jeweils entstanden sind. Wird beispielsweise ein Testfall durchgeführt, muss nachvollziehbar sein, warum das verwendete Testwerkzeug ausgewählt wurde.

Ein Ergebnis dieser Reflexion könnte sein, dass nicht nachvollziehbar ist, wie die Auswahl der Testfälle zu Stande gekommen ist. Die aufgedeckten Lücken werden an die UAPs zurückgespielt. Da nicht jedes UAP zwangsläufig zu allen Gesamtergebnissen beiträgt, sind die Fragen für den Top-Down Ansatz für die UAPs unterschiedlich und abhängig von den jeweiligen Arbeitsergebnissen.

#### 2.4.1.1.2. Bottom-Up Reflexion der PEGASUS-Arbeiten (Fokus 2)

Das PEGASUS-Vorgehen basiert auf den Arbeitsergebnissen der einzelnen UAPs. Das Vorgehen kann nur dann erfolgreich umgesetzt und evaluiert werden, wenn die Schnittstellen zwischen den UAPs wohldefiniert und abgestimmt sind. Daher werden beim so genannten Bottom-Up Ansatz die Arbeiten der einzelnen UAPs hinsichtlich der Durchgängigkeit reflektiert. Dabei wird identifiziert, ob die notwendigen Voraussetzungen für die Arbeiten vorhanden sind, welche Ergebnisse an welche anderen UAPs geliefert werden und welchen Reifegrad diese Ergebnisse haben. Weiterhin sollen die Aktivitäten und Ergebnisse in Relation zur Gesamtmethode gestellt werden, um diese hinsichtlich der Konsistenz zu den konkreten UAP-Arbeiten zu evaluieren.

Ein mögliches Resultat dieser Reflektion könnte sein, dass von bestimmten UAPs benötigte Bausteine fehlen. Diese Abweichungen werden an die beteiligten UAPs weitergegeben, um die Zusammenarbeit zu verbessern und ggfs. die PEGASUS Gesamtmethode anzupassen. Die Fragen für den Bottom-Up Ansatz sind für die UAPs identisch, da jedes UAP zu einem Gesamtergebnis von PEGASUS beitragen sollte und somit mindestens ein Arbeitsergebnis erzeugen sollte, das von mindestens einem anderen UAP verwendet wird.

### 2.4.1.2 Formaler Aufbau des Fragebogens

Zur eindeutigen Zuordnung, Adressierung, Diskussion und Weiterverfolgung waren im Fragebogen die genauen Bearbeiter Angaben einzutragen (Kopfzeile). Zur Erleichterung der Eingabe und einer genauen Orientierung anhand der formulierten Ziele der Vorhabensbeschreibung wurden sämtliche als blau markierte Bereiche, inhaltlich vorbefüllt und als „Drop-down“ Felder angelegt. Diese wurden gemäß der Vorhabensbeschreibung sowie den Projektteilnehmerlisten vom Projektbüro abgeglichen.

Um die maximale Qualität an Rückmeldung dem Fragebogen aus dem PEGASUS Projekt zu erreichen erlaubt der Fragebogen darüber hinaus auch, jederzeit, außerhalb der vorgegebenen Rasterung und Bearbeitungsfelder, neue Bearbeiter (Namen), Ideen, Hinweise, Einträge und Erweiterungen direkt an das Projekt bzw. ans TP4 adressieren zu können.

 TP4 – Ergebnisreflexion: UAP-FRAGEBOGEN für TP1-TP2-TP3; - März 2018 - 

Teilprojekt: *Wählen Sie Ihr Teilprojekt aus.*; UAP(s): *Wählen Sie ein (U)AP Element aus.*  
 Ansprechpartner: *Wählen Sie Ihren Namen aus.*; 2ter Ansprechpartner (optional) *Wählen Sie Ihren Namen aus.*  
 Projektpartner/Verbundene Partner: *Wählen Sie Ihren Firmennamen aus.*

Inhalt – Was erwartet Sie in diesem Fragebogen?

1	Einleitung .....	2
1.1	Motivation und Vorgehen der Ergebnisreflexion .....	2
1.2	Fokus 1: Top-Down Reflexion der PEGASUS-Ergebnisse .....	2
1.3	Fokus 2: Bottom-Up Reflexion der PEGASUS-Arbeiten .....	3
2	TP4 Ergebnisreflexion .....	3
2.1	Reflexion der Rückverfolgbarkeit der PEGASUS-Ergebnisse (Fokus1).....	3
2.2	Reflexion der Durchgängigkeit der PEGASUS-Arbeiten (Fokus 2) .....	10
2.2.1	UAP-Arbeitsgrundlagen.....	10
2.2.2	UAP-Arbeitsergebnisse.....	11
2.3	Ergebnisreflexion aus UAP-Sicht auf TP-Ergebnis Ebene .....	12
2.3.1	Welche der Ergebnisse des TP 1: „Szenarienanalyse und Qualitätsmaße“ sind in Ihrem UAP umgesetzt worden? .....	12
2.3.2	Welche der Ergebnisse des TP 2: „Umsetzungsprozesse“ sind in Ihrem UAP umgesetzt worden?.....	13
2.3.3	Welche der Ergebnisse des TP 3: „Testen“ sind in Ihrem UAP umgesetzt worden? .....	14
3	Anhang .....	15
3.1	Übersicht Reifegrade.....	15
3.2	PEGASUS Gesamtmethode zur Bewertung der hochautomatischen Fahrfunktion .....	16
3.3	Erläuterungen zum Ausfüllen des Fragebogens.....	17

Abbildung 59: Kopfzeile und Inhalt „Fragebogen TP4 – interne Ergebnisreflexion“

 TP4 – Ergebnisreflexion: UAP-FRAGEBOGEN für TP1-TP2-TP3; - März 2018 - 

Teilprojekt: *Wählen Sie Ihr Teilprojekt aus.*; UAP(s): *Wählen Sie ein (U)AP Element aus.*  
 Ansprechpartner: *Wählen Sie Ihren Namen aus.*; 2ter Ansprechpartner (optional) *Wählen Sie Ihren Namen aus.*  
 Projektpartner/Verbundene Partner: *Wählen Sie Ihren Firmennamen aus.*

3.3 Erläuterungen zum Ausfüllen des Fragebogens.

Sehr geehrte Damen und Herren, sehr geehrte PEGASUS UAP-Projektbearbeiterinnen. Im TP4 ist uns bewusst, dass viele von Ihnen mitten in der Bearbeitung von (U)AP-Themen stecken, diese teilweise noch nicht fertiggestellt sind oder noch gar nicht begonnen werden konnten. Nichtsdestotrotz ist es die Aufgabe von TP4, auch im steten Blickwinkel der Rechtzeitigkeit, frühzeitig mit der Ergebnisreflexion in die einzelnen UAPs einzutauchen um Durchgängigkeit und Rückverfolgbarkeit sichtbar zu machen. Weiterhin kann damit auch -zur rechten Zeit- mögliche Probleme innerhalb eines UAPs und insbesondere auch zwischen verschiedenen UAPs identifiziert werden. Wir haben versucht, Ihnen das Ausfüllen des Fragebogens mittels Drop-Down-Feldern soweit als möglich zu erleichtern. Durch die Vorbestückung dieser Drop-Down-Felder sollten sich für Sie Zeitvorteile beim Ausfüllen des Fragenteils ergeben. Weiterhin geben wir Ihnen ausreichend Raum, zusätzlich zum Fragenteil individuelle Hinweise, Anmerkungen und Kommentare einfließen zu lassen. Aus diesem Grund finden Sie diesen Fragebogen im WORD-Format vor. **Dieser Fragebogen ist im Projektaufwerk unter folgendem Pfad zu finden:**

Link: [https://teamsites-extranet.dlr.de/ts/PEGASUS/freigegebene%20Dokumente/31\\_PEGASUS\\_interne\\_Ergebnisreflexion](https://teamsites-extranet.dlr.de/ts/PEGASUS/freigegebene%20Dokumente/31_PEGASUS_interne_Ergebnisreflexion)

Dateinamen-Nomenklatur: **TP4\_UAPXXX\_Vorname\_Nachname\_Firmenname\_ddmmyyyy.docx**  
 Beispiel: TP4\_UAP321\_Christian\_Phillipp\_BOSCH\_07022018.docx

Wir bitten Sie, sich an die Dateinamen-Nomenklatur zu halten. Eine Versionierung erfolgt via Dokumentation im Projektaufwerk. Weiterhin haben Sie die Möglichkeit, im Rahmen des Projektfortschritts, den Fragebogen inhaltlich für eine folgende Ergebnisreflexionstermin anzupassen. Sie haben jederzeit Zugang zu Ihrem Fragebogen. Nach dem Ausfüllen des Fragebogens bitten wir Sie, parallel zum Abspeichern der WORD-Datei, eine PDF-Version mit zu erzeugen und zu hinterlegen. Für Änderungen im Rahmen einer weiteren Überarbeitung des Fragebogens bitten wir Sie, diese farblich zu markieren. Sie können hierzu die Farbe „dunkelrot“ nutzen. Auch sollten Sie eineindeutig kenntlich machen, WER die letzten Änderungen, falls Abweichungen von den Namen in der Kopfzeile vorhanden sind, durchgeführt hat. **Nachfolgend eine Kurzanleitung zum Ausfüllen des UAP-Fragebogens:**

- Bitte Doppelklicken Sie in die Kopfzeile des Dokuments zum Ausfüllen des Headers. Nutzen Sie die Drop-Down Felder. Zutreffendes bitte anzukreuzen.
- Falls ein Element fehlt oder Sie direktes Feedback geben wollen, dann senden Sie bitte eine  Email. Nach Prüfung nehmen wir Ihren Punkt gerne mit auf.
- Mit **blauer Schrift** gekennzeichnete Einträge sind Drop-Down-Felder. Bitte bearbeiten Sie jedes Feld. Es sind auch stets Einträge „n.a.“ oder „leer“ wählbar.
- Die Fragen beziehen sich auf die UAPs aus der Vorhabensbeschreibung und referenzieren auf die Gesamtmethode. Dabei kann es bis zu sechs Fragen pro UAP geben. Um dieser Anforderung gerecht zu werden gibt es sechs Fragenblöcke. Die Anzahl der UAP-Fragen ist im Drop-Down-Feld ersichtlich; z.B. UAP2.1.1-TEIL 1/4. Entsprechend sind in diesem Fall nur vier Fragen zu beantworten. Folglich müssen Fragenblock fünf und sechs nicht ausgefüllt werden.
- Falls Ihrerseits Fragen zur Bearbeitung des Fragebogens auftauchen, können Sie mich gerne kontaktieren: Christian Philipp,  Email,  0151 1640 2551.

**Information: Sie können die Textfelder jederzeit beliebig erweitern.**

Abbildung 60: Erläuterungen zum Ausfüllen des Fragebogens.

Als Anleitung zur selbstständigen Bearbeitung des Fragebogens sowie der definierten Nomenklatur und einem definierten Ablageort im Projektaufwerk wurde eine ausführliche Anleitung begleitend mit formuliert, siehe Abbildung 60.

#### 2.4.1.2.1. Reflexion der Rückverfolgbarkeit der PEGASUS-Ergebnisse (Fokus1)

Im Fragebogen finden sich eine Reihe von Fragen zur Rückverfolgbarkeit der PEGASUS-Ergebnisse, zugeschnitten auf das jeweilige UAP, vgl. Punkt „4. UAP Fragenelemente“, siehe

Anhang. Falls eine der Fragen aus UAP-Bearbeiter Blickwinkel nicht in deren/dessen Verantwortungsbereich liegt, so sollen Hinweise an das TP4 erfolgen, in welchem UAP diese Frage aus Bearbeitersicht nach angesiedelt ist. Für diesen Teil der Ergebnisreflexion haben TP4 - als Startpunkt für die Bearbeiter, basierend auf einer korrekten Herleitung eines konkreten Szenarios - die Annahme getroffen, dass sich

- ein konkretes Szenario (Logisches Szenario mit konkreter Parameterausprägung) aus
- einem Testwerkzeug (Simulation, Prüfgelände oder Feldtest) und
- einem Bestehenskriterium

zusammensetzt. Wenn dieser Blickwinkel aus UAP-Bearbeitersicht nicht geteilt wird, so ist im Fragebogen zu beschreiben, aus welchen Teilen ein Testfall im Allgemeinen besteht. Bei der Beantwortung der Frage sollen die Elemente der Datentonnen\* aus der PEGASUS Gesamtmethode Verwendung finden, um die Vergleichbarkeit der Antworten zu gewährleisten.

TP4 – Ergebnisreflexion: UAP-FRAGEBOGEN für TP1-TP2-TP3; - März 2018 -

Teilprojekt: Wählen Sie Ihr Teilprojekt aus.; UAP(s): Wählen Sie ein (U)AP Element aus.  
 Ansprechpartner: Wählen Sie Ihren Namen aus.; 2ter Ansprechpartner (optional) Wählen Sie Ihren Namen aus.  
 Projektpartner/Verbundene Partner: Wählen Sie Ihren Firmennamen aus.

1. Beteiligte Partner: Ihres TPs:		FRAGENBLOCK - 01/06			
Bitte wählen Sie hier Ihr PEGASUS-Teilprojekt aus. Es sind dann die beteiligten Partner im jeweiligen PEGASUS-Teilprojekt benannt.					
2. Ihr zutreffendes UAP:			3. Darstellung Ihres UAPs mit Abhängigkeit von anderen UAPs, APs nach VHB:		
Bitte wählen Sie hier Ihr zugehöriges (U)AP aus.			Bitte wählen Sie hier Ihr UAP aus. Sie sehen die UAP Abhängigkeiten.		
4. Ihre UAP-Fragelemente:					
Bitte wählen Sie hier die Ihrem UAP zugehörigen Fragelemente aus. Es sind mehrere Fragen. Bitte beachten Sie: Ziehen Sie zur Beantwortung die Vorhabensbeschreibung hinzu und referenzieren Sie aktiv in Ihren Antworten auf Ihre UAP-Schnittstellen!					
Ihre Antwort zum Fragenblock 01/06:					
5. Geben Sie die zu Ihrem UAP gehörigen (U)AP Schnittstellen an, mit denen ein Austausch stattgefunden hat:					
1. (U)AP	2. (U)AP	3. (U)AP	4. (U)AP	5. (U)AP	6. (U)AP
6. Aus welchem UAP fehlt welche Zuarbeit für Ihre Weiterarbeit in Ihrem UAP?					
Ihre Antwort: Schildern Sie hier bitte eine mögliche Ursache aus Ihrem Blickwinkel.					
7. Wo sind die Ergebnisse der Arbeiten dokumentiert? Bitte geben Sie ebenfalls – sofern derzeit möglich – einen Link an.					
Ihr Link:					
Ihre Antwort:					

4

Sie können die Textfelder jederzeit beliebig erweitern.

Abbildung 61: Fragenblock Teil 01/06 bzgl. „Reflexion der Rückverfolgbarkeit der PEGASUS-Ergebnisse (Fokus1)“

Ein Reflexionsschwerpunkt wurde in diesem ersten Fragenteil, neben der UAP-spezifischen Frageelementen (siehe Anhang) auf die Verknüpfungen, gegenseitigen Abhängigkeiten (siehe 3. bzw. siehe Anhang) gelegt.

Zusätzlich war es Aufgabe des Fragebogens, den Austausch auf UAP-Ebene über UAP-Verknüpfungen und UAP-Grenzen zu erfassen und diesen qualitativ einzustufen.

Weiterhin sollte, im Bedarfsfall bei Fehlen einer Zuarbeit aus einem anderen UAP unter 6. ein Hinweis an TP4 erfolgen, damit TP4 gegebenenfalls klären und nachsteuern kann, siehe 5. und 6.

2.4.1.2.2. Reflexion der Durchgängigkeit der PEGASUS-Arbeiten (Fokus 2)

Zur Reflexion der Durchgängigkeit der PEGASUS-Arbeiten ist im Folgenden Tabellen mit Fragen zu den Arbeitsgrundlagen und Arbeitsergebnissen Ihres UAPs zu finden. Ziel ist es insbesondere diese den Daten/Datentonnen\* und den Arbeitsschritten\*\* (Parallelogramme) der PEGASUS Gesamtmethode zuzuordnen.

Unter UAP-Arbeitsgrundlagen werden die benötigten Arbeitsergebnisse aus anderen UAPs oder externen Quellen verstanden, die notwendig sind, um die Arbeiten den jeweiligen UAPs durchführen zu können. In der folgenden Tabelle sollen alle Arbeitsgrundlagen ein sowie für jede Arbeitsgrundlage

- entweder das UAP, das die Arbeitsgrundlage erstellt oder die externe Quelle (Ersteller),
- der Zeitpunkt zu dem die Arbeitsgrundlage von Ihrem UAP spätestens benötigt wird, und
- das von Ihnen benötigte technische Format (z.B. Word, MATLAB-Code, OpenScenario,) eingetragen werden.



Abbildung 62: \* Beispiel Datentonne und \*\* Beispiel Parallelogramm

Nr.	Kurzbeschreibung der Arbeitsgrundlage	Benötigt ab	Format	Zuordnung z. Element aus der PEGASUS Gesamtmethode	
				○ = Daten/Datentonne	◇ = Arbeitsschritte/Parallelogramm
<i>Bitte wählen Sie hier Ihr zugehöriges (U)AP aus.</i>					
#1	- Ihr Text - Geben Sie hier eine Kurzbeschreibung der Arbeitsgrundlage an.	Datum	- Ihr Text - Geben Sie bitte das benötigte techn. Format an.	Wählen Sie ein Element aus der PEGASUS Gesamtmethode aus.	

Abbildung 63: Fragenteil „Reflexion der Durchgängigkeit der PEGASUS-Arbeiten“ (Fokus 2)

Außerdem wurden die Fragebogenbearbeiter aufgefordert, in der nachfolgenden Tabelle alle Arbeitsergebnisse für ihr jeweiliges zu bearbeitendes UAP einzutragen. Ferner waren nachfolgende Kriterien zusätzlich zu notieren:

- den aktuellen Reifegrad (siehe Anhang [D]),
- einen Link (z.B. auf Teamsite, Datenbank, gitLab, ...) auf das Arbeitsergebnis mit dem aktuellen Reifegrad,
- die UAPs, die das Arbeitsergebnis verwenden werden (Empfänger UAPs),
- den Zeitpunkt zu dem es spätestens verfügbar sein wird,
- das technische Format (z.B. Word, MATLAB-Code, OpenScenario, ...) in dem es vom UAP Bearbeiter geliefert wird, und
- zu welchen Prozessschritten (s. Anhang [E]) und Zwischen/Ergebnissen der PEGASUS-Gesamtmethode es aus UAP-Bearbeiter Sicht beiträgt. Sofern diese Zuordnung nicht getroffen werden kann, ist tragen in der ganz rechten Spalte einen Begriff einzutragen, der die UAP Bearbeiter Beiträge möglichst treffend beschreibt.

In einer weiteren Befragungsstufe wurden im Fragebogen auf UAP-Ebene für jedes TP separat die essentiellen Ergebnisse der TPs eins bis drei sich ausgehend von den VHB Arbeitszielen nach Zielerreichung abgefragt. Zusätzlich konnten neue mögliche ergänzende Ergebnisse und Ziele, die während des PEGASUS Projekts entstanden sind bzw. gefordert wurden, ergänzend eingetragen werden.

TP4 – Ergebnisreflexion: UAP-FRAGEBOGEN für TP1-TP2-TP3; - März 2018 -

Teilprojekt: *Wählen Sie Ihr Teilprojekt aus.*; UAP(s): *Wählen Sie ein (U)AP Element aus.*  
 Ansprechpartner: *Wählen Sie Ihren Namen aus.*; 2ter Ansprechpartner (optional) *Wählen Sie Ihren Namen aus.*  
 Projektpartner/Verbundene Partner: *Wählen Sie Ihren Firmennamen aus.*

---

**2.3 Ergebnisreflexion aus UAP-Sicht auf TP-Ergebnis Ebene**

**2.3.1 Welche der Ergebnisse des TP 1: „Szenarienanalyse und Qualitätsmaße“ sind in Ihrem UAP umgesetzt worden?**

Die essentiellen Ergebnisse des TP 1 lassen sich ausgehend von den Arbeitszielen in Kapitel 1.3 wie folgt zusammen [VHB, Seite 84, Kapitel „4.2.1.1 Ergebnisse“] *[Zutreffendes bitte ankreuzen, ggf. Ergänzen]*

- Beschreibung des Anwendungsszenarios Autobahn-Chauffeurs in seiner Grundfunktion, basierend auf den Ergebnissen von Vorgängerprojekten sowie Erweiterung und Verfeinerung
- Ermittlung kritischer Verkehrssituationen, menschlicher Leistungsfähigkeit sowie Wirksamkeit (Unfallvermeidungspotential) innerhalb des Anwendungsszenarios Autobahn-Chauffeur
- Ermittlung des Sicherheitsniveaus des Autobahn-Chauffeurs durch eine Bewertung von Auftretenswahrscheinlichkeit und maschineller Beherrschbarkeit der kritischen Verkehrssituationen
- Herleiten eines gesellschaftlich akzeptierten Gütemaßes für automatische Fahrfunktionen
- Ableiten von Anforderungen an den Autobahn-Chauffeur aus dem gesellschaftlich akzeptierten Gütemaß
- Beschreibung einer erweiterten Grundfunktion sowie Gütemaße für hochautomatische Fahrfunktionen, z.B. auf Bundes- und Landstraßen oder im urbanen Umfeld
- *Ihr Text* - Bitte tragen Sie hier mögliche ERGÄNZENDE ERGEBNISSE und ZIELE ein.

Hier ist Raum für Ihre Hinweise, Kommentare, Anmerkungen sowie für Ergänzungen:

Sie können die Textfelder jederzeit beliebig erweitern.

Abbildung 64: Umsetzungsgrad der Ergebnisse des TP1 auf UAP-Ebene

TP4 – Ergebnisreflexion: UAP-FRAGEBOGEN für TP1-TP2-TP3; - März 2018 -

Teilprojekt: *Wählen Sie Ihr Teilprojekt aus.*; UAP(s): *Wählen Sie ein (U)AP Element aus.*  
 Ansprechpartner: *Wählen Sie Ihren Namen aus.*; 2ter Ansprechpartner (optional) *Wählen Sie Ihren Namen aus.*  
 Projektpartner/Verbundene Partner: *Wählen Sie Ihren Firmennamen aus.*

---

**2.3.2 Welche der Ergebnisse des TP 2: „Umsetzungsprozesse“ sind in Ihrem UAP umgesetzt worden?**

Die essenziellen Ergebnisse des TP 2 fassen sich ausgehend von den Arbeitszielen in Kapitel 1.3 wie folgt zusammen [VHB, Seite 130/131, Kapitel „4.3.1.1 Ergebnisse“] *[Zutreffendes bitte ankreuzen, ggf. Ergänzen]*

- Analyse des Modifikationsbedarfs vorhandener Metriken und Prozesse bei der Automobil-Serienentwicklung, besonders während der frühen Phase des V-Modells.
- Überführung der systematischen Szenario-Leitlinien in Prozessschritte unter Berücksichtigung von System-Klassifikation und Fahrzeugnutzungsstufen bei HAF-Funktionen.
- Überführung der Rahmenbedingungen zur Referenzwertdefinition in Prozessschritte
- Vorbereitung der Anforderungsdefinition für Fahrer, Labortests, Prüfgelände und Feld-absicherung
- Verfeinerung der Guidelines für notwendige Dokumentationen der Prozessschritte
- Richtlinien und Vorlagen zur Dokumentation der Einhaltung des technischen State-of-the-Art beim Entwicklungsprozess von hochautomatisierten Fahrfunktion
- *Ihr Text* - Bitte tragen Sie hier mögliche ERGÄNZENDE ERGEBNISSE und ZIELE ein.

Hier ist Raum für Ihre Hinweise, Kommentare, Anmerkungen sowie für Ergänzungen:

Sie können die Textfelder jederzeit beliebig erweitern.

Abbildung 65: Umsetzungsgrad der Ergebnisse des TP2 auf UAP-Ebene

TP4 – Ergebnisreflexion: UAP-FRAGEBOGEN für TP1-TP2-TP3; - März 2018 - 

Teilprojekt: *Wählen Sie Ihr Teilprojekt aus.*; UAP(s): *Wählen Sie ein (U)JAP Element aus.*  
 Ansprechpartner: *Wählen Sie Ihren Namen aus.*; 2ter Ansprechpartner (optional) *Wählen Sie Ihren Namen aus.*  
 Projektpartner/Verbundene Partner: *Wählen Sie Ihren Firmennamen aus.*

---

2.3.3 Welche der Ergebnisse des TP 3: „Testen“ sind in Ihrem UAP umgesetzt worden?

Die essenziellen Ergebnisse des TP 3 fassen sich ausgehend von den Arbeitszielen in Kapitel 1.3 wie folgt zusammen [VH8, Seite 146, Kapitel „4.4.1.1 Ergebnisse“] *[Zutreffendes bitte ankreuzen; ggf. Ergänzen]*

- Detaillierung und Vervollständigung der Testscenarien aus TP 1, inklusive technischer Güte- und Qualitätsmaße sowie Abnahmekriterien
- Ergänzung und Detaillierung von automatisierungsspezifischen Prüfumfängen basierend auf Inputs des TP 2
- Aufbau und Füllung der Testspezifikations-Datenbank mit Testspezifikationen für den Nachweis der hinreichend sicheren Realisierung hochautomatisierter Fahrfunktionen
- Festlegung und Überprüfung von Testmethoden, Schnittstellen, Werkzeugen im Labor, auf dem Prüfgelände und im Realverkehr
- Erstellung und Abstimmung industrieweit etablierter Modelle, Werkzeuge und Schnittstellen für die Simulation
- Zusammenstellung des Testkatalogs und Anforderungen für Labor, Prüfgelände und Feldabsicherung
- Aufbau von Referenzelementen zur praktischen Erprobung und Funktionsdemonstration
- Erprobung im Labor, Prüfgelände und auf der Straße

- Ihr Text - Bitte tragen Sie hier mögliche ERGÄNZENDE ERGEBNISSE und ZIELE ein.

Hier ist Raum für Ihre Hinweise, Kommentare, Anmerkungen sowie für Ergänzungen: - Ihr Text -

Sie können die Textfelder jederzeit beliebig erweitern.

14

Abbildung 66: Umsetzungsgrad der Ergebnisse des TP3 auf UAP-Ebene

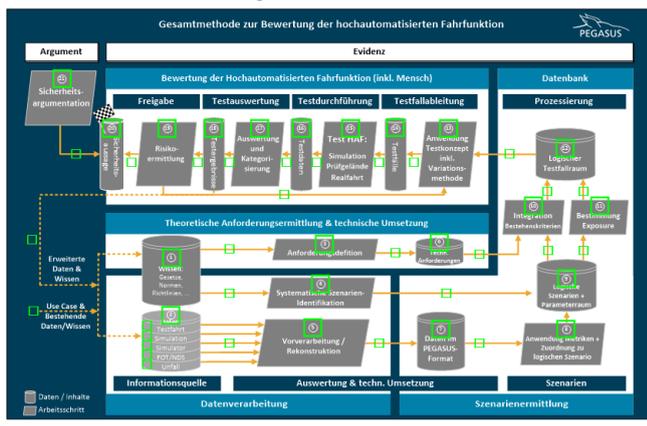
Im letzten Teil des Fragebogens sind die Bearbeiter aufgefordert unter Berücksichtigung ihres aktuellen UAP-Arbeitsstands diejenigen grünen Felder per Klick zu aktivieren, die durch das zu bearbeitende UAP auch tatsächlich abgedeckt wird. Überdies waren Kommentare erwünscht, die die Bearbeiter als Hinweise noch ergänzen können. Ziel in diesem Teil des Fragebogens ist es, auf UAP-Ebene das sich zum Zeitpunkt des Umlaufs des Fragebogens ergebende Gesamtbild aus allen Rückmeldungen auf UAP-Ebene.

TP4 – Ergebnisreflexion: UAP-FRAGEBOGEN für TP1-TP2-TP3; - März 2018 - 

Teilprojekt: *Wählen Sie Ihr Teilprojekt aus.*; UAP(s): *Wählen Sie ein (U)JAP Element aus.*  
 Ansprechpartner: *Wählen Sie Ihren Namen aus.*; 2ter Ansprechpartner (optional) *Wählen Sie Ihren Namen aus.*  
 Projektpartner/Verbundene Partner: *Wählen Sie Ihren Firmennamen aus.*

---

3.2 PEGASUS Gesamtmethode zur Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion



Bitte aktivieren Sie durch einmaliges Klicken diejenigen grünen Kontrollkästchen, die Ihr UAP unter Berücksichtigung Ihres aktuellen Arbeitsstands berücksichtigt. Gerne mit kurzen Hinweisen oder Kommentaren.

16

Abbildung 67: Visualisierung Umsetzungsgrad der Teil-(UAP)-Ergebnisse

2.4.1.2.3. Aktivierung vom Fragebogen und zeitliche Rückmeldungen aus den TPs

Vor Aktivierung der Fragebogenaktivitäten wurde dieser Bosch-Intern - zwecks Testdurchlauf - von einem Bosch PEGASUS-Projekt Mitarbeiter testweise ausgefüllt sowie sein Feedback samt Verbesserungsvorschlägen eingeholt. Die Verbesserungsvorschläge wurden im TP4-

Kreis erörtert und sind in den Fragebogen eingeflossen. Am 07. März 2018 wurde der Fragebogen an die TP-Leiter versendet, mit der Bitte, diesen zur Bearbeitung auf UAP-Leiter Ebene zu verteilen. Als Bearbeitungszeitraum wurden 4 Wochen angesetzt mit der Bitte die Fragebögen ausgefüllt bis zum 04.04.2018 auf der Teamsite zu hinterlegen. Zusätzlich zur formulierten Anleitung, Erläuterungen zum Ausfüllen des Fragebogens, vgl. Abbildung 2.1.1.1.1.3-02, wurde der Fragebogen in den Telekons TP1 und TP2 zeitverschieben inhaltlich nochmals vorgestellt.

PEGASUS	TP1	TP2	TP3	GESAMT
Gesamtanzahl UAPs	13	6	13	32
erfolgte RM	7	6	3	16
prozentuale RM	54%	100%	23%	50%

*Tabelle 36: Rücklaufquote der Fragebogen E11/2018*

In Tabelle 36 ist eine Auswertung der Rücklaufquote (Stand 27.11.18) dargestellt.

#### 2.4.1.2.4. Fragebogen Rückmeldungen aus den TPs

Die Rückmeldungen vom TP1 umfassten: UAP1.1.1, UAP1.1.2, UAP1.2.1 bis UAP1.2.5. Teilweise waren - nach Aussage TP1 - zu den fehlenden Fragebögen bzw. den restlichen UAP's sind noch keine Aussage möglich bzw. diese UAPs noch nicht gestartet. Die Rückmeldungen vom TP2 in 05/18 umfassten alle gefragten UAPs. Aufgrund der TP3-Projektsituation sind vom TP3 nachfolgende Rückmeldungen erst Ende 11/18 zu UAP3.3.1 bis UAP3.3.3 sowie zum AP3.2 erfolgt. Die Fragebögen wurden nach Möglichkeit weitestgehend befüllt. Einzelne Bereiche wurden leider nicht konstant ausgefüllt oder nicht kommentiert, sodass sich dadurch nur bedingt Aussagen ableiten lassen.

#### 2.4.1.2.5. Auswertungssystematik der ausgefüllten Fragebögen

Die Auswertesystematik beginnt mit einem ersten Sichten der Rückmeldungen, Sammeln von Aspekten, Ordnen, Gliedern sowie Visualisieren der Rückmeldungen. Hierbei wird analog der Fragebogenstruktur gefolgt. Im TP4-Kreis wurden diese diskutiert und in der zentralen Ergebnisreflexion dokumentiert.

In der zentralen Ergebnisreflexion wurde ein Excel-Dokument aufgesetzt, vergleiche hierzu Kapitel „2.1.1.1.1.9 Nachverfolgung der zentralen Ergebnisreflexion“. Alle identifizierten Fragestellungen wurden in der zentralen Ergebnisreflexion unter einer ID erfasst, ein Nachverfolgungsprozess im TP4 definiert und an die im TP4 erarbeiteten Personen im PEGASUS-Projekt adressiert.

Nachfolgend sind die Rückmeldungen summarisch anhand der formulierten VHB-Arbeitsziele in für jedes TP in einer Übersicht (= Fragebogenansicht) dargestellt, um zu identifizieren, welche Ziele bereits zum Zeitpunkt der Befüllung des Fragebogens erfüllt wurden und welche

noch nicht. Zudem gab es die Möglichkeit, in diesem Rahmen der Projektentwicklung neu identifizierte Aspekte bzw. Ziele zu formulieren. Auch diese wurden mit der zentralen Ergebnisreflexion erfasst und ins PEGASUS Projekt kommuniziert.

### PEGASUS interne Ergebnisreflexion UAP- Fragebogen

#### 2.1.2 Ergebnisreflexion aus UAP-Sicht auf TP-Ergebnis Ebene gemäß VHB

2.1.2.1 Welche der Ergebnisse des TP 1: „Szenarienanalyse und Qualitätsmaße“ sind in Ihrem UAP umgesetzt worden?  
Die essenziellen Ergebnisse des TP 1 setzen sich - ausgehend von den Arbeitszielen in Kapitel 1.3 - wie folgt zusammen [VHB, Seite 84, Kapitel „4.2.1.1 Ergebnisse“] [Zutreffendes bitte ankreuzen; ggf. ergänzen]

- Beschreibung des Anwendungsszenarios Autobahn-Chauffeurs in seiner Grundfunktion, basierend auf den Ergebnissen von Vorgängerprojekten sowie Erweiterung und Verfeinerung
- Ermittlung kritischer Verkehrssituationen, menschlicher Leistungsfähigkeit sowie Wirksamkeit (Unfallvermeidungspotential) innerhalb des Anwendungsszenarios Autobahn-Chauffeur
- Ermittlung des Sicherheitsniveaus des Autobahn-Chauffeurs durch eine Bewertung von Auftretenswahrscheinlichkeit und maschineller Beherrschbarkeit der kritischen Verkehrssituationen
- Bereitstellung der Information zur Ermittlung des Sicherheitsniveaus des Autobahn-Chauffeurs durch eine Bewertung von Auftretenswahrscheinlichkeit und maschineller Beherrschbarkeit und Wirksamkeit der kritischen Verkehrssituationen (Änderung aus UAP 1.2.2)**
- Herleiten eines gesellschaftlich akzeptierten Gütemaßes für automatische Fahrfunktionen
- Ableiten von Anforderungen an den Autobahn-Chauffeur aus dem gesellschaftlich akzeptierten Gütemaß
- Beschreibung einer erweiterten Grundfunktion sowie Gütemaße für hochautomatische Fahrfunktionen, z.B. auf Bundes- und Landstraßen oder im urbanen Umfeld
- NEU aus UAP 1.1.2: „Definition der logischen Szenarien auf Layer 4 inkl. Parametrierung“ und weiterhin NEU**

Hier ist Raum für Ihre Hinweise, Kommentare, Anmerkungen sowie für Ergänzungen:

Aus UAP 1.2.2: Methodik zur Identifikation von Automationsrisiken  
Aus UAP 1.2.5: Die SIVD wird als gesellschaftlich zu akzeptierende Quelle herangezogen um hieraus funktionale Anforderungen abzuleiten. Templates zur Kurzbeschreibung und Quantifizierung der einzelnen Prozessschritte die relevant zur Sicherheitsaussage beitragen zielt auf die gesellschaftliche Akzeptierbarkeit des Vorgehens zur Erzielung einer Sicherheitsaussage.

## TP1

4 Chassis Systems Control | CC-42EYF7 | 2018-09-24  
© Robert Bosch GmbH 2018. All rights reserved, also regarding any disposal, reproduction, selling, distribution, as well as in the event of applications for industrial property rights.

Abbildung 68: Summarische UAP-Rückmeldung der VHB-Arbeitsziele des TP1

### PEGASUS interne Ergebnisreflexion UAP- Fragebogen

#### 2.1.2 Ergebnisreflexion aus UAP-Sicht auf TP-Ergebnis Ebene gemäß VHB

2.1.2.2 Welche der Ergebnisse des TP 2: „Umsetzungsprozess“ sind in Ihrem UAP umgesetzt worden?  
Die essenziellen Ergebnisse des TP 2 setzen sich - ausgehend von den Arbeitszielen in Kapitel 1.3 - wie folgt zusammen [VHB, Seite 130/131, Kapitel „4.3.1.1 Ergebnisse“] [Zutreffendes bitte ankreuzen; ggf. ergänzen]

- Analyse des Modifikationsbedarfs vorhandener Metriken und Prozesse bei der Automobil-Serienentwicklung, besonders während der frühen Phase des V-Modells.
- Überführung der systematischen Szenario-Leitlinien in Prozessschritte unter Berücksichtigung von System-Klassifikation und Fahrzeugnutzungsstufen bei HAF-Funktionen.
- Überführung der Rahmenbedingungen zur Referenzwertdefinition in Prozessschritte**
- Vorbereitung der Anforderungsdefinition für Fahrer, Labortests, Prüfgelände und Feld-absicherung.
- Verfeinerung der Guidelines für notwendige Dokumentationen der Prozessschritte
- Richtlinien und Vorlagen zur Dokumentation der Einhaltung des technischen State-of-the-Art beim Entwicklungsprozess von hochautomatisierten Fahrfunktion
- NEU aus UAP 2.2.3: Ableitung von Limitationen der gegenwärtigen Prozessmethodik und NEU**

Hier ist Raum für Ihre Hinweise, Kommentare, Anmerkungen sowie für Ergänzungen:

Aus UAP 2.2.1: Die Analysen des TP2.1 und die Untersuchungen des UAP 2.2.3 wurde in ersten Empfehlungen zur Erweiterung der systematischen Entwicklungsprozesse (i.o.a. aufbauend auf ISO 26262 und SOTIF, sowie nordamerikanischen Veröffentlichungen) eingebaut.  
Aus UAP 2.2.3: Anforderungsdefinition an neue Ansätze, die den Szenario-basierte Ansatz ersetzen oder ergänzen. Recherche und Bewertung existierender Dekompositionskonzepte in der Literatur und bei beteiligten OEMs, Entwicklung und Beschreibung der Dekompositionsmethode für den Autobahn-Chauffeur. Aufheben des Potentials für die Reduzierung des Fragebegriffs für den Autobahn-Chauffeur.  
Aus UAP 2.2.4: Die Aktivitäten fanden in sehr enger Abstimmung mit UAP 2.2.2 sowie UAP 2.2.3 statt und beruhen stark auf den Analysen des UAP 2.2.1. Schrittweise zum TP1 wurden insbesondere über Personal-Union mit der Arbeitsgruppe Automationsrisiken im TP1 bearbeitet.

## TP2

6 Chassis Systems Control | CC-42EYF7 | 2018-09-24  
© Robert Bosch GmbH 2018. All rights reserved, also regarding any disposal, reproduction, selling, distribution, as well as in the event of applications for industrial property rights.

Abbildung 69: Summarische UAP-Rückmeldung der VHB-Arbeitsziele des TP2

### PEGASUS interne Ergebnisreflexion UAP- Fragebogen

#### 2.1.2 Ergebnisreflexion aus UAP-Sicht auf TP-Ergebnis Ebene gemäß VHB

2.1.2.3 Welche der Ergebnisse des TP 3: „Testen“ sind in Ihrem UAP umgesetzt worden?  
Die essenziellen Ergebnisse des TP 3 setzen sich - ausgehend von den Arbeitszielen in Kapitel 1.3 - wie folgt zusammen [VHB, Seite 146, Kapitel „4.4.1.1 Ergebnisse“] [Zutreffendes bitte ankreuzen; ggf. ergänzen]

- Detaillierung und Vervollständigung der Testscenarien aus TP 1, inklusive technischer Güte- und Qualitätsmaße sowie Abnahmekriterien**
- Ergänzung und Detaillierung von automatisierungsspezifischen Prüfmängeln basierend auf Inputs des TP 2
- Aufbau und Füllung der Testspezifikations-Datenbank mit Testspezifikationen für den Nachweis der hinreichend sicheren Realisierung hochautomatisierter Fahrfunktionen
- Festlegung und Überprüfung von Testmethoden, Schnittstellen, Werkzeugen im Labor, auf dem Prüfgelände und im Realverkehr
- Erstellung und Abstimmung industrieweit etablierter Modelle, Werkzeuge und Schnittstellen für die Simulation
- Zusammenstellung des Testkatalogs und Anforderungen für Labor, Prüfgelände und Feldabsicherung
- Aufbau von Referenzelementen zur praktischen Erprobung und Funktionsdemonstration
- Erprobung im Labor, Prüfgelände und auf der Straße
- Ihr Text - bitte tragen Sie hier mögliche ERGÄNZENDE ERGEBNISSE und ZIELE ein.

Hier ist Raum für Ihre Hinweise, Kommentare, Anmerkungen sowie für Ergänzungen:

- Ihr Text -

## TP3

8 Chassis Systems Control | CC-42EYF7 | 2018-09-24  
© Robert Bosch GmbH 2018. All rights reserved, also regarding any disposal, reproduction, selling, distribution, as well as in the event of applications for industrial property rights.

Abbildung 70: Summarische UAP-Rückmeldung der VHB-Arbeitsziele des TP3

Neben der Abfrage zum Zielerreichungsgrad auf UAP-Ebene wurde ebenfalls im Fragebogen reflektiert, wo sich das jeweilige UAP in der Gesamtmethode wiederfindet.

Die nachfolgende Abbildung 71 stellt zusammenfassend – basierend auf den erfolgten Rückmeldungen – den Abdeckungsgrad der bearbeiteten UAPs in der Gesamtmethode dar. Leider ist diese Darstellung nur bedingt aussagefähig, da nicht alle UAPs die Fragebögen ans TP4 zurückgemeldet haben und auch ein Teil der Rückmeldungen diesen Bereich des Fragebogens nicht ausgefüllt hatte.

Die aus TP4-Sicht wichtigen Verbindungselemente (= gelbe Pfeile) zwischen den Elementen der Gesamtmethode wurden in nahezu allen Rückmeldungen leider nicht selektiert.

Der ursprüngliche Ansatz, den Fragebogen in mehreren iterativen Durchläufen im PEGASUS Projekt zu etablieren ließ sich in der fortgeschrittenen Zeitschiene und den verzögerten Rückmeldungen aus den UAPs nicht umsetzen.

Die Fragebogenstruktur mit WORD-Ausgangsbasis und PDF-Format in der Ablage hätte dies sehr effizient ermöglicht.

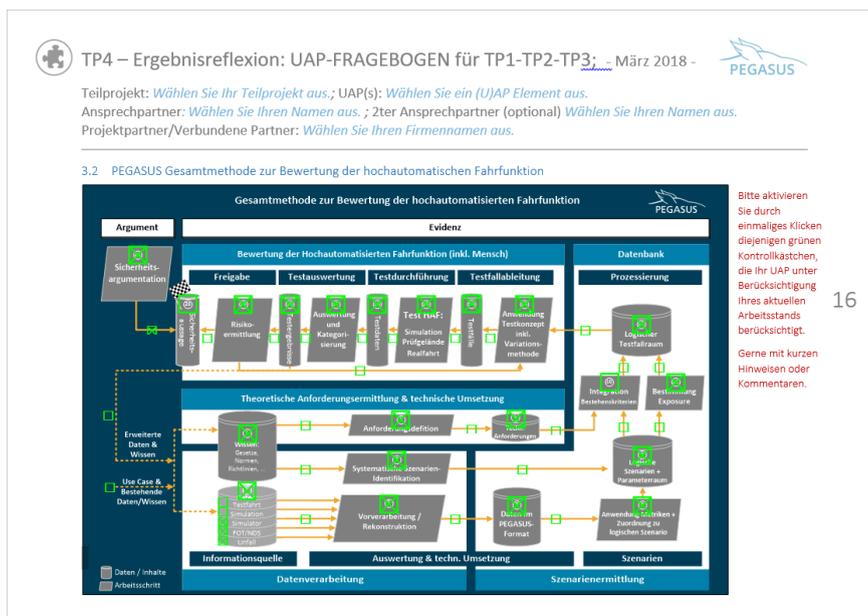


Abbildung 71: Sum. UAP-Rückmeldung in der PEGASUS-Gesamtmethode

#### 2.4.1.2.6. Nachverfolgung der zentralen Ergebnisreflexion

Zur zentralen Nachverfolgung der Ergebnisreflexion aller Rückmeldungen wurde im TP4 ein zentrales Dokument in Form einer Excel Files unter Beteiligung von Bosch erstellt.

Diese Exceltabelle dient zur zentralen Nachverfolgung der Ergebnisreflexion in TP4. Dabei ist wichtig, dass alle Fragen an PEGASUS für das gesamte PEGASUS-Projekt und alle Mitarbeiter zugänglich sind. Ziel ist es, mit der Reflexion der Ergebnisse das gemeinsame Ziel einer einheitlichen Position in Bezug auf die PEGASUS Fragen zu unterstützen. Jeder PEGASUS Mitarbeiter hat die Möglichkeit, direkt Anmerkungen zu den Fragen anzufügen und bei Unklarheiten das TP4 zu kontaktieren. Der Fokus liegt auf Antworten auf die gestellten Fragen. Für

die Nachverfolgung werden aus den verschiedenen Aktivitäten in TP4 die Rückmeldungen in den verschiedenen nachfolgenden Reitern dieser Tabelle erfasst und inhaltlich nachverfolgt:

- R1\_PEGASUS-intern-UAP
- R2\_PEGASUS-intern-TPL
- R3\_Unternehmensintern-P.-Part
- R4\_Dritte
- R5\_Robustheit

Für die Nachverfolgung wurden die Rückmeldungen entweder direkt übernommen oder als zu beantwortende Fragen formuliert. Zu jeder in diesem File dokumentierten Frage wurden Aktionen und Antworten sowie deren Treiber und Ursprung notiert.

Das Vorgehen der Nachverfolgung verfolgte folgendem Prozess:

Zunächst wurde jede Rückmeldung auf die Ergebnisreflexionsaktivitäten in TP4 in Excel-Tabelle als Frage innerhalb des entsprechenden Reiters erfasst. Der Erfasser einer Frage übernahm zugleich die Rolle des Kümmerers → Eintragung in Tabelle. Der Kümmerer stellte die neuen Fragen in der TP4 Telko vor um Überdeckungen mit anderen Fragen zu identifizieren (wenn vorhanden aufeinander verweisen) zu können und der Adressat einer Frage wurde gemeinsam in der TP4 Telko definiert. Der Kümmerer stimmte eine Aktion in der TP4 Telko ab. Folgende Aktionen waren möglich

- A. Der Adressat wurde auf die Frage hingewiesen und um eine Antwort in der Tabelle gebeten.
- B. Die TP Leiterrunde wurde um die Definition eines Adressaten gebeten.
- C. Bei Infos für alle wurde das Thema in den PEGASUS-Newsletter aufgenommen, der entweder direkt oder gesammelt z.B. am Ende eines Quartals verteilt wurde.
- D. Die Frage wurde direkt aus dem TP4 Kreis beantwortet und geschlossen

Der Kümmerer erkundigte sich monatlich bei dem Adressaten nach einem Update, außer ein anderes Wiedervorlagdatum wurde eingetragen. In den wöchentlichen TP4-Telkos wurden diejenigen Punkte besprochen, die entweder eine Änderung erfahren haben oder eine Wiedervorlage zu dem entsprechenden Datum besitzen. Wurde eine Frage beantwortet, wurde die Frage inkl. der Antwort in den PEGASUS-Newsletter mit aufgenommen und allen zur Kenntnis verteilt. Die Excel-Tabelle wurde auf dem PEGASUS-Sharepoint zentral abgelegt.

#### **2.4.1.3 Ergebnisreflexion – PEGASUS Newsletter**

Das TP4 hat unterschiedliche Aktivitäten zur Ergebnisreflexion betrieben. Dabei wurden PEGASUS-intern sowie Unternehmens-intern und Dritten die Zwischenergebnisse vorgestellt.

Die Teilnehmer dieser Ergebnisreflexionen stellten Fragen und hatten Anmerkungen zu den verschiedensten Themen, die in PEGASUS bearbeitet wurden. Da das Ziel von PEGASUS generell akzeptierte Ergebnisse sind, hat das TP4 diese Rückmeldungen an die verschiedenen Partner zurückgespielt. Anmerkungen, die für das Erreichen der PEGASUS Ziele wichtig waren, wurden dabei vom TP4 nachverfolgt.

„Generell akzeptierte“ Ergebnisse waren das Ziel. Dafür wurden von jedem Partner konstruktive und lebhaft Diskussionsbeiträge benötigt. Die Partner sollten explizit diejenigen über den projektinternen NEWSLETTER informieren, die Fragen in die Ergebnisreflexion eingebracht

hatten. Die über das Projekt hinweg konstante Struktur des PEGASUS Newsletters untergliederte sich in die nachfolgende Struktur (Abbildung 72):

**INHALTSVERZEICHNIS**

- I. PEGASUS TP4 - ZENTRALE ERGEBNISREFLEXION
- II. TP4-Ergebnisreflexion: Fragen & Diskussion
- III. PEGASUS-Gesamtmethode-VERSIONIERUNG/ÄNDERUNGEN
- IV. UAP 4.1.1 - PEGASUS interne Reflexion.
- V. UAP 4.1.2 - Unternehmensinterne Reflexion.
- VI. UAP 4.1.3 - Reflexion mit Dritten.
- VII. UAP 4.1.4 - Reflexion der Robustheit der Ergebnisse.

Abbildung 72: Inhaltliche Struktur des PEGASUS-Newsletters

In Kapitel I wurde die Ergebnisreflexion inklusive der Vorgehensweise kurz erläutert. Farblich hervorgehoben und ein direkter Link zum zentralen Ergebnisreflexionsdokument, auch um jedem PEGASUS Mitarbeiter explizit den Zugang zu den gesammelten Themen und die Möglichkeit zu geben, aktiv in die Diskussion einzusteigen. Weiterhin wurde, um eine aktive Diskussion zu befeuern, unmittelbar in Kapitel II des Newsletters begonnen, mit 4 direkten Fragestellungen und als direkte Diskussionsbasis möglichen Antwortansätze auf jede Frage die Diskussion gestartet werden.

The image displays three pages from the PEGASUS newsletter. The first page (left) contains the 'INHALTSVERZEICHNIS' (Table of Contents) with sections I through VII. The second page (middle) features a detailed flowchart titled 'PEGASUS Gesamtmethode zur Bewertung der hochautomatisierten Fahrfunktion' and includes text about the current version V2.0 and the internal reflection process. The third page (right) details the 'UAP 4.1.3 Reflexion mit Dritten' section, discussing the involvement of external stakeholders like KBA, BMW, and DLR.

Abbildung 73: Beispiel: PEGASUS-Newsletter Release 01, Q3 2018

Im zweiten Inhaltspunkt des Newsletters wurden Änderungen in der Darstellung der PEGASUS-Gesamtmethode ins Projekt kommuniziert. Ausgehend von den fachlich inhaltlichen Arbeiten in den Teilprojekten kommt es in regelmäßigen Abständen zu kleineren Anpassungen an der Darstellung der PEGASUS-Gesamtmethode. Änderungsvorschläge können von allen Partnern durch die Teilprojektleiter oder das Projektbüro angeregt werden. Die aktuellste Version war dabei stets auf Deutsch und Englisch auf der PEGASUS TeamSite zu finden.

## 2.4.2 Unternehmensinterne Reflexion (UAP4.2.2)

### 2.4.2.1 Unternehmensinterne Reflexion zur Hälfte des Projektes

Bosch hat auf Basis der dokumentierten Ergebnisse eine unternehmensinterne Ergebnisreflexion (UAP 4.1.2) durchgeführt, und hat dabei die vorliegenden Einbettungselemente auf technische Umsetzbarkeit und Akzeptanz geprüft.

Das Feedback wurde intern in mehreren Workshops gesammelt und besprochen. Daraus erwachsene Rückfragen zu PEGASUS Ergebnissen wurden mit den zuständigen PEGASUS-Bearbeitern geklärt.

Basierend auf dem damaligen Arbeitsstand wurden sich ergebende Fragestellungen ausgearbeitet und anhand der nachfolgenden Folien in das PEGASUS-Projekt zurückgespiegelt und im Rahmen der zentralen Ergebnisreflexion in der Nachverfolgungsliste registriert und zur Beantwortung weiterverfolgt.

## PEGASUS – BOSCH Unternehmensinterne Reflexion – Seite 1/2

### Resultierende Fragestellungen in der TP4-Ergebnis-Reflexion

#### 1. PEGASUS Zielsetzung hinsichtlich „Freigabe“ / Abnahmetests (Verifikation) / Typgenehmigung

→ Ist aus Sicht von PEGASUS die PEGASUS-Methodik notwendig oder hinreichend für eine Freigabe? Die Formulierung „Freigabe“ kann größere Umfänge als mit den in der PEGASUS Gesamtmethode formulierten Ansätzen beinhalten und ist daher aus BOSCH-Sicht zu konkretisieren.

#### 2. Im Forschungsprojekt PEGASUS findet eine Referenzierung auf Unfallzahlen / Statistiken statt. Die PEGASUS Argumentation eines akzeptierten Risikos ist für BOSCH nicht schlüssig.

→ Aus BOSCH-Sicht steht die genannte Argumentation im Widerspruch zum erforderlichen Sicherheitsmaß. Eine Unterscheidung zwischen Eigen- und Fremdverschulden wird in PEGASUS nicht abgebildet, wäre aber zu erwägen.

#### 3. Wo finden sich Themen wie SOTIF und „Insufficiency / fault injection“ im PEGASUS-(Test-)Prozess wieder?

→ Das Szenario wird variiert. Wie definieren sich jedoch die „interessanten“ Fälle mit Abweichung vom Systemverhalten? Nicht zwingend muss dies ein Corner Case (z.B. Einschoner bei tiefstehender Sonne) sein.

#### 4. Wie wird die menschliche Leistungsfähigkeit greifbar? Welche Reaktionsfähigkeit wird zugrunde gelegt? Wo wird der Aspekt des vorrausschauenden Fahrens berücksichtigt?

→ Wie wird die Ausgangsbasis definiert? Welches Fahrermodell wird zu Grunde gelegt?

1

Chassis Systems Control | CC-AD/EYF5 | 30.05.2018

© Robert Bosch GmbH 2018. Alle Rechte vorbehalten, auch bzgl. jeder Verfügung, Verwertung, Reproduktion, Bearbeitung, Weitergabe sowie für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen.



Abbildung 74: PEGASUS - Bosch Unternehmensinterne Reflexion – Teil 1

## PEGASUS – BOSCH Unternehmensinterne Reflexion – Seite 2/2

### Resultierende Fragestellungen in der TP4-Ergebnis-Reflexion

#### 5. Detektion „Insufficiencies“ ⇔ Vollständigkeit ⇔ Nachweis aller Versagenskriterien

→ Wie werden unbekannte „Insufficiencies“ entdeckt? Wie wird diesbezüglich Vollständigkeit definiert bzw. erreicht? Wie wird der Nachweis aller Versagenskriterien erbracht? Stichwort „Lernende Methodik“. Der finale Sicherheitsnachweis kann nur für die davor getroffenen Datensätze getroffen werden, Vergleich „Open Kontextproblem“. Wie fließen verbleibende, mögliche, unbekannte Insufficiencies, die sich zwangsweise aus endlicher Suchtiefe ergeben, in das sog. Sicherheitsmaß ein? Bildet die Regelschleife der Gesamtmethode die vollständig ab? Siehe zeichnerischer Vorschlag in Gesamtmethode.

#### 6. Nachweis der Entsprechung Simulation und Realfahrt

→ Wie erfolgt der Nachweis, dass Simulation und Realfahrt korrelieren? Wie sichert bzw. wie bildet das die PEGASUS-Gesamtmethode ab? Welche Referenzmethodiken finden hier Anwendung?

#### 7. Ab welchem Teststand ist eine ausreichende Testtiefe vorhanden (Simulation / Realfahrt / Feldtests / Teststrecke)?

→ Wie bildet PEGASUS eine ausreichende Testtiefe ab bzw. welche PEGASUS Kriterien beschreiben eine ausreichende Testtiefe?

#### 8. Welcher Fokus wird bei den Feldtests gesetzt ?

→ Wie, wo und in welchem Umfang werden Feldtests gefahren? Welche Randbedingungen werden berücksichtigt bzw. herangezogen? Wie bildet das PEGASUS ab? Was ist ausreichend als Nachweis?

#### 9. PEGASUS Gesamtmethode beschreibt ein Art „Regelschleife“ ausgehend von den „Testergebnissen“ und der „Risikoermittlung“.

→ Genauere Definition (PASS/FAIL) wird benötigt. Aus BOSCH Sicht ist die aktuelle Beschreibung unklar. Wie sind Iterationen bzw. Rekursionen beschrieben, wenn der Testumfang nicht ausreichend ist?

2

Chassis Systems Control | CC-AD/EYF5 | 30.05.2018

© Robert Bosch GmbH 2018. Alle Rechte vorbehalten, auch bzgl. jeder Verfügung, Vervielfältigung, Reproduktion, Bearbeitung, Weitergabe sowie für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen.



Abbildung 75: PEGASUS - Bosch Unternehmensinterne Reflexion – Teil 2

### 2.4.2.2 Unternehmensinterne Reflexion zum Projektabschluss

Hierfür wurden diverse Experten aus zentralen & seriennahen Bereichen sowie aus der Konzernforschung eingebunden. In mehreren Bosch-internen Workshops wurde PEGASUS vorgestellt und die PEGASUS-Gesamtmethode ausführlich diskutiert. Einige Aspekte der PEGASUS-Methodik wurden ausführlicher vorgestellt. Einige dieser Experten besuchten auch das Abschlussevent um sich einen direkten Eindruck zu verschaffen und direkt Fragen zu stellen.

Einige Auftretende Unklarheiten wurden durch direkte Rückfrage über den in der zur Verfügung gestellten Tabelle ausgewiesenen Bearbeiter geklärt. Nach diversen Diskussionen und Feedbackrunden wurde ein ausführliches Feedback erstellt, das neben der reinen Bewertung der PEGASUS Einbettungselemente auch detaillierte Kommentare enthielt. Diese wurden in derselben Tabelle auf einem separaten Arbeitsblatt aufgenommen. In der Hauptbewertungstabelle wurden die jeweiligen Kommentare durch Kürzel ausgewiesen (z.B.: RB09), siehe dazu auch die folgenden beiden Tabellen.

AP	Name des Einbettungselementes	Technische Einsetzbarkeit	Kommentar	Akzeptanz	Kommentar
<b>Datenbank</b>					
AP3.1	Datenpool Szenariendatenbank (ggf. nach PEGASUS fortgeschriebener Inhalt der Szenariodatenbank)	eine Bewertung konnte nicht stattfinden (Kommentar notwendig)	RB20	ist ein sinnvoller Ansatz mit Anpassungen (Kommentar notwendig)	RB09, RB20, RB21

Tabelle 37: Auszug aus der Abschlussreflexion der PEGASUS Einbettungselemente (BOSCH)

RB08	DB & Gesamt- methode	Für den Einsatz der Datenbank sind die Fragen wichtig: Wann sind genug Daten in der Datenbank um sagen zu können, dass genug seltene Ereignisse erfasst sein müssten bzw. die Statistik ausreichend repräsentativ ist? Ferner sind neben der Menge die Anforderungen an die Daten unklar (10 Mio. km die A81 rauf und runter auch ok?). Erst durch Klärung beider Punkte wäre die DB für eine Freigabeargumentation nutzbar. Außerdem ist ferner zu klären, ob die Ergebnisse repräsentativ gegen über der realen Welt (heute) sind. Die Übertragbarkeit auf ein HAD System ist eher fragwürdig, da z.B. durch einhalten des Sicherheitsabstandes höhere Exposures bei z.B. Einscherern zu erwarten wären.
RB09	DB & Gesamt- methode	Nutzung der Datenbank: Extraktion von min / max. Werten pro Parameter, da so auch nicht existierende Parameterkombinationen mitgenommen werden, in denen das System (Randbereiche) möglicherweise schlecht performt. Besser wäre es, die Einhüllende des Parameterhyperraums direkt in der Parametervariation zu verwenden.

*Tabelle 38: Auszug aus den detaillierten Bosch-Kommentaren zur Abschlussreflektion der Einbettungselemente*

### 2.4.3 Reflexion mit Dritten (UAP 4.1.3)

Zur Reflexion mit Dritten (UAP 4.1.3) wurde aus dem TP4 heraus unter dem Lead von Bosch Kontakt zu den Vertretern der deutschen Behörden BMVI, KBA (teilweise), BAST aufgenommen und neben Telefonterminen auch zwei Präsenz-Termine organisiert und durchgeführt.

- Termin 1: in Braunschweig bei der DLR am 25.04.2018  
(plus Telefontermin mit BMVI am 26.04.18)
- Termin 2: in Berlin bei der DLR am 22.01.2019

Die PEGASUS-Methode wurde den Vertretern der deutschen Behörden BMVI, KBA (teilweise), BAST vorgestellt, projektbegleitend wurden mit diesen Behörden in den Terminen tiefer in technische Ebenen zu den Themen "Datenbank" & "PEGASUSTools" eingetaucht.

Eine "Eins-zu-eins-Übertragung" der PEGASUS-Module in die Bauartzulassung ist nicht direkt möglich. Die Bauartzulassung ist ein zentraler Punkt für die vertiefte Prüfung. Ein Vergleich der PEGASUS-Aktivitäten mit den Vorschlägen von OICA zeigt, dass die PEGASUS-Aktivitäten nicht direkt in die Bauartzulassung übernommen werden können: Die Grundlage beider Ansätze (PEGASUS und OICA) ist, dass sich Randfälle aus typischen Fahrscenarien entwickeln. Der Nachweis der typischen Fahrscenarien muss auch durch die Simulation und die geplanten realen Fahrversuche dargestellt werden. Dabei muss aber auch die Abwägung zwischen Sicherheit (um die Zulassung zu erhalten), Funktion und Kundenakzeptanz berücksichtigt werden. Die Balance zwischen den drei Säulen kann die Umstellungszeit beeinflussen.

- ① Real Weltweite Testfahrt [im Sinne einer Inspektionsfahrt im realen Verkehr]
- ② physikalische Zertifizierungstests
- ③ Audit / Bewertung / Simulation

Darüber hinaus wird eine horizontale Prüfung in Kombination mit vertikalen Komponenten betrachtet.

Inhaltliche Interpretationsfragen wurden diskutiert, u.a. wurde von PEGASUS-Seite die Diskussion über eine mögliche Digitalisierung bestehender Gesetze & Verordnungen (StVO) sowie weitere notwendige Anpassungen (z.B. Sicherheitsabstand für automatisierte Fahrsysteme) begonnen und die Auswirkungen und Akzeptanz eines möglichen Mischverkehrs untersucht.

Im Zusammenhang mit der Notwendigkeit der Harmonisierung und Standardisierung wurden die aktuellen Aktivitäten zu ASAM e.V. (Verwendung des OpenDRIVE®- bzw. OpenSCENARIO®-Formats zur Beschreibung der Szenarien) und ISO diskutiert.

Im Rahmen der Internationalisierung der Datenbank sollen die Szenarien auch international im OpenDRIVE®/OpenSCENARIO®-Format beschrieben, zusammengeführt, ausgetauscht und in der Perspektive einer internationalen Datenbank verglichen werden können.

Darüber hinaus wird die Rolle der PEGASUS-Datenbank nach dem Ende des PEGASUS-Projekts diskutiert. Eine Fortsetzung im Folgeprojekt V&V-Methoden ist derzeit denkbar. Ein weiterer Termin mit dem BMVI, BAST nach dem Projektende von PEGASUS ist geplant.

#### **2.4.4 Abweichungen zur ursprünglichen BOSCH-spezifischen Aufgabenstellung in TP 4**

Es ergaben sich keinen wichtigen Abweichungen. Der Aufwand für die interne Ergebnisreflexion (Bewertung und Prüfung der Anwendbarkeit) war jedoch spürbar höher als in den ursprünglichen VHB veranschlagt, da diverse Experten eingebunden werden mussten.

### **3 Ergänzende Informationen zum Projekt**

#### **3.1 Zahlenmäßiger Nachweis**

Die nachfolgend aufgeführten Positionen stellen die wichtigsten unmittelbaren Vorhabenkosten laut zahlenmäßigem Nachweises der Robert Bosch GmbH dar:

- Der größte Posten waren die Personalkosten für die Bearbeitung der Aufgaben in den vier Arbeitspaketen von PEGASUS.
- Der zweitgrößte Posten waren FE-Fremdleistungen, genutzt für Unteraufträge (siehe auch Kapitel 2.2.3).
- Die ursprünglich veranschlagten Abschreibungen vorhabenspezifischer Anlagen wurden nicht ausgeschöpft, da die Kosten zum Teil nicht angefallen sind, da Daten von bestehenden Fahrzeugen genutzt wurden.
- Schließlich sind Reisekosten zur Ermöglichung des fachlichen Austauschs mit den Verbundpartnern, sowie der Ergebnisverbreitung angefallen.

Genauere Angaben sind im Verwendungsnachweis dokumentiert.

#### **3.2 Notwendigkeit der Förderung**

Das Themenfeld "Automatisiertes Fahren" und insbesondere dessen Umsetzung in marktfähigen Produkten birgt in allen Teilaspekten erhebliche technisch-/wissenschaftliche wie auch wirtschaftliche Risiken. Diese Randbedingungen machen es selbst für große Automobilzulieferer schwer, grenzenlos in die Erforschung neuer innovativer Fahrerassistenzsysteme zu investieren. Die öffentliche Zuwendung ist notwendig, da das Konsortium das hohe Projektrisiko nicht aus eigener Kraft tragen kann. Für die Erfolgsabschätzung dieses sehr ehrgeizigen Vorhabens gibt es bisher nur mittelbare Annahmen, aber keine unmittelbaren Erfahrungswerte. Dies gilt insbesondere für den Bereich der Entwicklung von Freigabemethodiken und -prozessen, in dem das Projektvorhaben angesiedelt ist. Daher gilt ein solches Vorhaben ohne öffentliche Unterstützung als außerordentlich riskant und daher unter der Maßgabe unternehmerischer Vorsicht als kaum finanzierbar, obwohl die Erfolgsaussichten aufgrund der Kompetenzen der beteiligten Projektpartner hoch und wohlbegründet sind.

Die Aufgaben des Projekts wäre ohne staatliche Förderung in der vorgeschlagenen Form nicht oder nur deutlich verzögert in Angriff genommen werden. Die angestrebten Ergebnisse besitzen zwar hohen technologischen Wert, das Projekt wäre aber unter Wahrung unternehmerischer Vorsicht aufgrund des hohen Risikos nicht in diesem Umfang durchführbar gewesen. Die Gewährung von Fördermitteln ermöglicht somit eine deutlich frühere Erzielung der angestrebten Projektergebnisse.

Die im Rahmen von PEGASUS durch die Robert Bosch GmbH geleisteten Arbeiten waren sowohl notwendig als auch angemessen, da sie der Planung nach Vorhabenbeschreibung entsprachen und zur Erfüllung der gesetzten Ziele notwendig waren. Der Erfolg des Vorhabens wurde weiterhin in der Abschluss-Demonstration und Publikationen belegt. Der durch die Förderung ermöglichte Austausch, z.B. zu Sensormodellen oder Sicherheitsmaßen hätte sonst so nicht stattfinden können.

### **3.3 Nutzen und Verwertbarkeit**

PEGASUS hat einen wichtigen gemeinsamen Grundstein gelegt, der es erlaubt, das Thema Freigabe von HAD-Funktionen nun besser zu verstehen, einzugrenzen sowie mit einem gemeinsamen Vokabular darüber zu sprechen. Auch dort wo nicht die ursprünglich geplanten Ergebnisse erzeugt wurden, z.B. beim Sicherheitsmaß, wurden wertvolle Erfahrungen gemacht und Schlüsse gezogen. Dies erlaubt es, eine Freigabe auch Hersteller bzw. Zulieferer übergreifend in Angriff zu nehmen. Insbesondere die hierbei essentiellen, gemeinsamen Schnittstellen (OSI, OPENdrive, OPENscenario) sind für eine reibungsfreie Zusammenarbeit sowie eine einheitliche Freigabe unerlässlich. Die PEGASUS Methodik als solche wurde von BOSCH im Rahmen der Ergebnisreflektion genau bewertet. Bei identifizierten Kernelementen wird BOSCH mindestens eine Kompatibilität zur PEGASUS Methode herstellen. Andere, nicht direkt verwertbare Ergebnisse, können nun in Folgeprojekten (wie z.B. V&V Methoden) detailliert und verfeinert werden. Details hierzu finden sich zu den jeweiligen Themen im Erfolgskontrollbericht.

PEGASUS Ergebnisse fließen darüber hinaus in Standardisierungsaktivitäten ein, z.B. das openScenario Format bei ASAM<sup>3</sup>.

### **3.4 Bekannt gewordener Fortschritt**

Neben dem fachlichen Austausch mit den anderen Verbundpartnern wurde auch der Fortschritt von Wissenschaft und Technik außerhalb von PEGASUS während der Projektlaufzeit kontinuierlich beobachtet und analysiert. Dies geschah einerseits im Rahmen von Bosch-internen Veranstaltungen zum Austausch über wissenschaftlichen Themen und andererseits durch die Verfolgung der wissenschaftlichen Literatur. Weiterhin erfolgte die Teilnahme an den nationalen und internationalen Konferenzen. Es finden sich verschiedene Stoßrichtungen im Fortschritt außerhalb von PEGASUS wieder, einige dazu passen gut zu den PEGASUS Ergebnissen, andere wiederum lassen sich nicht direkt einfügen oder einreihen.

Neben PEGASUS wurde an zahlreichen anderen Stellen am Thema Freigabe von hochautomatisierten Fahrfunktionen Level 3 gearbeitet, die zu zahlreich sind um sie hier aufzulisten. Besonders erwähnenswert sind

### **3.5 Veröffentlichungen und Ergebnisverbreitung**

#### **3.5.1 Erfolgte Veröffentlichungen**

Durch Bosch erfolgten im Projekt keine direkten Veröffentlichungen. Allgemeine Projektergebnisse sind auf der PEGASUS Website<sup>4</sup> einsehbar.

#### **3.5.2 Geplante Veröffentlichungen**

Keine.

---

<sup>3</sup> <https://www.asam.net/standards/detail/openscenario/>

<sup>4</sup> <https://www.pegasusprojekt.de/de/>

## 4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel für kritisches Einschermanöver .....	22
Abbildung 2: Möglicher Entscheidungsablauf bei Prüfung iener HAF auf verkehrskonformes Verhalten.....	24
Abbildung 3: Komplexeres Beispiel für Bewertung von verkehrskonformem Verhalten .....	25
Abbildung 4: Zusammenspiel aus Sicherheitsargumentation, Testmethodik und Methoden	32
Abbildung 5: Notwendigkeit des Testens zur Erbringung von Nachweisen, welche die Gültigkeit der Sicherheitsargumentation .....	33
Abbildung 6:Methoden als Befähigung für das szenariobasierte Testen .....	34
Abbildung 7: Zusammenhang von Methoden, Annahmen und Argumenten .....	35
Abbildung 8: Kiviat-Diagramme; Links: Vehicle in the loop; Rechts: realer Fahrversuch .....	57
Abbildung 9: Ablauf der Test-Zuordnungsmethodik.....	58
Abbildung 10: Einflussparameter auf die Fahrmanöver.....	62
Abbildung 11: Exemplarischer Anwendungsfall des Autobahnchauffeurs .....	63
Abbildung 12: Verwendete Koordinatensysteme & Abstände der Verkehrsteilnehmer .....	64
Abbildung 13: Verschiedene Kategorien der Testmanöver .....	65
Abbildung 14: Beispiel eines Test Cases mit ethischer Fragestellung.....	68
Abbildung 15: Skizze zum Testmanöver “Vorausfahrendes Fahrzeug schert aus .....	70
Abbildung 16: Beispiel für Straßengeometrie und Topologie .....	76
Abbildung 17: Bsp. Use Case für Situationsabhängige Anpassung der Strecke .....	76
Abbildung 18: Beispiel für Verkehrssituationen bezogene Use Cases .....	77
Abbildung 19: Beispiel für Umwelt.....	77
Abbildung 20: Gewichtung der Bewertungskriterien .....	79
Abbildung 21: Anwendungsbeispiel der Nutzwertanalyse auf einen Use Case.....	80
Abbildung 22: Funktionsweise Autobahnchauffeur (Beispiel) .....	84
Abbildung 23: Vergleich von Testverfahren .....	85
Abbildung 24: Use Case Folgefahrt .....	86
Abbildung 25: Use Case Spurwechsel Vorrausfahrendes Fahrzeug .....	86
Abbildung 26: Use Case stehengebliebenes Fahrzeug auf der EGO-Spur .....	87
Abbildung 27: Use Case anderes Fzg. wechselt zeitgleich in die gleiche Fahrbahn.....	87
Abbildung 28: Test Case für vorausfahrendes Fahrzeug hält auf Standspur .....	88
Abbildung 29: Test Case beide Fzge. wechseln zeitgleich in die gleiche Fahrspur .....	88

Abbildung 30: Prozentuale Aufteilung der Gesamtfahrleistung 2018 (Krafftahrt-Bundesamt, 2015) .....	91
Abbildung 31: Use Case Holztransporter .....	91
Abbildung 32: Mittelstreifenüberfahrt vierstreifige Autobahn (Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, 2008) .....	94
Abbildung 33: Bemessungsgrundlagen Kuppenhalbmesser .....	98
Abbildung 34: Auf- und Abfahrten .....	99
Abbildung 35: Bauarten von Autobahn-Dreiecken .....	99
Abbildung 36: Bauarten von Autobahnkreuzen .....	100
Abbildung 37: Optimale Teststrecke für HAF .....	102
Abbildung 38: Auszug Nr.1 von der HAF-Gesamtteststrecke mit versch. Use Cases .....	103
Abbildung 39: Auszug Nr.2 von der HAF-Gesamtteststrecke mit versch. Use Cases .....	104
Abbildung 40: Auszug Nr.3 von der HAF-Gesamtteststrecke mit versch. Use Cases .....	105
Abbildung 41: DL-Fahrzeuge auf Dauerlauffahrt in Schweden .....	107
Abbildung 42: Level-3 Bosch Fahrzeuge für die Funktion „Autobahnchauffeur“ .....	108
Abbildung 43: Prozess zur Datenkonvertierung .....	108
Abbildung 44: Vorgehen zur Ableitung des Modelltyps und der Modellanforderungen .....	111
Abbildung 45: Unterstrukturen <code>osi3::CameraSensorView</code> und <code>osi3::RadarSensorView</code> der Struktur <code>osi3::SensorView</code> (OSI Documentation, 2020) .....	112
Abbildung 46 Unterstruktur <code>osi3::GroundTruth</code> der Struktur <code>osi3::SensorView</code> (OSI Documentation, 2020) .....	115
Abbildung 47: Datenstruktur der Sensorausgabe <code>osi3::DetectedMovingObject</code> für phänomenologische Modelle (OSI Documentation, 2020) .....	115
Abbildung 48: Datenstruktur der Sensorausgabe <code>osi3::DetectedMovingObject</code> für physikalische Modelle (OSI Documentation, 2020) .....	115
Abbildung 49: Konzept und Aufbau der phänomenologischen Radarsimulation .....	122
Abbildung 50: Einscherszenario in IPG CarMaker mit visualisierten Sensorausgaben (grüner Rahmen bzw. Sensorwerten in Textboxen) .....	123
Abbildung 51: Signalkette der physikalischen Radarsimulation .....	124
Abbildung 52: Raytracing des Radarsignals mithilfe des RSI von IPG CarMaker. Nur jene Strahlen sind dargestellt, die auch wieder auf den Radarempfänger (RX) treffen .....	126
Abbildung 53: Konzept und Aufbau des phänomenologischen Kameramodells .....	130
Abbildung 54: Darstellung der Kamera-Sensorsimulation mit den Informationstafeln .....	131
Abbildung 55: Darstellung des Video Sensormodells in IPG CarMaker .....	132
Abbildung 56: Darstellung des Kamera Sensormodells mit VTD und ROS rviz .....	133

Abbildung 57: Signalverarbeitungsarchitektur der Kamera-Sensorsimulation .....	134
Abbildung 58: Schema zur objektiven Ermittlung der Modellqualität durch statistische Validierung .....	135
Abbildung 59: Kopfzeile und Inhalt „Fragebogen TP4 – interne Ergebnisreflexion“ .....	138
Abbildung 60: Erläuterungen zum Ausfüllen des Fragebogens. ....	138
Abbildung 61: Fragenblock Teil 01/06 bzgl. „Reflexion der Rückverfolgbarkeit der PEGASUS-Ergebnisse (Fokus1)“ .....	139
Abbildung 62: * Beispiel Datentonne und ** Beispiel Parallelogramm .....	140
Abbildung 63: Fragenteil „Reflexion der Durchgängigkeit der PEGASUS-Arbeiten“ (Fokus 2) .....	140
Abbildung 64: Umsetzungsgrad der Ergebnisse des TP1 auf UAP-Ebene .....	141
Abbildung 65: Umsetzungsgrad der Ergebnisse des TP2 auf UAP-Ebene .....	141
Abbildung 66: Umsetzungsgrad der Ergebnisse des TP3 auf UAP-Ebene .....	142
Abbildung 67: Visualisierung Umsetzungsgrad der Teil-(UAP)-Ergebnisse .....	142
Abbildung 68: Summarische UAP-Rückmeldung der VHB-Arbeitsziele des TP1 .....	144
Abbildung 69: Summarische UAP-Rückmeldung der VHB-Arbeitsziele des TP2 .....	144
Abbildung 70: Summarische UAP-Rückmeldung der VHB-Arbeitsziele des TP3 .....	144
Abbildung 71: Sum. UAP-Rückmeldung in der PEGASUS-Gesamtmethode .....	145
Abbildung 72: Inhaltliche Struktur des PEGASUS-Newsletters .....	147
Abbildung 73: Beispiel: PEGASUS-Newsletter Release 01, Q3 2018 .....	147
Abbildung 74: PEGASUS - Bosch Unternehmensinterne Reflexion – Teil 1 .....	148
Abbildung 75: PEGASUS - Bosch Unternehmensinterne Reflexion – Teil 2 .....	149

## 5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektpartner (außer Bosch) .....	14
Tabelle 2: Unterkategorien für Vermeidung von Kritikalität .....	21
Tabelle 3: Bewertung des komplexen Beispiels für Bewertung der Verkehrsregelkonformität .....	26
Tabelle 4: negativer und positiver Beitrag zur Argumentation .....	38
Tabelle 5: Nachweise und ihre Auswirkung auf die hollistische Betrachtung .....	41
Tabelle 6: Art des Nachweises und Auswirkung auf die hollistische Betrachtung .....	44
Tabelle 7: Art des Nachweises und Auswirkung auf die hollistische Betrachtung - Kritikalität .....	45
Tabelle 8: Art des Nachweises und Auswirkung auf die hollistische Betrachtung Art des Nachweises und Auswirkung auf die hollistische Betrachtung - Assoziation .....	46
Tabelle 9: Art des Nachweises und Auswirkung auf die hollistische Betrachtung - Relation .....	48
Tabelle 10: Art des Nachweises und Auswirkung auf die hollistische Betrachtung - Selektion .....	49
Tabelle 11: Art des Nachweises und Auswirkung auf die hollistische Betrachtung - Variation .....	50
Tabelle 12: Art des Nachweises und Auswirkung auf die hollistische Betrachtung - Evaluation .....	51
Tabelle 13: Zusammenfassung der Ergebnisse .....	52
Tabelle 14: Limitationen der Methoden .....	54
Tabelle 15: Limitationen der Methoden II .....	54
Tabelle 16: Übersicht über Prüfstände nach Strasser (Strasser, 2012) .....	57
Tabelle 17: Auswahl der Anwendungsfälle für den Autobahnchauffeur (VT = Verkehrsteilnehmer) .....	64
Tabelle 18: Definition der Start- und Zielwerte des Manövers "Ausscheren Vorfahrender" .....	72
Tabelle 19: Zusammenfassung d. Anforderungen bzgl. der Darstellung eines PKW .....	74
Tabelle 20: Überblick der Anforderungen an das System zur Bewegung (HWP = Highwaypilot, gleichzusetzten mit dem Autobahnchauffeur) .....	76
Tabelle 21: Testaufbau für Test Case: Vorfahrendes Fzg. hält auf Standspur .....	88
Tabelle 22: Testaufbau TC beide Fzge. wechseln zeitgleich in die gleiche Fahrspur .....	89
Tabelle 23: Fahrzeugbestand in Deutschland 2018 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2015) .....	90
Tabelle 24: Straßenkategorien nach RIN und Geltungsbereich der RAA (Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, 2008) .....	92

Tabelle 25: Entwurfsklassen und Gestaltungsmerkmale (Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, 2008) .....	92
Tabelle 26: Abmaß für Fahr- und Seitenstreifen nach RAA (Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, 2008) .....	93
Tabelle 27: min. Radien für Autobahnen.....	93
Tabelle 28: Benötigte Zeit und Strecke für ein Überholmanöver .....	95
Tabelle 29: Bewertung der Streckenelemente .....	106
Tabelle 30: Gesammelte Radareffekte.....	119
Tabelle 31 Gesammelte Anforderungen an die Schnittstelle zum und vom Sensormodell .	121
Tabelle 32 Gesammelte Anforderungen an das Simulationsmodell bzgl. Kanalsimulation .	121
Tabelle 33: Kamera-Sensormodell-Effekte .....	128
Tabelle 34 Gesammelte Anforderungen an das Kamera-Sensormodell.....	129
Tabelle 35: Priorisierung in der Umsetzung der Schnittstellenkomponenten.....	134
Tabelle 36: Rücklaufquote der Fragebogen E11/2018 .....	143
Tabelle 37: Auszug aus der Abschlussreflektion der PEGASUS Einbettungselemente (BOSCH).....	149
Tabelle 38: Auszug aus den detaillierten Bosch-Kommentaren zur Abschlussreflektion der Einbettungselemente .....	150

## 6 Literaturverzeichnis

„Absicherung automatischen Fahrens“, Prof. Dr. H. Winner. 6. FAS-Tagung München, 29.11.2013. (kein Datum).

ASAM OSI. (20. 2 2020). Von <https://www.asam.net/standards/detail/osi/> abgerufen

Bundesamt für Güterverkehr. (2013). *Marktbeobachtung Güterverkehr Bericht Herbst 2013*. Köln.

*ETHICS COMMISSION AUTOMATED AND CONNECTED DRIVING*. (2017).

FMI. (20. 2 2020). Von <https://fmi-standard.org/> abgerufen

Kraftfahrt-Bundesamt. (2015). *Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge im JAHR 2014*.

Markus Steimle, T. M. (kein Datum). *A Method for Classifying Test Bench Configurations in a Scenario-Based Test Approach for Automated Vehicles*.

*OpenSimulationInterface*. (20. 02 2020). Von <https://github.com/OpenSimulationInterface> abgerufen

*OSI Documentation*. (20. 2 2020). Von <https://opensimulationinterface.github.io/opensimulation-interface/annotated.html> abgerufen

*OSMP*. (20. 2 2020). Von <https://github.com/OpenSimulationInterface/osi-sensor-model-packaging> abgerufen

*Protobuf*. (20. 2 2020). Von <https://developers.google.com/protocol-buffers> abgerufen

*Richtlinien für die Anlage von Autobahnen*. (2008). FGSV Verlag; ISBN 978-3-939715-51-1.

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.

Strasser, B. (2012). *Vernetzung von Test- und Simulationsmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen*.

transportation, U. d. (kein Datum). *Automated driving systems, a vision for safety*.

Umweltbundesamt. (2013). *Treibhausgasausstoß in Deutschland 2012*. Dessau.

Union, E. (2009). *Amtsblatt der Europäischen Union - Verordnung (EG) Nr. 661/2009*.