VERIFICATION
VALIDATION
METHODS

VVM - Schlussbericht

VVMethoden - Verifikations- und Validierungsmethoden automatisierter Fahrzeuge Level 4 und 5

ZF Friedrichshafen AG

Version 1.2

Zuwendungsempfänger ZF Friedrichshafen AG

Förderkennzeichen 19A19002W

Laufzeit des Vorhabens 07/2019 - 12/2023

Berichtsfälligkeit 30.06.2024

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Dokumenteninformation

Autoren

Martin Dörr, Martin Bollmann, Dr. Johannes Daube, Bogdan Cojocaru, Christian Lalitsch-Schneider, Martin Mai, Slavisa Krebs-Radic, Dr. Matthias Beck, Armin Rasch, Martin Sedlacek

Kontakt

Firmenprojektleiter: Martin Dörr

Partner: ZF Friedrichshafen AG

PLZ Ort: 88046 Friedrichshafen

Tel.: +49 (0) 7541 77 6691

Fax: +49 (0) 7541 77 900341

Email: martin.doerr@zf.com

Revisionslog

Version	Datum	Kommentar	Autor	Partner
v0.1	02.01.2024	Vorlage	Dörr	ZF
v0.2	03.06.2024	Version zum Review	Dörr	ZF
v1.0	26.06.2024	finale Version für den Fördermittelgeber	Dörr	ZF
v1.1	26.06.2024	Version für die TIB	Dörr	ZF
v1.2	11.07.2024	Version für die TIB, Entfall der Unterschrift	Dörr	ZF

Inhaltsverzeichnis

0 Zusammenfassung / Summary **8**

1 Übersicht **9**

1.1 Aufgabenstellung 9

1.1.1 Aufgabenstellung I: Beherrschung der Vielzahl möglicher Szenarien 10

1.1.2 Aufgabenstellung II: Inkrementelles Testen von Subsystemen und Gesamtsystem 12

1.1.3 Aufgabenstellung III: Durchgängiges Testen über alle Testinstanzen 15

1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben 17

1.3 Planung und Ablauf 19

1.3.1 Planung 19

1.3.2 Ablauf 23

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik 24

1.4.1 Wirtschaftliche, technische und wissenschaftliche Ausgangssituation 24

1.4.2 Stand der Technik bezogen auf das Projekt 26

1.4.3 Kritikalitätsanalyse – Bestandteil von Ansatz I 26

1.4.4 Methodik zur Ableitung von System- und Testanforderungen – Bestandteil Ansatz II 27

1.4.5 Testprozess – Bestandteil Ansatz II / III 28

1.4.6 Model/SW-Testing (MiL/SiL) – Bestandteil Ansatz III 31

1.4.7 Gerätetest (HiL) – Bestandteil Ansatz III 33

1.4.8 Testen im Fahrzeug – Bestandteil Ansatz III 35

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 35

1.5.1 Zusammenarbeit mit SET Level 4to5 35

1.5.2 Zusammenarbeit mit SmartSE 36

1.5.3 Einbindung assoziierter Partner 37

1.5.4 Offene Treffen zur Ergebnisverbreitung 38

2 Eingehende Darstellung **39**

2.1 Erzielte Ergebnisse 39

2.1.1 TP1 Rahmenbedingungen und Impulsgeber 39

2.1.2 TP2 Kritikalitätsanalyse 46

2.1.3 TP3 Sicherheitsbewertung & -konzept 55

2.1.4 TP4 Regelwerk System- und Testanforderungen 64

2.1.5 TP5 Simulationssteuerung 69

2.1.6 TP6 Datenbereitstellung 69

2.1.7 TP7 Testvorgehen 70

2.1.8 TP8 Datenbanken 78

2.1.9 TP9 - Prozess Instanziierung und Anwendung 78
2.1.10 TPX – Interner und externer Informationsaustausch 79
2.2 Zahlenmäßiger Nachweis 80
2.3 Notwendigkeit der Förderung 82
2.4 Nutzen und Verwertbarkeit 82
2.5 Veröffentlichungen 84
2.5.1 Erfolgte Veröffentlichungen 84
2.5.2 Geplante Veröffentlichungen 86
3 Referenzen 87
4 Unterschrift 92

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Teilprojekte in VVM und deren Zusammenhang 20
Abbildung 2: Die drei Arbeitsphasen in VVM 22
Abbildung 3: Konzept der Kombination verschiedener Testarten zur V&V von Systemen 25
Abbildung 4: Validierung und Verifikation im Entwicklungsprozess 29
Abbildung 5: Testobjekt Gesamtfahrzeug (Darstellung aus PEGASUS, Testkonzept) 31
Abbildung 6: Testobjekt Fahrfunktion (Darstellung aus PEGASUS, Testkonzept) 32
Abbildung 7: Schematische Beispielübersicht für die systematische Absicherung am FAS-Cluster-HiL [20] 33
Abbildung 8: Assurance Framework - Development & Operation | Global 40
Abbildung 9: Assurance Framework - Development & Operation | Scenarios 40
Abbildung 10: Assurance Framework - Risk Management 41
Abbildung 11: Assurance Framework - Argumentation 41
Abbildung 12: Grundlegende Umfänge der Kundenfunktion 42
Abbildung 13: Verbindung der Functional Use Cases (FUC) zur ODD 43
Abbildung 14: Synchronisationsunkte im Assurance Framework 44
Abbildung 15: Ergebnisstruktur des Gesamtprojekts 44
Abbildung 16: Anwendungsfall FUC 2.3 45
Abbildung 17: ZF-Beschreibungssprache (Story Board) am Beispiel eines VVM Use Case 47
Abbildung 18: Konkretisierung des 6-Layer-Modells 47
Abbildung 19: Architektur der Ontologie A.U.T.O. 48
Abbildung 20: Überblick bestehender Kritikalitätsmaße 49
Abbildung 21: SW-Framework CriSys 50
Abbildung 22: CriSys Dashboard 51
Abbildung 23: Vergleichende Untersuchung von Kritikalitätsmaßen 52
Abbildung 24: Key Word Driven HARA within Safety Process 53
Abbildung 25: Schlüsselwort getriebene Identifikation von Gefährdungen auf Fahrzeugebene 54
Abbildung 26: D05 - Spezifikation von Sollverhalten 56
Abbildung 27: Workshopreihe zur Erarbeitung von Sicherheitszielen 57
Abbildung 28: Exemplarischer PSM-Graph für ein urbanes Szenario 58
Abbildung 29: Formulierungsmuster für Sicherheitsziele 58
Abbildung 30: Ontologie zur Risikomodellierung 59
Abbildung 31: Risk-Management-Core im Assurance Framework 60
Abbildung 32: Risiko basierte Ableitung von funktionalen Anforderungen 60

Abbildung 33: Argumentationsstruktur als Teil des Assurance Framework 61
Abbildung 34: Abbildung des Fähigkeitennetzwerks (Ausschnitt) in Cameo 62
Abbildung 35: Automatisierter Betrieb - Fähigkeit und Funktion 63
Abbildung 36: Ansatz "Fähigkeit als Brücke" - Verhaltensspezifikation und funktionale Architektur 64
Abbildung 37: Testplanung im Assurance Framework 65
Abbildung 38: Gesamtdarstellung der Testplanung 66
Abbildung 39: Systemanforderungen und -architektur als Voraussetzung der Testorchestrierung 67
Abbildung 40: Exemplarische funktionale Testspezifikation 68
Abbildung 41: Verbindung von Testplanung und Testorchestrierung 69
Abbildung 42: IST-Zustand des SiL-Framework 71
Abbildung 43: SOLL-Zustand des SiL-Framework 72
Abbildung 44: Detaillierung der Testorchestrierung 73
Abbildung 45: Struktur der technischen Testspezifikation 74
Abbildung 46: Studienergebnisse zu Szenarienformaten 75
Abbildung 47: Studienergebnisse zu Szenarienformaten 75
Abbildung 48: Studienergebnisse zu Szenarienformaten 76
Abbildung 49: Domänenmodell der maschinenlesbaren technischen Testspezifikation 77
Abbildung 50: Framework zur Testausführung 77

0 Zusammenfassung / Summary

Zusammenfassung

Das VVM-Projekt hat erstmals einen durchgängigen methodischen Sicherheitsansatz für automatisiertes Fahren im urbanen Umfeld geschaffen. Zentrale Aspekte der VVM-Gesamtmethode sind dabei der Szenarien basierte Ansatz, die Kritikalitätsanalyse, die Fähigkeiten basierte Architektur, durchgängiges Testen in virtuellen, semi-virtuellen und realen Testumgebungen, die Einbindung in eine übergreifende Argumentationsstruktur. Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Förderprojekte Pegasus und SetLevel4to5 kann damit die branchenweite Zusammenarbeit im Bereich des automatisierten und vernetzten Fahrens weiter verbessert werden.

Die ZF Friedrichshafen AG (im Folgenden ZF) war als großer deutscher TIER1 im VVM-Projekt Konsortialpartner und hatte in den Teilprojekten TP2 „Kritikalitätsanalyse“ und TP7 „Testvorgehen“ die industrielle Leitung inne. Darüber hinaus war ZF mit Ausnahme des TP5 an allen Teilprojekten beteiligt und konnte so auch TP übergreifend die Kompetenz und Sichtweise eines TIER1 mit Erfahrung in der Entwicklung sicherheitsrelevanter Fahrzeugsysteme einbringen.

Der vorliegende Schlussbericht beschreibt das VVM-Projekt im Detail und fasst die Aktivitäten und Ergebnisse zusammen, die ZF gemeinsam mit den Konsortialpartnern aus Wissenschaft und Industrie erreicht hat.

Summary

The VVM project has created a consistent methodical safety approach for automated driving in an urban environment for the first time. Central aspects of the overall VVM method are the scenario-based approach, the criticality analysis, the capability-based architecture, seamless testing in virtual, semi-virtual and real test environments and integration into an overarching argumentation structure. Building on the results of the previous Pegasus and SetLevel4to5 public funded projects, industry-wide cooperation in the field of automated and connected driving can thus be further improved.

As a major German TIER1, ZF Friedrichshafen AG (hereinafter referred to as ZF) was a consortium partner in the VVM project and held the industrial lead in the sub-projects TP2 "Criticality Analysis" and TP7 "Test Procedure". In addition, ZF was involved in all sub-projects except for TP5 and was thus able to contribute the competencies and perspective of a TIER1 with experience in the development of safety-relevant vehicle systems across all sub-projects.

This final report describes the VVM project in detail and summarizes the activities and results that ZF has achieved together with the consortium partners from academia and industry.

1 Übersicht

1.1 Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Projektes war die Entwicklung von Systematik und Methoden für den Sicherheitsnachweis von vollautomatisierten und fahrerlosen Fahrfunktionen und Fahrzeugen (Level 4/5 nach VDA-Definition [11]) zur Homologation im urbanen Umfeld.

Klassische Absicherungsmethoden beruhen vielfach auf der Annahme, dass neue Funktionen hinreichend sicher sind, wenn sie unter Realbedingungen über hunderttausende Kilometer ohne Probleme funktioniert haben. Versucht man, diesen Ansatz auf L4/L5 Systeme zu übertragen, stößt man schnell auf Probleme. Die Extrapolation herkömmlicher Absicherungsmethoden erfordern für ein vollautomatisiertes System, dass alle möglichen Kombinationen von konkreten Verkehrssituationen, Umfeldfaktoren und Systemzuständen einschließlich Systemfehlern vollständig zu betrachten sind. Der dadurch entstehende Kombinationsraum ist so groß, dass eine statistisch hinreichend vollständige Untersuchung mit aktuell etablierten Testmethoden nicht wirtschaftlich darstellbar ist. Zudem sind die für das System relevanten und häufig auftretenden Situationen nicht vollumfänglich bekannt (Vollständigkeitsdilemma).

Die dem Projekt zugrunde liegende Annahme war, dass diese technisch/wissenschaftlichen Aufgabenstellungen gelöst werden können, indem zunächst der für den Sicherheitsnachweis ausreichende Kombinationsraum (Topologie, Verkehrssituation, Wetter, ...) über eine strukturierte Analyse durch eine handhabbare Anzahl von Szenarien darstellbar wird. Diese Szenarien müssen dabei:

1. alle statistisch relevanten kritischen Ereignisse umfassen,
2. so beschrieben sein, dass sie für menschliche Experten verständlich sind und
3. die Vielzahl der tatsächlich vorkommenden und denkbaren Szenarien in einer handhabbaren Anzahl von parametrierten Szenarien zusammenfassen.

Würden alle notwendigen Prüfungen eines L4/L5-Fahrzeuges nur auf Basis von Gesamtfahrzeugtests durchgeführt entstünde ein gigantischer physischer Prüfaufwand und entsprechender Zeitaufwand [5]. Stattdessen muss Aufwand und Zeitdauer in einem durchführbaren Rahmen gehalten werden, der es ermöglicht, die Vielzahl der möglichen Szenarien mit hinreichender Variation effizient und kostengünstig sowohl für Gesamtfahrzeuge als auch Teile eines Fahrzeuges separat abzusichern.

Um die Durchführbarkeit zu erhalten, muss der Sicherheitsnachweis Tests und Testergebnisse unterschiedlicher Testinfrastrukturen und Integrationsstufen (Komponente bis System) optimal und nachvollziehbar zusammenführen. Zudem sind neuartige Testbeschreibungen sowie Metriken zur Bewertung der Systeme zu entwickeln. Für den Sicherheitsnachweis ist eine Kombination aus Simulations- und Realtests zu erarbeiten, durch die Testaufwände mit Hilfe von Simulationstechnologien zunehmend in die virtuelle Welt verschoben werden können.

Das Grundkonzept der im Projekt verfolgten Lösung war es, aufbauend auf etablierten Nachweismethoden, innovativen Forschungsergebnissen und existierenden Forschungsprojekten (u.a. PEGASUS, ENABLE-S3, SAFE) eine Methodik für die Freigabe / Homologation von L4/L5-Fahrfunktionen zu entwickeln.

Vor diesem Hintergrund und der oben genannten Gesamtzielsetzung wurden drei zentrale technisch/wissenschaftlichen Aufgabenstellungen abgeleitet, die im Projekt bearbeitet wurden:

Aufgabenstellung I: Beherrschung der Vielzahl möglicher Szenarien.

Aufgabenstellung II: Inkrementelles Testen von Subsystemen und Gesamtsystem

Aufgabenstellung III: Nahtloses Testen über alle Testinstanzen.

1.1.1 Aufgabenstellung I: Beherrschung der Vielzahl möglicher Szenarien

Ausgangssituation

Bisher fährt der Mensch selbst – typischerweise risikomindernd. Vom Grundsatz her hat der Mensch in allen Situationen die Kontrolle über die Fahrfunktionen inne. Für die Entwicklung von Sicherheitsnachweisen greift heute insbesondere die ISO 26262 mit der im Wesentlichen zu zeigen ist, dass Lenkung, Bremsen, Beschleunigung etc. verlässlich funktionieren, damit der Mensch in allen Situationen die sichere Kontrolle über das Fahrzeug hat.

In vollautomatisierten Fahrzeugen ist der Mensch nicht mehr als (rechtzeitige) Rückfallebene verfügbar. Der Verhaltensanspruch ist somit, dass die Automation selbst alle potenziellen Fahrsituationen und Einflussfaktoren sicher behandeln muss. Der Sicherheitsnachweise für vollautomatisierte und fahrerlose Fahrzeuge muss also nachweisen, dass die Automation in „so gut wie allen“ (d.h. statistisch relevanten) Fahrsituationen sicher und risikomindernd agiert.

Wie eingangs erläutert gibt es eine unüberschaubar große Menge von Szenarien (viele Millionen), deren Prüfung und Untersuchung mit herkömmlichen Mitteln einen unbeherrschbaren Aufwand fordert. Noch schwieriger ist es, diese Szenarien korrekt zu definieren und den Nachweis ihrer statistischen Relevanz / Vollständigkeit zu führen. Somit ergab sich die erste technisch/wissenschaftliche Aufgabenstellung für VVMethoden:

Aufgabenstellung I: Beherrschung der Vielzahl möglicher Szenarien.

Welches sind die sicherheitsrelevanten Verhaltensansprüche an Fahrzeuge im urbanen Verkehr und wie können diese so erfasst werden, dass sie umfassend und gleichzeitig effizient getestet werden können?

Ansatz zur Beantwortung von Aufgabenstellung I in VVMethoden

Um sich dem Problem zu nähern, wurde betrachtet, wie Menschen als Fahrer heute diese Herausforderung meistern: Menschen erlernen in der Fahrschule hinreichend viele Fahrsituationen (Straßentopologien, andere Verkehrsteilnehmer – Position, Geschwindigkeit, vermutliches Verhalten in den nächsten 5-10 Sekunden – Schilder, Verkehrsregeln, etc.) einzuschätzen und Strategien, um diese Fahrsituationen risikokontrollierend zu beherrschen. Dabei lernt der Mensch implizit, Fahrsituationen, die ähnliches Fahrverhalten erfordern, in endlich viele Klassen (<100) einzuteilen.

Die Klassen von Fahrsituationen werden vom Menschen um endlich viele äußere Einflussfaktoren ergänzt, die Risiken beeinflussen wie zum Beispiel Witterung, Sichtverhältnisse,

Straßenbeschaffenheit, Verkehrsteilnehmer die Verkehrsregeln unbeabsichtigt oder mit Absicht verletzen, Einsatzfahrzeuge. Der Mensch passt in Abhängigkeit dieser Einflussfaktoren seine Fahrstrategien für die jeweilige Klasse an zum Beispiel Reduzierung der Geschwindigkeit bei eingeschränkter Sicht. Dieses Wissen wird durch Erfahrungen vertieft und gefestigt. Der Mensch lernt Fahrsituationen kontextabhängig über grundlegende Wirkzusammenhänge in Klassen einzuteilen und risikominimierende Fahrentscheidungen zuzuordnen. Er nutzt dieses implizite Wissen über Klassen von Fahrsituationen und Einflussfaktoren, um immer neue Verkehrssituationen einzuschätzen.

Klassen von Fahrsituationen, Einflussfaktoren und grundlegenden Wirkzusammenhängen sind ein wirkungsvolles, handhabbares Ordnungsprinzip für sicheres Fahren in der Menge aller möglichen Verkehrsszenarien. Gelingt es, das Prinzip der Klassenbildung, Einflussfaktoren und grundlegende Wirkzusammenhänge zu übertragen, kann man im Wesentlichen alle Fahrsituationen, auch solche die in exakt der Form noch nie erlebt wurden, beherrschen und die zugehörigen Sicherheitsprinzipien sowie Fahrmanöver (z.B. Geschwindigkeitsreduktion, Ausweichen) hinreichend sicher ausführen.

VVMethoden hat genau diesen Ansatz verfolgt und über das o.g. Ordnungsprinzip die Vielzahl möglicher Fahrsituationen in beherrschbar viele Klassen eingeteilt. Diese wurden dann mittels repräsentativer Szenarien beschrieben. Zusätzlich wurden von den Szenarien unabhängige Einflussfaktoren ermittelt und beschrieben, darauf aufbauend wurde analysiert, wann Einflussfaktoren und Szenarien eine kritische Kombination ergaben, die beherrscht werden mussten. In der Folge wurden dann Sicherheitskonzepte zur Unfallvermeidung und repräsentative Tests abgeleitet.

Ansatz I: Entwicklung einer Methodik zur handhabbaren Reduktion des L4/L5-Testraums.

- Kritische Situationen und Gefährdungen identifizieren;
- Ableiten der Sicherheitsanforderungen einschließlich einer Definition für normatives Fahrverhalten;
- Fokussierung des Testraumes durch Ableitung repräsentativer Tests.

VVMethoden hat mit diesem Vorgehen drei Ziele erreicht:

1. Erzeugung eines tiefgehenden Verständnisses der relevanten Wirkzusammenhänge in Verkehrsgefährdungen und eine systematische Zuordnung von existierenden Sicherheitsprinzipien und Sicherheitskonzepten inklusive des Nachweises, dass Wirkzusammenhänge hinreichend genau beschrieben werden konnten.
2. Schaffung einer Gesamtmethodik inklusive einer Abdeckungsmetrik für die Entwicklung eines Szenarienkataloges, der die analysierten Wirkzusammenhänge – gemäß der Abdeckungsmetrik – statistisch hinreichend beschreibt und aus dem sich systematisch Testfälle für die Freigabe von L4/L5 Fahrfunktionen ableiten lassen.
3. Darstellung eines repräsentativen Szenarienraumes inklusive einer semantischen Annotation des Szenarienraumes auf Basis der Ontologie für Klassifizierung, Einflussfaktoren und Ermittlung der Wirkzusammenhänge aus (1) und (2).

Im Projektverlauf wurden die für den Use Case Urbane Kreuzung relevanten Wirkzusammenhänge identifiziert. Die Identifikation und der Nachweis aller für das hochautomatisierte urbane Fahren relevanten Wirkzusammenhänge konnte aufgrund der Fokussierung auf den Use Case Urbane Kreuzung nicht in diesem Projekt erfolgen.

Zusammenfassung

Aufgabenstellung I: **Beherrschung der Vielzahl möglicher Szenarien**	
Ansatz	Ergebnisse
Entwicklung einer Methodik zur handhabbaren Reduktion des L4/L5-Testraums: • Ermittlung und Beschreibung der Klassen mittels repräsentativer, generischer Szenarien; • Ermittlung und Beschreibung der Einflussfaktoren; • Analyse der Wirkzusammenhänge; • systematische Ermittlung kritischer Situationen und Gefährdungen; • Identifikation / Ableitung zugehöriger Sicherheitskonzepte zur Unfallvermeidung; • Ableitung einer handhabbaren Menge repräsentativer, einhüllender Tests.	• Darstellung eines repräsentativen Szenarienraumes und Entwicklung einer Ontologie für Klassifizierung, Einflussfaktoren und Entwicklung der Wirkzusammenhänge. • Identifikation und tiefgehendes Verständnis der relevanten Wirkzusammenhänge in Verkehrsgefährdungen und systematische Zuordnung von Sicherheitsprinzipien und Sicherheitskonzepten. • Gesamtmethodik inklusive Abdeckungsmetrik für die Entwicklung von standardisierbaren, hinreichend vollständigen Szenarienkatalogen.

1.1.2 Aufgabenstellung II: Inkrementelles Testen von Subsystemen und Gesamtsystem

Ausgangssituation

Die Summe der Testanforderungen an L4/L5-Fahrzeuge wird trotz der oben skizzierten Reduktionen gegenüber den heutigen Tests signifikant ansteigen. Gleichzeitig steigt die Komplexität der Systeme an. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen Hersteller deswegen zukünftig in der Lage sein, erhobene Testergebnisse und Sicherheitsnachweise wiederzuverwenden und Komponenten bzw. Subsysteme unterschiedlicher Zulieferer zusammenzuführen – ohne Brüche in der Test- und Sicherheitsargumentation für das Gesamtsystem. Für die Freigabe des Gesamtfahrzeugs hat daher die Art der Absicherung von Komponenten und Subsystemen eine zentrale Bedeutung. Die zentrale Forschungsfrage in diesem Bereich war also:

> Aufgabenstellung II: Inkrementelles Testen von Subsystemen und Gesamtsystem.
>
> Wie können Testmittel und Testergebnisse wiederverwendet bzw. systematisch aggregiert werden, wie können Hersteller und Zulieferer getestete Systeme sowie Tests austauschen,

und wie kann die Testbarkeit der Sicherheit von Anfang an in das System designed werden?

Ansatz zur Lösung von Aufgabenstellung II in VVMethoden

VVMethoden begegnete Aufgabenstellung II, indem die Sicherheitsziele des Systems auf allen Systemebenen von Anfang an im Systemdesign berücksichtigt wurden und somit in das System „hinein designed“ wurden, mit dem Ziel, dass resultierende Testanforderungen auf unterschiedlichste Kombinationen von Komponenten passen und zuverlässig sowie effizient umsetzbar und kombinierbar waren.

Auf Basis der Ergebnisse von Aufgabenstellung I wurden globale Sicherheitsziele der L4/L5-Fahrzeuge in Sicherheitsziele auf Subsystem- und Komponentenebene entlang einer generischen funktionalen Architektur heruntergebrochen, nachfolgend wurden System- und Testanforderungen für Subsysteme und Komponenten abgeleitet. Die entwickelten Testkonzepte mussten dabei handhabbar und passend für den Einsatz in einer durchgängig Test- und Wertschöpfungskette zwischen Zulieferern und OEMs sein.

Zur Erreichung von Aufgabenstellung II hat VVMethoden folgenden Ansatz angewendet:

Ansatz II: Entwicklung einer Absicherungsmethodik über alle Systemebenen, die hierarchisch heruntergebrochen werden kann auf die System- und Testanforderungen für verschiedene (Teil-) Komponenten.

- Transformation von Sicherheitskonzepten in Systemanforderungen.
- Strukturierte Anforderungsdefinition an Systeme.
- Entwicklung einer Referenzarchitektur mit verbindlichen Schnittstellen und definierten Integrations- und Absicherungsprozessen.

Die Aufgaben bzw. funktionalen Anforderungen an ein automatisiertes Fahrzeug können vereinfacht als „Erkennen“ → „Verstehen/Planen“ → „Handeln“ zusammengefasst werden. Eine passende funktionale Architektur würde dann die funktionalen Komponenten bzw. Subsysteme Perzeption → Verhaltensplanung → Aktuation beinhalten. Diese Architektur ist unabhängig von z.B. Geschwindigkeit oder Verkehrssituation. Die zentralen Sicherheits-, System- und Testanforderungen an Subsysteme und Komponenten können entlang solch einer generischen funktionalen Architektur beschrieben werden.

Ausgehend vom o.g. Ansatz zur Beantwortung von Aufgabenstellung I (der Entwicklung einer Methodik zur handhabbaren Reduktion des L4/L5-Testraums) wurden konkretisierte Verhaltensansprüche bzw. Sicherheitsanforderungen an das Gesamtfahrzeug gestellt, z.B. „in bestimmten Situationen bremsen“. Diese Gesamtsystem-Sicherheitsanforderungen wurden gemäß dem Ansatz zur Erreichung von Aufgabenstellung II (der Entwicklung einer Absicherungsmethodik über alle Systemebenen, die hierarchisch auf die System- und Testanforderungen für verschiedene (Teil-) Komponenten heruntergebrochen werden) mittels Engineering Methoden entsprechenden Sicherheits- und Systemanforderungen der Komponenten der funktionalen

Architektur vollständig zugeordnet. Zum Beispiel erfolgte „Situation erkennen“ in → Perzeption, „Verstehen, Planen und Entscheiden“ in → Verhaltensplanung, und die physische Aktuation „Bremsen“ erfolgte im → Bremsaktuator.

Basierend auf dem Ansatz zur Erreichung von Aufgabenstellung II konnte wiederum über Engineering Methoden und über eine strukturierte und durchgehende Sicherheitsargumentation ein Herunterbrechen von Systemanforderungen und Testanforderungen entwickelt bzw. abgeleitet werden. Eine effektive Nutzung des Ansatzes ergab sich dann, wenn die Sicherheitsargumentation des Fahrzeuges nahtlos auf der Sicherheitsargumentation der Komponenten und Subsysteme der funktionalen Architektur aufgebaut werden konnte.

Eine weitere wesentliche Anforderung an praxistaugliche Tests bestand in der Entwicklung von zugehörigen Testmaßen und -kriterien. Diese können grundsätzlich aus den Verhaltensansprüchen abgeleitet werden, also z.B. ob, wie stark oder wann genau gebremst werden muss in verallgemeinerter Form z.B. über die Zeit bis zu Kollision (TTC). Da die Verhaltensansprüche aus dem Ansatz zur Erreichung von Aufgabenstellung I u.a. aus den Risiken des Verkehrskontextes abgeleitet worden sind, war es möglich, risikobasierte Maßstäbe und Kriterien zu entwickeln, die die Grundlage waren, um zu entscheiden, ob ein Test „bestanden“ ist oder nicht. Durch die Schaffung von gegenseitig anerkannten Prozessen und Schnittstellen konnte ein realer Einsatz in der Folge gewährleistet werden.

Über das Herunterbrechen von Testanforderungen auf tiefere Systemebenen konnte die Komplexität und der Testaufwand schon während der Designphase abgeschätzt werden. Diese Fähigkeit wurde genutzt, um schon während des Designs die Testbarkeit praxistauglich zu berücksichtigen.

Als Resultat aus dem Vorgehen nach dem hier vorgestellten Ansatz II hat VVMethoden auf Basis einer Sicherheitsargumentation folgende Ergebnisse erarbeitet:

1. Methoden zur Ableitung von Sicherheitsanforderungen auf System/Sub-Systemen/Komponenten-Ebene aus den Sicherheitsanforderungen auf Fahrzeugebene.
2. Eine strukturierte Anforderungsdefinition an Systeme und Tests sowie die Definition eines neuartigen Testprozesses und Testvorgehens für die Absicherung von Level4/5-Systemen die Traceability, Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit von Testergebnissen über den gesamten Testprozess hinweg ermöglicht.
3. Metriken und Bewertungskriterien zur Freigabe von Level4/5-Systemen als Vorbereitung für die Standardisierung von Freigabetests für Level4/5-Systeme.

Zusammenfassung

Aufgabenstellung II: **Inkrementelles Testen von Subsystemen und Gesamtsystem**	
Ansatz	Ergebnisse
Entwicklung einer Absicherungsmethodik über alle Systemebenen, die hierarchisch auf die System- und Testanforderungen für verschiedene (Teil-) Komponenten heruntergebrochen werden kann. • Abbildung von funktionalen Ansprüchen auf Systemelemente und Herunterbrechen auf Sub-Systeme auf Basis einer durchgehenden Sicherheitsargumentation. • Ableitung von Testanforderungen inklusive Metriken.	• Methoden zur Ableitung von Sicherheitsanforderungen auf System/Sub-Systemen/Komponenten-Ebene aus den Sicherheitsanforderungen auf Fahrzeugebene auf Basis einer Sicherheitsargumentation. • Strukturierte Anforderungsdefinition an Systeme und Tests; Definition eines Testprozesses und Testvorgehens für die Absicherung von Level4/5-Systemen; Traceability, Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit von Testergebnissen über den gesamten Testprozess hinweg; Vorbereitung für die Standardisierung von Freigabetests für Level4/5-Systeme. • Metriken und Bewertungskriterien zur Freigabe von Level4/5-Systemen.

1.1.3 Aufgabenstellung III: Durchgängiges Testen über alle Testinstanzen

Ausgangssituation

Der reine Realfahrzeugversuch, wie er bei teilautomatisierten Fahrfunktionen zur Absicherung Anwendung findet, ist in seinem Umfang für diesen großen Testraum entweder nicht ausreichend oder in seinem Aufwand nicht leistbar. Die Simulation ermöglicht hier ergänzend einen skalierbaren Ansatz, um eine sehr große Anzahl von Szenarien in endlicher Zeit abtesten zu können. Zudem können z.B. konkrete Fahrsituationen bezüglich Einflussfaktoren simulativ variiert werden oder neue Kombinationen von Einflussfaktoren erzeugt werden, die so nicht in Realfahrten ermittelt wurden. Des Weiteren kann die simulative Erzeugung von Variationen real eingefahrener Fahrsituationen gezielt dafür genutzt werden, gefährliche Situationen zu erzeugen, die man mit einem Fahrzeug aus Sicherheitsgründen nicht einfahren kann.

Neben der Bewältigung eines enormen Testvolumens ist eine zentrale Herausforderung der Nachweis der fehlerfreien Funktion innerhalb dieser großen Anzahl von Tests, aber auch der Nachweis, dass die so gewonnenen Testergebnisse die Realität hinreichend gut abbilden. Hierbei ist das Zusammenspiel der Testinstanzen entscheidend. Die Nutzung der Simulation zur Prüfung hat gegenüber Realtests nicht nur den Vorteil, dass sie deutlich aufwandsärmer und zeitsparender ist, sie ist auch bezüglich der Variationsmöglichkeiten deutlich flexibler. Die zentrale Forschungsfrage in diesem Bereich war:

Aufgabenstellung III: Durchgängiges Testen über alle Testinstanzen.

Wie kann eine durchgängige Argumentationskette für den Sicherheitsnachweis aufgebaut werden, in der sich Simulation und Realtest so ergänzen, dass Aufwände für Realtests minimiert und der Nutzen der Simulation für die Absicherung optimiert werden?

Ansatz zur Lösung von Aufgabenstellung III in VVMethoden

VVMethoden hat den Ansatz verfolgt, Simulations- und Realtests eng zu verzahnen und so auszulegen, dass sie sich durch Nutzung ihrer jeweiligen Stärken ergänzen.

Wenn die Testfallbeschreibung und die Testergebnisse der verschiedenen Testinstanzen – d.h. sowohl von Realfahrzeugtests, Einzel- oder Mehrkomponententests als auch aus Tests innerhalb einer Simulation – nachverfolgbar und aufeinander abgestimmt sind, dann können die Stärken der jeweiligen Testinstanzen optimal genutzt werden. Auf diese Weise entstand die Möglichkeit einer umfassenden als auch effizient erzeugbaren Sicherheitsaussage. Tests in der Simulation und im Realfahrzeug mussten sich nahtlos zur Sicherheitsargumentation zusammenfügen lassen. Dazu musste der Nachweis erbracht werden, dass die Simulation die Realität hinreichend genau abbildet, so dass Teile der Tests in die Simulation verlegt werden können und im Zusammenspiel von Real und Simulationstests ein Sicherheitsnachweis möglich ist. Dies führte zu folgendem Ansatz:

Ansatz III: Erzeugung einer durchgängigen, effizienten Prüfkette von Simulation bis Realfahrten, die die jeweiligen Stärken der einzelnen Testinstanzen nutzt, so dass deren Ergebnisse effizient zu einer Gesamtsicherheitsaussage zusammengefasst werden können.

- Etablierung der Simulation als Rückgrat der Gesamttestinfrastruktur,
- Erarbeitung und Darstellung der durchgängigen Testmethodik und strukturierte Anforderungsdefinition an Testinfrastukturen,
- Aufbau einer kompletten Prüfkette von Simulation über Prüfstand bis zu Realfahrten, die einer Sicherheitsargumentation genügt.

Mit diesem Vorgehen hat VVMethoden ermöglicht, dass Testmittel durchgängig verwendet werden können – virtuelle und reale Testmittel wurden modular austauschbar und Tests konnten durchgängig in allen Testinstanzen durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind:

1. Sicherheitsnachweise für L4/L5-Fahrzeuge, die Simulationstests und Realtests optimal kombinieren,
2. Methoden zur durchgängigen Testbeschreibung über alle Testinstanzen sowie neuartige Bewertungsmetriken,
3. der Aufbau einer durchgängigen Absicherungsplattform und die Demonstration eines durchgängigen Sicherheitsnachweises für exemplarische L4/L5 Fahrfunktionen.

Zusammenfassung

Aufgabenstellung III: **Durchgängiges Testen über alle Testinstanzen. Testen von Subsystemen und Gesamtsystem.**	
Ansatz	Ergebnisse
Erzeugung einer durchgängigen, effizienten Prüfkette von Simulation bis Realfahrten, die die jeweiligen Stärken der einzelnen Testinstanzen nutzt und ermöglicht, dass deren Ergebnisse effizient zu einer Gesamtsicherheitsaussage zusammengefasst werden können. • Effiziente Verifikation und Validierung durch Skalierbarkeit verschiedener Testinstanzen wie z.B. Wiederverwendbarkeit von Testeingangsdaten, Vergleich der Testergebnisse der jeweiligen Testinstanzen untereinander. • Effizientes Zusammenfügen zu einer umfassenden Sicherheitsargumentation über einheitliche Schnittstellen, Formate und Bewertungsmetriken, zugehöriger Methodenentwicklung. • Aufbau einer Absicherungsplattform zur Demonstration der Umsetzbarkeit und Nachweis der Methode.	• Sicherheitsnachweis für L4/L5-Fahrzeuge durch optimale und effiziente Verzahnung von Simulationstests und Realtests. • Methoden zum durchgängigen Testen über alle Testinstanzen inkl. aufeinander abgestimmte Testbeschreibungen sowie zugehörige Bewertungsmetriken. • Aufbau einer Absicherungsplattform und Demonstration eines durchgängigen Sicherheitsnachweises für exemplarische L4/L5-Fahrfunktionen.

1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Die Voraussetzungen für eine effektive, effiziente und erfolgreiche Umsetzung der Projektziele des Vorhabens VVMethoden waren hervorragend, da

- das Gros der Konsortialpartner auf umfassende Erfahrungen in der Zusammenarbeit in vorwettbewerblichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten zurückgreifen konnte,
- viele Konsortialpartner in weiteren Forschungs- und Entwicklungsprojekten aktiv waren, innerhalb derer weitere relevante Aspekte der Verifikation und Validierung hochautomatisierter und autonomer Fahrzeuge untersucht wurden und derart der Transfer aktueller Ergebnisse - zur Projektlaufzeit - in das Vorhaben VVMethoden sichergestellt war und

- das Konsortium auf eine Vielzahl von – insbesondere auf Seiten der wissenschaftlichen Partner – verfügbaren digitalen Infrastrukturen und Datenquellen zurückgreifen konnte, auf diese aufgesetzt hat und im Rahmen des Vorhabens VVMethoden weiterausgebaut und qualifiziert hat.

Das Projekt VVMethoden konnte auf eine breite Beteiligung aller relevanten Partner aus Industrie und Wissenschaft bauen, die ihre Kompetenzen in Forschung und Umsetzung eingebracht haben. Damit wurden zum einen die Voraussetzungen für eine qualitativ hochwertige, termin- und budgetgerechte Umsetzung der Projektziele geschaffen. Zum anderen war dies der Garant dafür, dass die im Projekt VVMethoden erarbeiteten Lösungen relevant für die Industrie sind und langfristig eingesetzt werden.

Auf Seiten der Industrie beteiligten sich Unternehmen, die die Perspektive der OEM (Audi, BMW, Daimler, FORD, Opel, VW) und der Tier1 (BOSCH, Continental, Valeo, ZF AG) einnehmen. Darüber hinaus waren relevante Technologieprovider (AVL, dSPACE, PROSTEP, understandAI) mit eingebunden. Mit dem TÜV SÜD wurde ein Projektpartner in das Konsortium integriert, der über zentrales Know-how in der Homologation und in der regulativen Freigabe von Systemen im Fahrzeug verfügt.

Darüber hinaus waren die relevanten Wissenschaftspartner, die über zentrale methodische Kompetenzen für die Verifikation und Validierung automatisierter Fahrzeuge verfügen, in das Projekt eingebunden. Mit den Partnern DLR, ika, FZD, FZI, IfR, FhG und OFFIS, die während der Projektlaufzeit ein Institut des DLR wurden, konnten namhafte Wissenschaftsakteure aus dem universitären und außeruniversitären Bereich für die Arbeit am Projekt VVMethoden gewonnen werden.

Die Wissenschaftspartner haben einen entscheidenden Teil dazu beigetragen, dass die nötige, disruptive Effizienzsteigerung der Prüf- und Instanziierungsprozesse erreicht wurde. Ihnen kamen zentrale Aufgaben im Bereich der Entwicklung der Kritikalitätsanalysen, der Entwicklung von Sicherheitskonzepten sowie der Entwicklung von Testinfrastrukturen und Datenbanken (nicht wettbewerbsdifferenzierend) zu. Damit konnte gewährleistet werden, dass der vorwettbewerbliche Ansatz von VVMethoden diskriminierungsfrei umgesetzt wurde und dass die Ergebnisse bei allen Industriepartnern zeitnah und effizient Eingang in die Wertschöpfungskette gefunden haben.

Nur im Zusammenspiel aller beteiligten Partner im Wertschöpfungsprozess konnte sichergestellt werden, dass die zu erarbeitenden Lösungen für den Einsatz in der Industrie geeignet sind. Die große Zahl an Varianten von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Ausstattungen an Sensoren und Komponenten sowie die hohe Geschwindigkeit, mit der neue Komponenten entwickelt werden, bedingt neue Konzepte für Verifikation und Validierung. Bereits für das Zusammenspiel zwischen Zulieferern verschiedener Ebenen und Fahrzeugherstellern während der Entwicklung neuer Systeme mussten daher gemeinsame Methoden und akzeptierte Systematiken gefunden werden.

Das starke Zusammenwirken der Partner wurde auch in der Projektorganisation deutlich: Industrie und Wissenschaftspartnern haben die Verantwortung und Führung des Projektes gemeinsam („Doppelspitze“) wahrgenommen (siehe auch folgende Tabelle).

Teilprojekt	TP-Leitung Industrie	TP-Leitung Wissenschaft
TP1: Rahmenbedingungen und Impulsgeber	Opel	IfR
TP2: Kritikalitätsanalyse	**ZF AG**	DLR (ehemals OFFIS)
TP3: Sicherheitsanalyse und funktionale Architektur	BOSCH	IfR
TP4: Regelwerk System- und Testanforderungen	Mercedes-Benz	FhG
TP5: Simulationssteuerung	TÜV Süd	DLR
TP6: Datenbereitstellung	AVL	FZD
TP7: Exemplarische Testumgebung und -Anwendung	**ZF AG**	FZI
TP8: Datenbanken	AVL	ika
TP9: Prozess Instanziierung, kontinuierlicher Verbesserungsprozess, Anwendung und Bewertung	PROSTEP	-

1.3 Planung und Ablauf

1.3.1 Planung

VVMethoden hat als vorwettbewerbliches Verbundprojekt die nötigen Stakeholder und Kompetenzträger aus Industrie und Wissenschaft zusammengebracht, um die Projektziele effizient zu verfolgen und die entstandenen Ergebnisse nah an den Bedürfnissen der Industrie bereitzustellen. VVM ist ein Projekt der VDA Leitinitiative autonomes und vernetztes Fahren und als solches auch Mitglied der Pegasus Projektfamilie zu der neben VVMethoden die Projekte Pegasus und Set Level gehören. Im Vorläuferprojekt Pegasus wurden wichtige Ansätze und Ergebnisse erarbeitet auf denen VVM aufbaut, Set Level als zeitlich überlappendes Projekt war inhaltlich direkt mit VVMethoden verbunden, dort wurden Simulationen und Simulationsmodelle entwickelt, deren Anforderungen in VVMethoden erarbeitet wurden.

1.3.1.1 Teilprojekte

Die große Zahl von neun Teilprojekten spiegelt die vielfältigen Arbeitsgebiete wider, die zur Bewältigung der komplexen Aufgaben beigetragen haben. Die Teilprojekte 1 "Rahmenbedingungen und Impulsgeber" und 9 "Prozess Instanziierung, kontinuierlicher Verbesserungsprozess, Anwendung" hatten dabei projektübergreifende Sonderfunktionen und waren mit allen anderen TPs in kontinuierlichem Austausch.

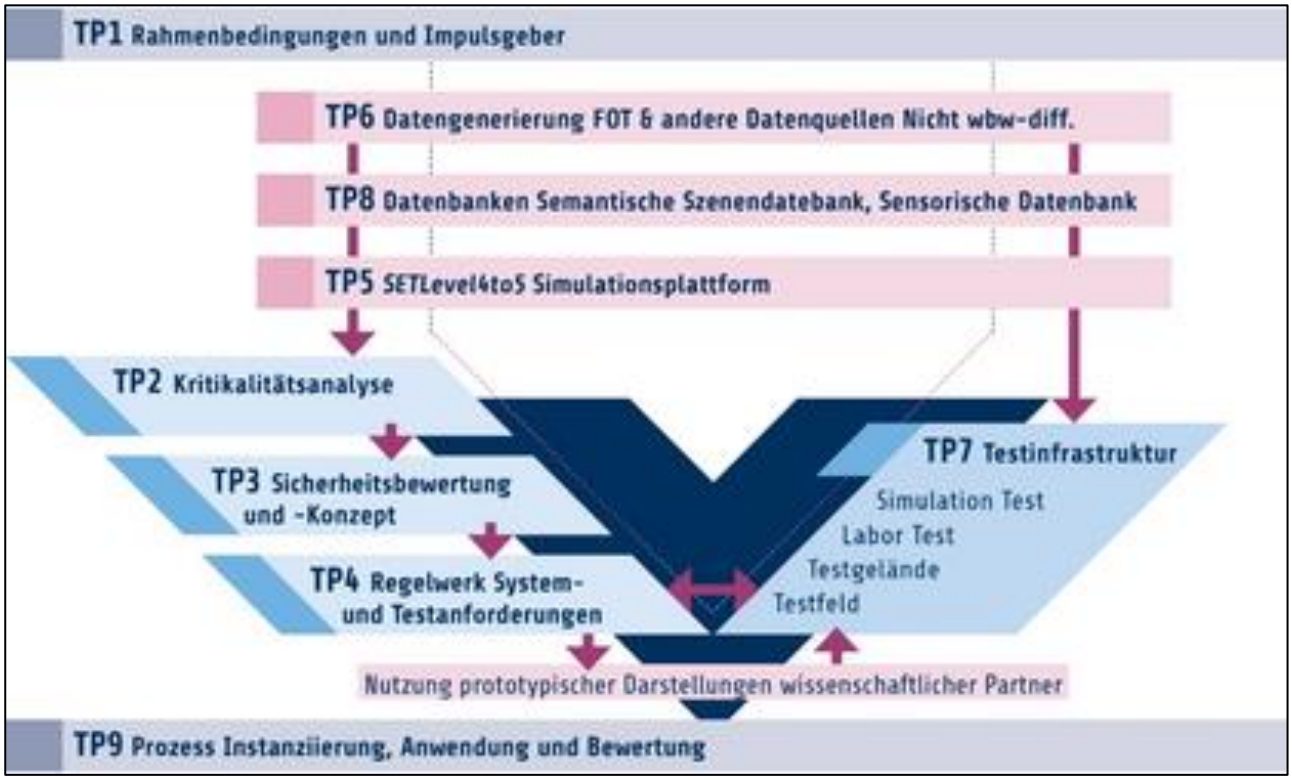


Abbildung 1: Die Teilprojekte in VVM und deren Zusammenhang

TP1 Rahmenbedingungen und Impulsgeber fungierte als Befähigungs-TP, das zu Beginn umfassende Rahmenbedingungen sicherstellt und im weiteren Verlauf darauf achtet, dass eine gesamtheitliche Projektperspektive beibehalten wird. Die unterschiedlichen Erkenntnisstränge wurden zusammengefügt und -gehalten um ein kohärentes und nutzbares Gesamt-Projektergebnis zu erreichen. Dieser starke inhaltliche Aspekt wurde durch die in einem Projekt dieser Größe nötigen, vielfältigen administrativen Aufgaben ergänzt. Eine weitere wichtige Aufgabe von TP1 bestand in der Ergebnisverbreitung um zu gewährleisten, dass die VVM-Ergebnisse in der internationalen Fachcommunity kommuniziert wurden, diskutiert werden und letztlich Eingang in die nötigen Gremien finden.

In **TP2** Kritikalitätsanalyse wurden, aufbauend auf den Anforderungen, Anwendungsfällen und Metriken aus TP1 die Methoden der Kritikalitätsanalyse entwickelt, die in die Sicherheitsanalysen von TP3 und in die Erstellung der Gesamtmethodik von VVMethoden (TP1) einfließen. Weiterhin lieferte TP2 Anforderungen an Simulationsplattformen (TP5) und an die Datenerhebung aus Realfahrten (TP6) aus Sicht der Kritikalitätsanalyse.

In **TP3** Sicherheitsanalyse und funktionale Architektur wurden aus den Kritikalitätsanalysen von TP2 Sicherheitsanalysen entwickelt aus denen wiederum Sicherheitskonzepte für TP4 abgeleitet wurden. Das beinhaltete globale und lokale Betrachtungen sowie deren Interaktion.

TP4 Regelwerk System- und Testanforderungen hat, basierend auf den in TP 3 durchgeführten Sicherheitsanalysen, den daraus entwickelten Sicherheitskonzepten und der funktionalen Systemarchitektur dann System- und Testanforderungen für die Homologation abgeleitet. Ziel war

es, Methodiken zur Prüfung des Gesamtfahrzeuges über die Prüfung von Ansprüchen an Systeme/Sub-Systeme/Komponenten zu entwickeln, so dass Hersteller und Zulieferer getestete Systeme und Tests austauschen sowie Tests wiederverwenden können. Ebenso sollte die Methodik erlauben, die Testbarkeit der Sicherheit von Anfang an im Systemdesign zu berücksichtigen. TP4 widmete sich damit vornehmlich den Grundkonzepten II und III für die System- und Testanforderungen, die basierend auf einer Sicherheitsargumentation hierarchisch herunter gebrochen wurden.

TP5 Simulationssteuerung hat im Rahmen des Projektes VVMethoden die Simulationstechnologie und die Methoden zu ihrer Anwendung bereitgestellt. Dabei wurden zwei Hauptanwendungszwecke verfolgt, die Kritikalitätsanalyse im TP2 und die Absicherung von automatisierten Fahrzeugen und deren Komponenten (Sensorik, Fahrfunktionen etc.) im TP7. In der Kritikalitätsanalyse wurde sie zur Ableitung und Analyse relevanter Szenarien genutzt, an denen die Kritikalitätsphänomene studiert, präzisiert und bewertet werden können. Bei der Absicherung diente sie dem umfassenden Testen von Systemen oder Komponenten von Systemen.

Im **TP6** Datenbereitstellung wurden Messdaten generiert, aufbereitet und im Projekt zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden dabei durch wissenschaftliche Partner mit bestehenden Fahrzeugen sowie durch AVL mit einem für das Projekt aufgebauten Versuchsträger erzeugt. Zusätzlich wurden in der Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM) Daten einer Braunschweiger Kreuzung erhoben. Weitere Daten lieferte das Karlsruher Testfeld automatisiertes Fahren (TAF) sowie die mobile Messtechnik des FhG-IVI.

In **TP7** Testvorgehen wurden die Testanforderungen aus TP4, die Simulationswerkzeuge aus TP5, die in TP9 ermittelten wettbewerbsdifferenzierenden Anforderungen sowie Anforderungen und Vorarbeiten aus Forschungsprojekten wie bspw. PEGASUS verwendet, um daraus ein Testvorgehen für die Absicherung von L4/L5-Systemen zu entwickeln. Dies hat insbesondere das identifizierte technisch/wissenschaftliche Arbeitsziel III „Nahtloses Testen über alle Testinstanzen“ adressiert.

Kernziel von **TP8** Datenbanken war die Verarbeitung der im Projekt benötigten und erzeugten Daten in einer zentralen Datenbank. TP8 hat somit die technische Basis für die Erzeugung einer durchgängigen, effizienten Prüfkette von Simulation bis Realität zur Verfügung gestellt.

TP9 Prozess Instanziierung, kontinuierlicher Verbesserungsprozess, Anwendung hatte zu Aufgabe der Anforderungen der Industriepartner zu sammeln und zu bündeln, insbesondere die der Projektpartner, die nicht an den entsprechenden TPs 2-8 beteiligt waren ("Brückenfunktion"). Außerdem wurden dort die Erkenntnisse aus der praktischen Erprobung der im VVMethoden-Projekt entwickelten Methodik durch die Industriepartner in das VVMethoden-Projekt konsolidiert und zurückgemeldet, („Erkenntnismotor aus industrieller Anwendung“).

1.3.1.2 Projektphasen

Die Arbeiten in VVMethoden wurden in drei Phasen konzipiert, wie in Abbildung XXX dargestellt:

- **Phase 1 – Ansatzphase** – Aufstellen der zentralen Ansätze auf Basis der Stand der Technik und im Wesentlichen auf Basis bestehender Daten.

- **Phase 2 – Vertiefungsphase** – Ausarbeitung und Konkretisierung der Ansätze auf Basis nicht automatisierter Fahrten und Einbeziehung der Simulation.
- **Phase 3 – Komplettierungsphase** – industriegerechte, effiziente Verknüpfung der Ansätze, Quercheck. Finale Einbeziehung von Automationsrisiken über Datenanreicherung auf Basis von Fahrten mit SAE-Level 4/5 Fahrfunktionen.

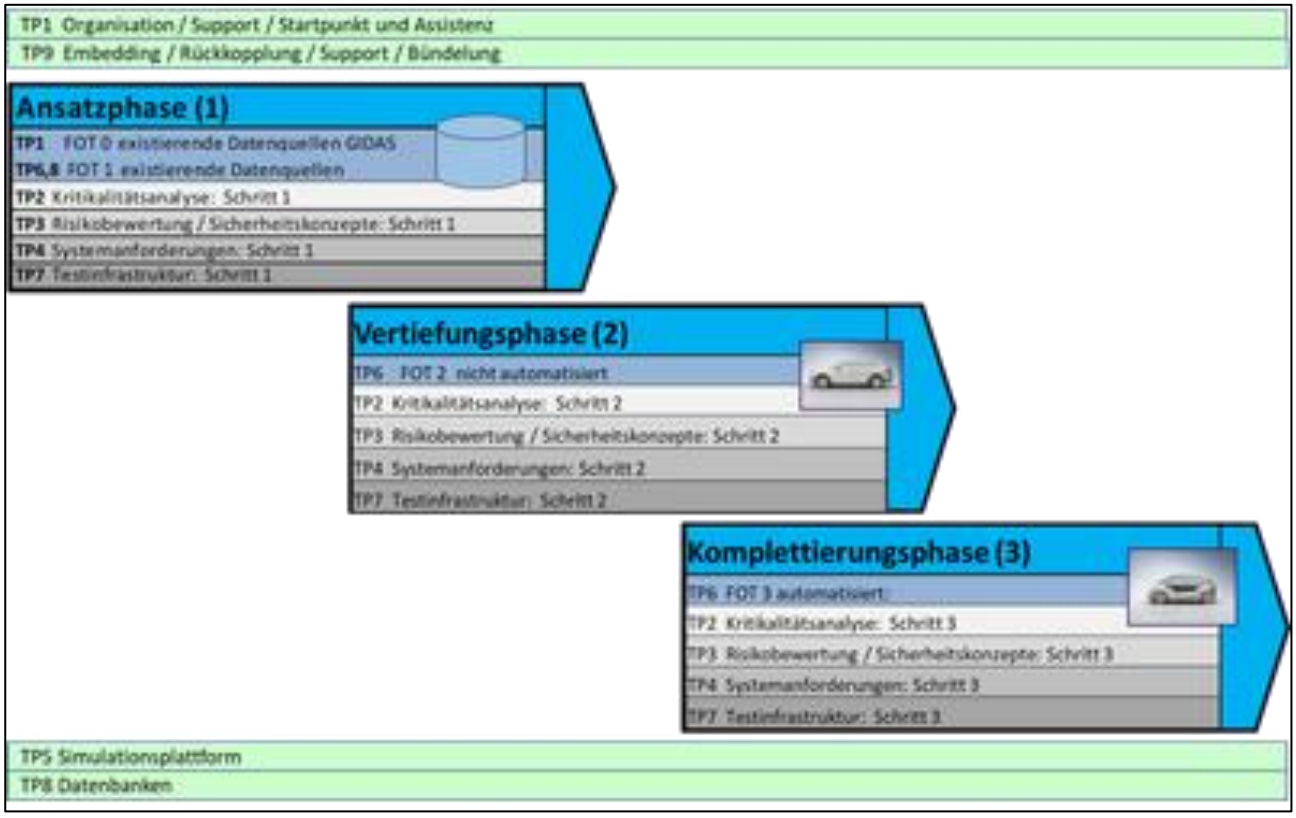


Abbildung 2: Die drei Arbeitsphasen in VVM

Durch diesen iterativen Ansatz wurde zum einen gewährleistet, dass neue Ansätze und Erkenntnisse, die außerhalb des Projektes entstanden sind, auch während der Projektlaufzeit aufgenommen werden konnten. Zum anderen konnten so schon frühe Versionen der Ergebnisse ausgeleitet werden, um sie bei den beteiligten Herstellern und Zulieferern zu erproben oder in externen Kreisen diskutiert und reflektiert werden.

1.3.2 Ablauf

1.3.2.1 Covid-19 Pandemie

Die Projektlaufzeit wurde initial von 07/2019 bis 06/2023 geplant. Damit fiel der Beginn der Covid-19-Pandemie in das dritte Projektquartal. Das hatte für VVM verschiedene Auswirkungen:

- Die kurzfristige Umstellung auf vollständiges Homeoffice hat zu Ausfällen, Nichtverfügbarkeiten und reduzierter Effizienz geführt, welche die Projektarbeit merklich verzögert haben.
- Die physischen Treffen wurden eingestellt und waren erst sehr spät wieder in der geplanten Breite möglich. Dies betraf nicht nur die klassischen Arbeitsmeetings und Konsortialtreffen, die einen großen Teil der Projektlaufzeit als Videokonferenzen abgehalten werden mussten, oder die Halbzeitpräsentation, bei der nur ein Redner-Rumpfteam zusammen kam während alle Zuschauer remote teilnehmen mussten.
- Zur tieferen Reflektion der Ansätze und um früh und mehrfach die Projektergebnisse mit der Fachcommunity zu diskutieren waren am Ende jeder Projektphase "Offene Treffen zur Ergebnisverbreitung" vorgesehen, die in dieser Form nicht stattfinden konnten.
- Außerdem war in TP9 verankert die Industriepartner aufzusuchen und deren Feedback zu (1) Anforderungsmanagement, (2) Harmonisierung Werkzeugschnittstellen und Dateiformate und (3) Instanziierung der Verifikations- und Validierungsmethodik einzuholen, um es aufzubereiten und in das Projekt zurückzuspielen. Auch das musste remote durchgeführt werden.

Um die ambitionierten Projektziele auch unter diesen Umständen zu erreichen, wurde eine kostenneutrale Projektverlängerung von sechs Monaten beantragt, die vom Projektträger bewilligt wurde.

1.3.2.2 Rückzug Visteon

Im ersten Halbjahr 2020 erklärte der Konsortialpartner Visteon seinen Rückzug aus dem Projekt. Der Großteil der von Visteon zu erbringenden Arbeitsinhalte war zu diesem Zeitpunkt noch nicht erbracht. Die Konsortialführung hat daraufhin große Anstrengungen unternommen für alle diese Beiträge Konsortialpartner zu finden, die sie übernehmen könnten. Dies gelang und wurde in einer überarbeiteten Vorhabenbeschreibung dokumentiert. Nachdem der Projektträger seine Zustimmung zur veränderten Arbeitsteilung und daran gekoppelt zur ebenfalls modifizierten Budgetverteilung gegeben hatte, wurde der Rückzug zum 30.06.2020 in einer Austrittsvereinbarung zum Konsortialvertrag juristisch festgeschrieben.

1.3.2.3 Erweiterung Datenbankkonzept

Ebenfalls im ersten Halbjahr 2020 wurde klar, dass das in TP8 verankerte Datenbankkonzept erweitert werden musste. Geplant war in der Vorhabenbeschreibung eine zweigeteilte, zentrale Datenbank, die einerseits Szenarien und andererseits Sensordaten und gegebenenfalls deren Annotierungen enthalten sollte. Mit diesem Ansatz hätte die für alle Projektpartner zugängliche Sensordatenbank aber bis zur Anonymisierung auch personenbezogene Daten enthalten. Die

durch die DSGVO deswegen nötigen rechtlichen Absicherungen hätten allerdings beträchtliche juristische Abstimmungen mit unabsehbaren zeitlichen Konsequenzen nach sich gezogen. Dankenswerterweise hat der in TP8 federführende Industriepartner AVL angeboten eine zusätzliche Rohdatenbank mit stark eingeschränktem Zugriff aufzubauen ("Safety Cage") um dieses Problem zu umgehen.

Außerdem wurde der starke Bedarf für einen vielseitigeren Zugriff auf die Szenariendatenbank sowie deren Erweiterung zu einer Entwicklungsdatenbank erkannt, mit der andere TPs partnerübergreifende und iterative Auswertungen zur Identifikation und Plausibilisierung von Kritikalitätsphänomenen und Wirkzusammenhängen durchführen können. Hier konnte das ika mit dem ITCenter der RWTH eine Lösung anbieten und mit der dort betriebenen Forschungsdatenbank CoScInE den benötigten Service bereitstellen.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

1.4.1 Wirtschaftliche, technische und wissenschaftliche Ausgangssituation

Die industrieseitige Freigabe von autonomen Fahrfunktionen SAE-Level 4/5 [11] konfrontiert die Automobilindustrie mit der Herausforderung, dass etablierte Verifikations- und Validierungsmethoden über Realfahrten durch die immer höheren Innovationsgeschwindigkeiten, die mit der Digitalisierung einhergehen, nicht mehr einsetzbar und nicht mehr effizient sind.

Gleichzeitig liefern reine Computersimulationen nicht die notwendige Sicherheit für die Verifikation und Validierung. Das Grundkonzept der im Projekt verfolgten Lösung war es, eine Methodik für eine Kombination von Simulationstests bis Realtests zu entwickeln, die der Komplexität des erforderlichen Nachweises gerecht wird, und es erlaubt, einen Großteil der Tests simulativ oder mit Simulationsunterstützung durchzuführen (siehe Abbildung 4).

Für diese Kombination wurde eine Hierarchie von ineinandergreifenden Testumgebungen konzipiert, mit denen das Verhalten von L4/L5-Fahrzeuge und ihrer Systeme und Komponenten entlang aller Testinstanzen valide beurteilt werden konnte. Dafür wurden geeignete Methoden entwickelt, passende Werkzeuge zusammengestellt und deren Anwendung durch Prozesse beschrieben. Die Wirksamkeit des Verfahrens und seiner Übertragbarkeit in praktische Entwicklungsprozesse wurde anhand eines gemeinsamen Use Cases Urbane Kreuzung untersucht. Die Urbane Kreuzung ist mit ihrem Mischverkehr aus nicht-automatisierten und automatisierten Fahrzeugen, Radfahrern, Fußgängern, schienengebundenem und schienenlosem ÖPNV, etc. einer der komplexesten Use Cases für urbanes L4/L5-Fahren, der den Großteil der Herausforderungen, potenziellen Gefahren und notwendigen L4/L5-Sicherheitskonzepte abdeckt.

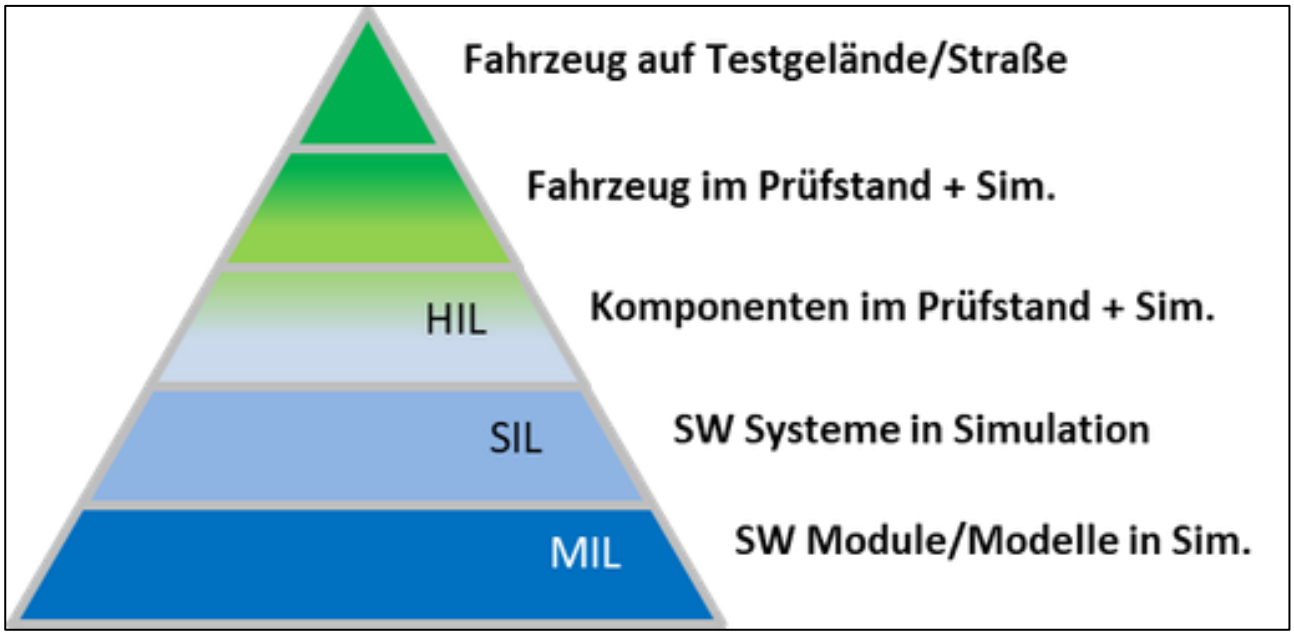


Abbildung 3: Konzept der Kombination verschiedener Testarten zur V&V von Systemen

Für die Ausführung der Tests wurden eine Transfer- und Austauschplattform der Testebenen und Integrationsstufen sowie die zugehörige Methodik entwickelt. Die Rolle der Hierarchie der Testformen – Xil-Simulationen, Prüfgelände, Feld – wurde neu definiert, da sich für die L4/L5-Absicherung auch Gehalt und Umfang der zu erzielenden Aussagen ändern. Jede der Techniken wurde erweitert, um die Vielgestaltigkeit des urbanen Raumes explorieren zu können. Durch den höheren Abstraktionsgrad der Situationsbeschreibungen haben sich auch neue Fragen der Tragfähigkeit von Ergebnissen gestellt.

Kritikalitätsauslösende Ereignisse können grundsätzlich aus Veränderungen der drei Elemente des Verkehrs – Fahrer, Fahrzeug und Verkehrssituation – resultieren: Ein plötzlich trotz L4-Automatisierung in das Lenkrad eingreifender Fahrer kann genauso die Kritikalität steigern wie eine Änderung des Fahrzeugverhaltens aufgrund eines Sensorfehlers, das Enden eines Fahrstreifens oder plötzlich einsetzender Starkregen. Aus der Unfallforschung war bekannt, dass die meisten Unfälle das Resultat eines Wirkzusammenhangs (=zeitlichen Kombination) mehrerer kritikalitätssteigernder Faktoren sind. Die systematische Ermittlung, Untersuchung und Absicherung dieser Wirkzusammenhänge war ein zentraler Ansatz des Projektes (Arbeitsziel I). Entscheidend für den Erfolg war, für das urbane Fahren Methoden zur Ermittlung und Beschreibung repräsentativer, parametrisierter Szenarien zu identifizieren, die alle statistisch relevanten Herausforderungen für automatische Fahrfunktionen umfassend darstellen. Diese wurden anhand des Use Case Urbane Kreuzung exemplarisch erarbeitet.

Ein zentraler Faktor dabei war die Sicherstellung der Durchgängigkeit des Ansatzes. Dieser musste nicht nur die zur Laufzeit des Projekts verfügbaren Daten berücksichtigen, sondern auch ermöglichen, dass künftige Erkenntnisse konsistent integriert werden können. Weiterhin war es essenziell, dass Adaptierbarkeit und Industrialisierbarkeit der Methoden und Prozesse sichergestellt wurden. Dieses Ziel wurde u.a. dadurch adressiert, dass die Szenarien (sowie die daraus abgeleiteten Sicherheitsprinzipien, s.u.) in einer herstellerunabhängigen Weise ermittelt und experimentell evaluiert wurden. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnte dann jeder

Marktteilnehmer eine Adaptierung der Erkenntnisse in die eigenen Entwurfs- und internen Freigabeprozesse vornehmen.

1.4.2 Stand der Technik bezogen auf das Projekt

Im Projekt wurde eine Methodik entwickelt, welche die in Abbildung 4 dargestellten Testarten zu einem durchgängigen L4/L5-Testkonzept verzahnt. In Kap. 1.4.6 bis 1.4.8 wird der Stand der Wissenschaft und Technik für diese einzelnen Ebenen beschrieben und die daraus resultierenden Herausforderungen sowie der in VVMethoden gewählte Ansatz.

Die oben beschriebenen technisch/wissenschaftlichen Aufgabenstellungen und Ansätze haben auf Technikbereichen aufgebaut, die nach dem Stand der Technik als Eckpfeiler in der Automobilbranche galten. Diese Technikbereiche werden im Folgenden beschrieben.

- **Kritikalitätsanalyse** – Bestandteil von Ansatz I
- **Methodik zur Ableitung von System- und Testanforderungen** – Bestandteil Ansatz II
- **Testprozess** – Bestandteil von Ansatz II / III
- **Model/SW-Testing (MiL/SiL)** – Bestandteil von Ansatz III
- **Komponententest (HiL)** – Bestandteil von Ansatz III
- **Testen im Fahrzeug** – Bestandteil von Ansatz III

Im Folgenden wird auf die Technikbereiche näher eingegangen. Sie beschreiben den Stand der Technik zu Beginn des Projektes.

1.4.3 Kritikalitätsanalyse – Bestandteil von Ansatz I

Kritikalität ist das Produkt aus potenzieller Unfallwahrscheinlichkeit und Unfallschwere. Die im Projekt entwickelte Methodik „Kritikalitätsanalyse“ hatte die Aufgabe, alle statistisch relevanten verkehrlichen Wirkzusammenhänge, die die Kritikalität von Verkehrssituationen erhöhen bzw. senken, zu identifizieren und zu beschreiben, um diese Wirkzusammenhänge über Sicherheitskonzepte und –mechanismen in L4/L5-Fahrfunktionen so zu verankern, dass Unfallrisiken minimiert werden.

Die Kritikalitätsanalyse untersucht dazu insbesondere Verkehrssituationen, welche

- aus sich heraus bereits als kritisch zu betrachten sind (etwa Situationen, in denen das Fahrzeug nicht mehr ohne Mitwirkung weiterer Verkehrsteilnehmer einen Unfall vermeiden kann; Situationen, in denen nicht alle beteiligten Verkehrsteilnehmer die Situation adäquat erfasst haben oder Situationen, in denen Verkehrsteilnehmer unerwartetes Verhalten zeigen),
- überdurchschnittlich häufig obige Situationen nach sich ziehen und
- überdurchschnittlich häufig aus obigen Situationen heraus entstehen.

Im Unterschied zu der in der ISO 26262 verankerten Gefahrenanalyse und Risikobewertung geht es dabei also nicht nur darum, das von dem Betrieb des Fahrzeugs ausgehende Risiko zu

identifizieren (um diese Risiken im Entwurfsprozess hinreichen zu mittigeren), sondern insbesondere auch darum, die Entstehung kritischer Verkehrssituation in der Umgebung des Fahrzeugs möglichst umfassend zu ermitteln und darzustellen.

Während bisher Kritikalität die Bedeutung eines Teilsystems im Hinblick auf Gefahrenentstehung im Gesamtsystem beschreibt, wird im Folgenden unter diesem Begriff die Bedeutung von abstrakten Verkehrssituationen (Phänomene) im Hinblick auf Gefahrenentstehung im Gesamtverkehrssystem verstanden. Solche Situationen sind in aller Regel nicht statisch, sondern können oft nur mit einer gewissen zeitlichen Tiefe erfasst werden („Fahrtrichtungswechsel ohne vorausgehendes Blinken“), so dass zu ihrer Beschreibung in der Regel Szenarien verwendet werden.

Beim Entwurf von eingebetteten Steuerungssystemen spielten obige Kritikalitätsphänomene bisher eher eine untergeordnete Rolle und wurden allenfalls beim Entwurf von Fahrerassistenzsystemen – im Hinblick auf die Assistenzfunktion – untersucht. Der Umgang mit Kritikalität war allein die Aufgabe des Fahrers und es musste im funktionalen Sicherheitsprozess nach ISO26262 „nur“ sichergestellt werden, dass die Entscheidungen des Fahrers zur Umgehung solcher Kritikalität durch die fahrzeugseitige Technik korrekt umgesetzt werden. Bei vollautomatisierten und autonomen Fahrzeugen muss zusätzlich die adäquate Umsetzung der automatisierten Fahrfunktion überprüfbar dargestellt werden, wobei bisher praktisch keine Ansätze für eine umfassende Analyse solcher Verkehrssituationen im urbanen Raum existieren.

So hat der hier verfolgte Ansatz weitestgehend existierende Kritikalitätsindikatoren aufgegriffen und – darauf aufbauend – eine Methode plus zugehörige Metriken etabliert und für das urbane Umfeld angewendet, welche eine Vervollständigung dieser Indikatoren erlaubt hat, wobei Einschränkungen oder fehlende Differenzierungen in bestehenden Ansätzen zu berücksichtigen waren. So wurden etwa die in [22] aufgeführten Kritikalitätsbedingungen weitestgehend aus physikalischen Gegebenheiten/Zwänge einer Unfallentstehung abgeleitet. Sie gestatteten damit keine Differenzierungen betreffend günstiger/ungünstiger Umweltbedingungenbedingungen, bestehender/fehlender Unfallvermeidungsmöglichkeiten durch andere Verkehrsteilnehmer, autonome/nicht-autonome Fahrzeuge etc. Strategien zur Vermeidung solcher „physikalischen“ Kritikalitäten müssen mangels hinreichender Differenzierung extrem defensiv ausgelegt sein und würden im urbanen Umfeld zu Verkehrsbehinderungen und daraus resultierenden weiteren Verkehrsgefährdungen (riskante Überholmanöver anderer Verkehrsteilnehmer) führen.

In [23] wurde eine Methodik skizziert, mit der Referenzszenarien aus den drei Datenquellen „Unfalldaten“, „natürliche Fahrdaten“ und „Versuche zur Analyse des Fahrverhaltens“ identifiziert und beschrieben werden können. Die Ergebnisse zeigten auf, dass Kritikalitätsindikatoren nicht „linear“ interpretiert werden können und dass bei der Erfassung kritischer Wirkzusammenhänge auch etwa Schweregrade von potenziellen Unfällen erfasst werden müssen. Ferner zeigte die Arbeit die Schwierigkeiten auf, die bei der Rekonstruktion des für das Unfallgeschehen ursächlichen Szenarios auftraten.

1.4.4 Methodik zur Ableitung von System- und Testanforderungen – Bestandteil Ansatz II

L4/L5-Systeme agieren per Konstruktion selbständig in Situationen, die bei der Entwicklung der Systeme nicht explizit berücksichtigt wurden. Ihre Verhaltensgrenzen waren dabei nicht genau bekannt und somit fehlte die Grundlage, um über Konsequenzen von Fehlverhalten,

beziehungsweise über Abweichungen von einem als sicher angenommenen spezifizierten Verhalten nachzudenken und diesbezüglich konkrete Sicherheitsziele abzuleiten. Viele Arbeiten in der Safety-Forschung haben sich mit dieser Problematik beschäftigt. Alle Lösungen hatten gemeinsam, dass sie versuchten, das Risiko bezüglich ganz allgemeiner Unfallarten zur Laufzeit zu bestimmen und zu kontrollieren, wobei ein dynamisches Risikomanagement anwendungsdomänenübergreifend im Kontext von Avionik [25], Robotik [26], [27], [28], und Automotive [29] vorgeschlagen wurde. Dieses Risikomanagement muss dabei auch in den System- und Testanforderungen berücksichtigt werden.

Die Normvorgaben der ISO 26262 [18] zur Ermittlung und Ableitung von Auslegungsspezifikationen, die wiederum in Testspezifikationen überführt werden müssen, gilt prinzipiell und ist vom Grundsatz her auch für das autonome Fahren zutreffend. Auch die darin vorgesehene Einstufung diverser Verifikationsmethoden ist vom Prinzip her relevant. Doch umfasste der gedanklich-konzeptionelle Hintergrund der dort definierten Vorgehensweisen und Maßnahmen nicht das Problem eines mit seinem Umfeld autonom interagierenden Fahrzeugs, das die potenziell gefahrbringende aktive Funktion in nahezu allen erdenklichen Situationen eigenverantwortlich aktivieren und in gefahrloser Weise nutzen soll. So stellt sich die Frage, welche Methodik zur Testfallableitung und Testspezifikation für diese Systemklasse geeignet ist und ggf. welche Aktivitäten und Betrachtungsweisen ergänzend anzuwenden sind. Dies hat eine Reihe von Fragestellungen bezüglich der Herangehensweise zur Erfüllung der Normanforderungen aufgeworfen.

Die Normung zur funktionalen Sicherheit und die darauf bezogene praktische Umsetzung bezogen sich in Ihrem damaligen Stand der Technik darauf, dass ein elektrisches bzw. elektronisches System (E/E-System) im Fahrzeug mit gefährdungsrelevanter Funktionalität der Autorisierung und Verantwortung eines Fahrers unterliegt. Dessen Verantwortung wurde der angemessene Fahrzeugbetrieb und auch die Möglichkeit einer Reaktion auf besondere Situationen oder Ereignisse bzw. auf Fehler des Systems soweit möglich mildernd oder verhindernd zugeschrieben. In L4/L5-Fahrzeugen ist der „Fahrer“ selbst ein E/E-System, das der Nachweisführung für funktionale Sicherheit unterliegt. Die Natur des Funktionskonzepts „autonomes Fahrzeug“ hat damit nicht nur den nach ISO 26262 abzusichernden Funktionsumfang erheblich erweitert, sondern hat grundsätzlich neue funktionale Aspekte hinzugefügt. Deren Absicherung durch systematische Testfallableitung, Testspezifikation und -umsetzung war bisher in der Praxis und der zugrundeliegenden Normung nicht thematisiert.

1.4.5 Testprozess – Bestandteil Ansatz II / III

Als grundlegendes Vorgehensmodell für die Produktentwicklung in der Automobilindustrie war das in Abbildung 6 dargestellte V-Modell etabliert [32]. Das V-Modell beschreibt ein strukturiertes und sequenzielles Vorgehen in der Entwicklung mit definierten Entwicklungsphasen [33].

Der linke absteigende Ast beschreibt Top-Down-orientierte Dekompositionsphasen in der Systementwicklung zur Spezifikation und Realisierung des Systems. Entsprechende Aktivitäten im Bereich Verifikation und Validierung sind zugehörig gegenüber als Bottom-Up-orientierte Integrations- und Prüfphasen eingeordnet.

Die Aktivitäten im rechten Ast des V-Modells prüfen entsprechend ihrer Stufe die Umsetzung der im linken Ast erarbeiteten Spezifikationen und Implementierungen. Automotive SPICE [34] ist als

Prozessreferenzmodell an das Vorgehen im V-Modell angelehnt und dient als Rahmenwerk für produktbezogene Entwicklungs- und Managementprozesse im Bereich der Elektrik/Elektronik für die Automobilindustrie. Konkrete Tätigkeiten und Arbeitsergebnisse für die verschiedenen Entwicklungs- und Testschritte sind definiert.

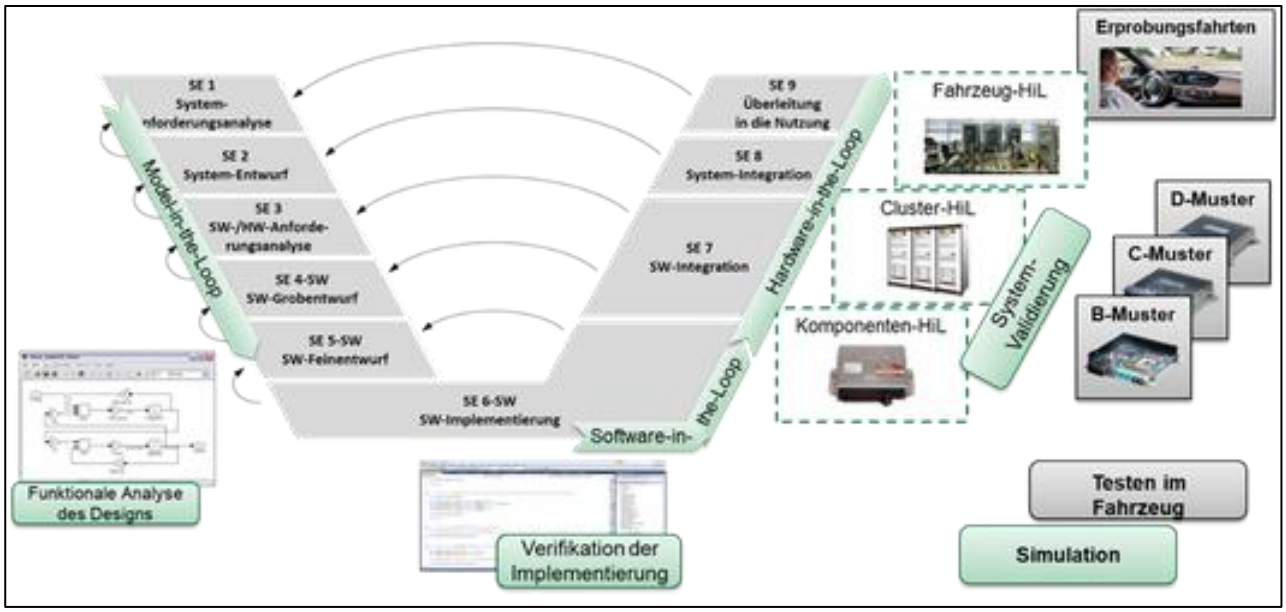


Abbildung 4: Validierung und Verifikation im Entwicklungsprozess

Der Test von Regelungssystemen erfordert einen geschlossenen Wirkungsweg um die Interaktion des Systems mit seiner Umwelt zu ermöglichen. Dieser Ansatz einer simulativen Absicherung wird auch als X-in-the-Loop (XiL) Methode bezeichnet [35]. Der Begriff „in-the-Loop“ impliziert dabei einen bidirektionalen Informationsfluss zwischen Testobjekt und Simulationsumgebung. Für die simulationsgestützte Entwicklung von Closed-Loop Systemen existieren für alle Stufen entlang des Entwicklungsprozesses spezialisierte Methoden.

Die drei gängigen Abstraktionsebenen sind Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL) sowie Hardware-in-the-Loop (HiL) [36] [37].

- Model-in-the-Loop (MIL) definiert den Einsatz einer Simulationsumgebung zur Generierung der Stimuli für die Entwicklung und den Test spezifizierter Funktionsmodelle (Modelle zur Abbildung des Fahrzeugsystems und seiner Umgebung) während des System- und Softwareentwurfs. Ziel der Analysen und Tests auf MiL-Ebene ist die Verifizierung des Entwurfs der logischen Systemarchitektur und der eingesetzten Algorithmen [38].
- Software-in-the-Loop (SIL) definiert den Einsatz einer Simulationsumgebung für die Ausführung und den Test von Seriencode auf Ebene der Softwaresystemarchitektur. Die implementierte Softwarekomponente wird dabei in die Basissoftware integriert auf einer virtualisierten Laufzeitumgebung betrieben [39]. Ziel der Tests auf SiL-Ebene ist der Nachweis der korrekten Funktionserbringung der Softwarekomponente im Kontext des Gesamtsystems und der Systemumgebung.

- Hardware-in-the-Loop (HiL) definiert den Einsatz einer Simulationsumgebung für die Ausführung und den Test der in die Zielhardware integrierten Softwarekomponenten unter Verwendung der technischen Systemschnittstellen. Auf HiL-Ebene wird zwischen Komponenten-, Cluster- und Integrationstests unterschieden [40]. Komponenten-HiL dienen der Prüfung der gesamten Komponente, nachdem die Software in das Steuergerät integriert wurde. Hier wird ausschließlich auf die Schnittstellen des späteren Einsatzes zugegriffen, es handelt sich also um ein charakteristisches Blackbox-Verfahren. Hier wird sowohl die Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen als auch das Zusammenspiel der Hardware und Software intensiv getestet. Auch Timing-Aspekte spielen eine essenzielle Rolle.

Beim Geräteverbundtest bzw. Systemverbund-Test (Cluster-HiL) wird das Zusammenspiel einzelner Subsysteme verifiziert. Fokus dieser Prüfung ist die Stabilität der Kommunikationsbusse und die Verträglichkeit der verschiedenen Steuergeräte unterschiedlicher Zulieferer im gemeinsamen elektrischen Versorgungsnetz. Zudem dient dies der Verifikation eines zusammenhängenden und verteilten Subsystems (bspw. Systemverbund Fahrerassistenz) [41]. Der Gesamtfahrzeugprüfplatz (Fahrzeug-HiL) verifiziert das Zusammenspiel aller im Fahrzeug enthaltenen E/E Systeme [42].

Um das ganze Fahrzeug auf Systemebene zu testen, werden klassischerweise in großem Umfang reale Versuchsfahrten angewendet. Diese können im ganzen Entwicklungsprozess im Rahmen von ersten Prototypen (Rapid Prototyping), Erprobungsträgern und Dauerläufern durchgeführt werden [43]. Zum Ende der Entwicklung hin sind diese insbesondere für eine Validierung der Systeme im Realbetrieb relevant. Für den Abnahmetest und die Zulassung des Fahrzeugs wird hierbei eine hohe Zahl an Testkilometern in Realfahrten benötigt. Diese werden beispielsweise bei Winter- und Sommererprobungen sowie bei länderspezifischen Erprobungen gesammelt. Dabei sind die Prüfbedingungen wie das Wetter und andere äußere Einflüsse genau definiert. Durch die hohe Zahl an benötigten Testkilometern, die hohen Kosten der Bereitstellung und Nutzung von Testfahrzeugen sowie die Anforderungen an gewisse, nicht beeinflussbare äußere Umstände ist die Zulassung durch Realfahrten ein sehr aufwändiges und kostenintensives Vorgehen.

Bei diesem klassischen Ansatz werden die durchzuführenden Testfälle in den unterschiedlichen Stufen im Rahmen von Testspezifikationen definiert und festgelegt. Hierbei sind die Tests systematisch aufgebaut und folgen einem stringenten Vorgehen. Basierend auf definierten Vorbedingungen werden einzelne Testschritte bspw. als Events festgelegt. Am Ende des Testschrittes werden die beschriebenen erwarteten Ergebnisse mit den Ergebnissen des Tests verglichen. Eine Aussage, ob der Test bestanden wurde, erfolgt über entsprechende Testauswertungen, bspw. binäre Entscheidungen (PASS/FAIL). Die Definition der einzelnen Testschritte sowie die Überprüfung des Testfalls erfolgen zumeist über dedizierte Signale bzw. Signalverläufe, somit sind die Tests zumeist synthetisch und basieren stark auf der Expertise des Testingenieurs [44].

Im Rahmen dieser Fahrzeugtests werden vom Testfahrer Erprobungskataloge abgeprüft. Diese stellen zumeist basierend auf Erfahrungswissen verschiedene Manöver bzw. Testfälle dar. Dem Testfahrer werden basierend auf einem Anfangszustand des Fahrzeugs verschiedene Manöver (analog zu Testschritten) vorgeschrieben. Zudem sind die erwarteten Ergebnisse festgehalten [45]. Zum Teil werden subjektive Bewertungen z.B. durch Testfahrer herangezogen, im Gegengewicht zur erhöhten Subjektivität steht eine hohe Realitätsnähe durch das Fahrzeug und die Umwelt.

Die Testabdeckung ermöglicht eine Abschätzung des Testumfangs und unterstützt die Bestimmung des Abschlusses eines Testumfangs [46]. Sie kann dabei Werte zwischen 0% und 100% annehmen. Häufig angewendete Strategien sind bspw. Anforderungsüberdeckung, Anweisungsüberdeckung, Zweigüberdeckung, Bedingungsüberdeckung sowie Parameterüberdeckung. In der Automobilindustrie verbreitet sind spezifische Abwandlungen und Erweiterungen der Metrik [47] [48], diese ergänzen zumeist die präsentierten Methoden um Testfälle basierend auf Erfahrungswissen.

1.4.6 Model/SW-Testing (MiL/SiL) – Bestandteil Ansatz III

Entsprechend dem Ansatz des Projektes VVMethoden waren zwei Hauptanwendungen von Modell- bzw. Softwaretests relevant.

1. Verhaltensexploration in der Kritikalitätsanalyse. Dies ist ein MiL-Test, wobei das Fahrzeug inklusive aller seiner Komponenten als insgesamt ausführbares Modell vorliegt. Das Modell umfasst den Bereich „Gesamtfahrzeug“ nach Abbildung 7. Dabei kann die interne Architektur des Modells von der Darstellung abweichen.
2. Validierung der Steuerungsfunktion des Fahrzeugs. Hier ist das Testobjekt der Bereich „Funktion“ nach Abbildung 8. Dabei wird die Produktsoftware getestet. Es handelt sich dann um einen SiL-Test.

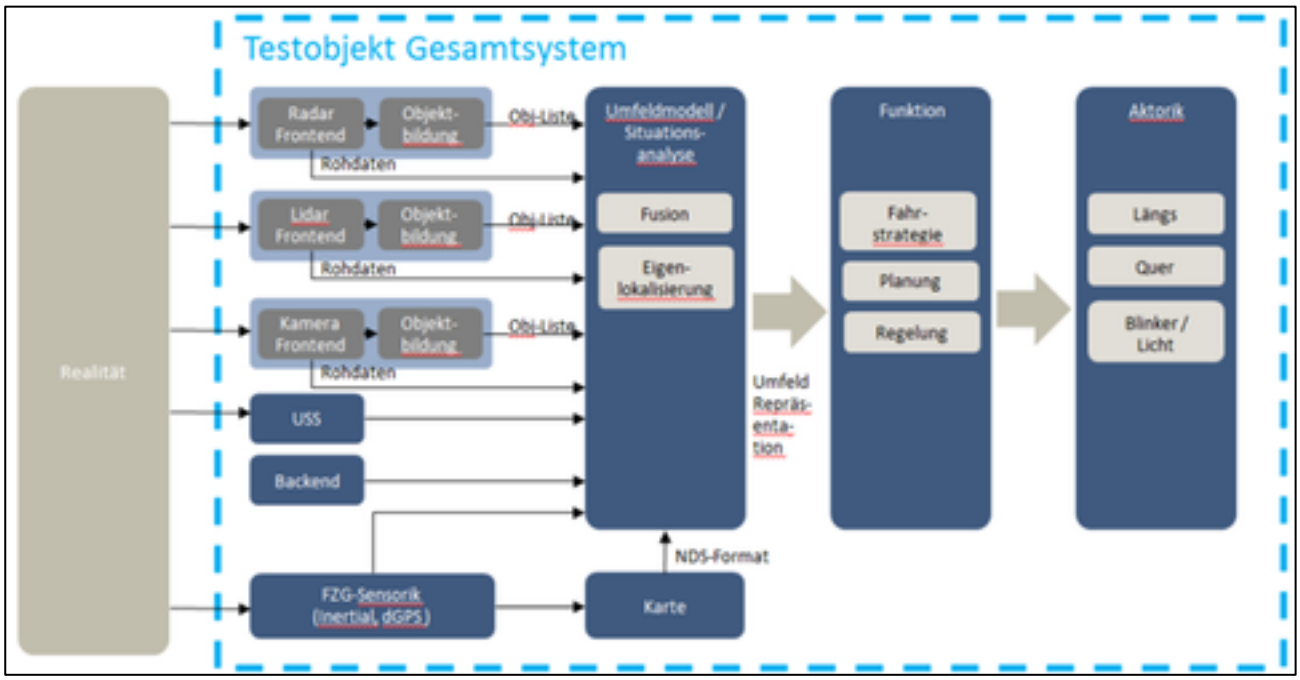


Abbildung 5: Testobjekt Gesamtfahrzeug (Darstellung aus PEGASUS, Testkonzept)

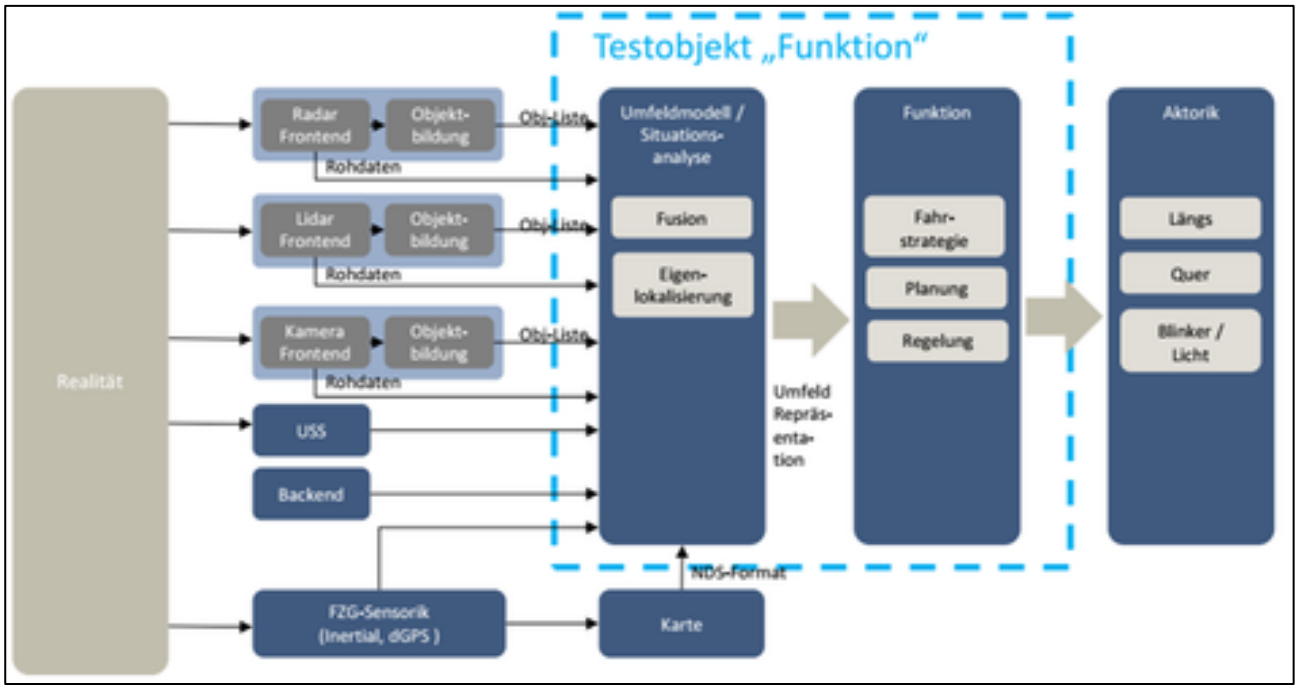


Abbildung 6: Testobjekt Fahrfunktion (Darstellung aus PEGASUS, Testkonzept)

Herstellerintern werden bei der Entwicklung weitere MiL- und SiL-Tests im Entwurfsprozess durchgeführt – z.B. eine Validierung von Modellen der Steuerungsfunktion, also eine MiL-Version des zweiten Anwendungsfalles. Da solche Tests aber stark von der herstellerspezifischen Ausgestaltung des Entwurfsprozesses abhängen, wurden sie in VVMethoden nicht näher betrachtet.

Konzeptionell gibt es keine großen Unterschiede zwischen MiL- und SiL-Tests. Letztendlich ist auch ein ausführbares Modell eine Softwarekomponente. Gemeinsam ist beiden auch, dass in der Testumgebung die Umweltdaten („Realität“) bereitgestellt und die Fahrzeugaktionen dort eingespielt werden müssen. Unterschiede bestehen allerdings in den technischen Randbedingungen und natürlich in den Anwendungsinstanzen im Projekt. Ein Modell, das einem MiL-Test unterzogen werden soll, ist in der Regel für diesen Zweck ausgelegt. Bei Produktsoftware ist dies (nur) dann gegeben, wenn die Simulationsarchitektur bei der Entwicklung berücksichtigt wurde. Kompatibilitätsaspekte haben hier eine Rolle gespielt und mussten zumindest herstellerintern berücksichtigt werden.

Neben pragmatischen Aspekten wie Verfügbarkeit, Lizensierung etc. bestimmen im Wesentlichen folgende Gesichtspunkte, inwieweit Simulationslösungen den Erfordernissen entsprechen.

1. **Interne und externe Schnittstellen der Simulation**. In der Automobilindustrie ist der FMI-Standard (Functional Mock-up Interface, [57]) für Simulationskomponenten bereits weit verbreitet. Speziell für Sensormodellierung gibt es das Open Simulation Interface (OSI [58]). Es war zu erwarten, dass zukünftig Simulationslösungen, die auf diesen Standards aufsetzen, das Feld dominieren werden. Bei den externen Schnittstellen ging es um die Testansteuerung inklusive der Testfälle und die Testergebnis-Bereitstellung.

2. **Zeitmodell der Simulation**. Idealerweise sollte eine Simulation so schnell ablaufen können, wie es die Ausführungsrechner erlauben. Dies erfordert jedoch, dass alle Komponenten entsprechende Zeitmodelle unterstützen. Insbesondere die Produktsoftware kann aus technischen Gründen auf eine Simulation unter Echtzeitbedingungen angewiesen sein. Das kann zu Problemen führen, wenn z. B. aufwendige Sensormodelle nicht echtzeitfähig sind.

3. **Realitätstreue bzw. Validität der Simulationsergebnisse**. Zu Projektbeginn waren weder Komponentenmodelle noch Umgebungsrepräsentationen ausreichend realistisch, als dass die Simulationsläufe stets präzise genug die realen Abläufe nachgebildet hätten.

4. **Höhere Simulationssteuerung**. Aufgrund der großen Testräume (in beiden Anwendungsfällen) war eine Teilautomation der Exploration des Verhaltensraumes notwendig. Dies konnte nur über eine enge Verzahnung der Testfallgenerierung mit deren Ausführung und Bewertung geschehen. Für dabei anzuwendende Algorithmen und Verfahren existierten vor Projektbeginn nur Konzepte, die weder detailliert für den praktischen Einsatz ausgearbeitet noch dort erprobt waren.

1.4.7 Gerätetest (HiL) – Bestandteil Ansatz III

Hardware-in-the-Loop (HiL) definiert den Einsatz einer Simulationsumgebung für die Ausführung und den Test der in die Zielhardware integrierten Softwarekomponente unter Verwendung der technischen Systemschnittstellen [39]. Auf HIL-Ebene wird zwischen Komponenten- und Integrationstests unterschieden. Beim Komponententest wird die korrekte Funktion eines individuellen Steuergeräts geprüft. HiL-Tests auf Komponentenebene verifizieren die korrekte Interaktion mit der elektrischen und mechanischen Hardware der Systemkomponente (bspw. Motorsteuergerät am Motorenprüfstand). Ein Integrationstest bspw. an einem Wirkkettenprüfplatz dient der Verifikation eines zusammenhängenden und verteilten Subsystems (bspw. Systemverbund Fahrerassistenz) - am Gesamtfahrzeugprüfplatz wird das Zusammenspiel aller im Fahrzeug enthaltenen E/E-Systeme verifiziert.

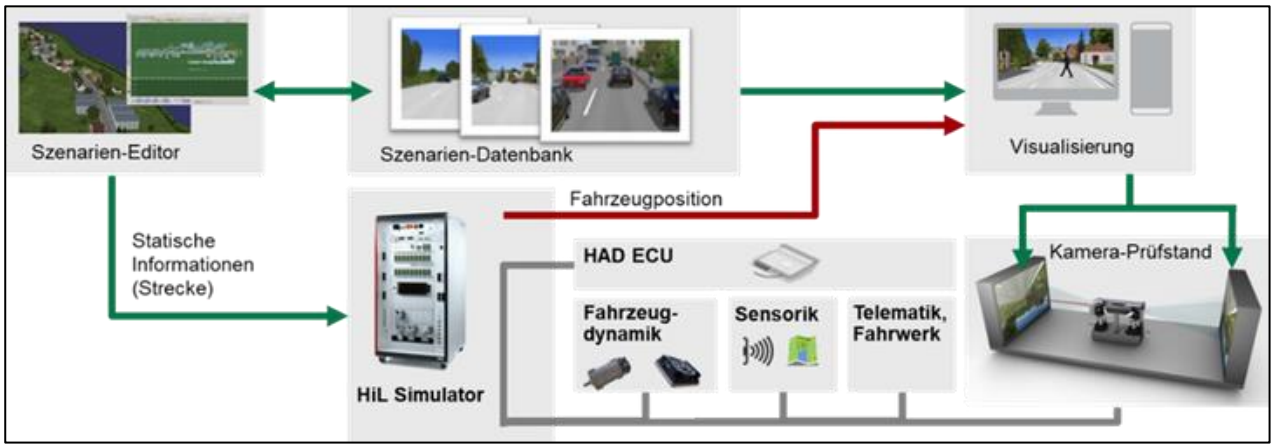


Abbildung 7: Schematische Beispielübersicht für die systematische Absicherung am FAS-Cluster-HiL [20]

In Abbildung 9 ist eine schematische Beispielübersicht für einen Systemverbund-HiL für Fahrerassistenzsysteme auf dem technischen Stand vor Projektbeginn abgebildet. Die reale Hardware ist hierbei einerseits das Steuergerät, auf welchem die Fahrerassistenzsysteme laufen, zudem ist die Fahrzeugdynamik sowie Teile der Sensorik (bspw. Frontkamera) ebenfalls als Hardware in Steuergeräten vorhanden. In einem zugehörigen HiL-Simulator wird nun die restliche Buskommunikation für den korrekten Betrieb der in Hardware verfügbaren Steuergeräte in Echtzeit simuliert. Hierbei werden die realen Systemschnittstellen (bspw. CAN, FlexRay, Ethernet) verwendet. Für reaktive Regelungssysteme wie beispielsweise einen Abstandsregeltempomat oder teilautomatisierte/hochautomatisierte Systeme muss auch die Regelstrecke für einen Closed-Loop-Test in der Simulation abgebildet sein [43]. Für Open-Loop-Systeme (bspw. Bildverarbeitungssysteme), welche keine Rückführung von Informationen beinhalten, ist keine Abbildung einer Regelstrecke notwendig.

Für die Erweiterung von HiL-Systemen in Richtung Fahrerassistenzsysteme wurden, neben der klassischen Simulation von Restbussen, zur Teststeuerung Fahrzeugsimulatoren wie Virtual Test Drive [60] oder CarMaker [61] angebunden. Diese ermöglichten die virtuelle Fahrt eines Fahrzeugs auf einer simulierten Strecke. Zudem konnten auch weitere Objekte im Umfeld des Testobjekts gesteuert und simulativ abgebildet werden. Verschiedene Szenarien-Informationen über mögliche Streckenabschnitte waren in einer Datenbank hinterlegt. Der HiL-Simulator erhielt die statischen Informationen über die Strecke eingespielt und gab die aktuelle Position des Ego-Fahrzeugs zurück, um daraus die Visualisierung der weiteren Verkehrsteilnehmer bzw. der Streckenumgebung zu ermöglichen. Somit konnten zum Test von Umfeldsensoriken auch weitere Verkehrsteilnehmer in die Simulation einbezogen werden. Zum Einspielen der Sensorinformationen über das Umfeld existierten verschiedene Ansätze [62]. Einerseits konnte diese direkt auf Objektebene erfolgen. Basierend auf der Position des Ego-Fahrzeugs wurden über die Simulation Objektlisten im definierten Format, welche zumeist aus einer Sensorverarbeitung kommen, wieder für die Steuergeräte eingespielt. Eine weitere Möglichkeit war es, auf Signalebene entsprechende Vorgaben synthetisch zu erzeugen und einzuspielen. In der dargestellten Abbildung ist auch die Kamera und komplette Verarbeitungskette in Hardware abgebildet, diese hat Monitore abgefilmt, auf denen das synthetische Umgebungsbild entsprechend der Ausrichtung eingeblendet wurde. Dies ermöglichte den integrierten Test der Kamera-Hardware.

Der HiL-Test wird als systematischer Test beschrieben. Im Rahmen einer übergreifenden Teststrategie wird eine Testspezifikation mit Testfällen erstellt. Die Testfälle orientieren sich zumeist an einer Abdeckung sämtlicher Anforderungen [47], auch andere Arten der Abdeckung können berücksichtigt werden. Systematischer Test heißt, alle zu testenden Fälle werden im Voraus definiert. Die Testfallbeschreibung erfolgt in folgendem Schema. Zunächst werden alle Vorbedingungen und Initialisierungen, welche für den Betrieb des Systems bzw. für das Bringen des Testobjekts in einen bestimmten Zustand benötigt werden, definiert. Im Anschluss erfolgt ein Event bzw. Aktion, (z.B. veränderter Signalwert, steigende Flanke, …) um das Testobjekt zu stimulieren [62]. Im letzten Schritt wird nun die Reaktion des Testobjekts auf die Stimulation angeschaut und gegenüber einer vorab ausgedrückten Erwartungshaltung (definiert bspw. in der Anforderung) überprüft. Eine binäre Auswertung (PASS/FAIL) erlaubt die einfache Auswertung des Testfalls.

1.4.8 Testen im Fahrzeug – Bestandteil Ansatz III

Testen im virtuellen Bereich konnte insbesondere bei regelnden Funktionen nicht das tatsächliche Fahrerlebnis in einer realen Umgebung ersetzen. Für die Validierung in realer Umgebung wurde in frühen Entwicklungsphasen das Rapid Prototyping mit umgebauten Versuchsträgern auf Basis hoch performanter Prototypensteuergeräte verwendet [40]. In späteren Phasen wurden Konzeptfahrzeuge, Erprobungsträger und Dauerläufer mit der realen Zielhardware genutzt. Um eine entwicklungsbegleitende Validierung zu ermöglichen, wurden Erprobungsträger mit unterschiedlichen Musterständen der Steuergeräte ausgerüstet [48]. Die Musterstände ermöglichten eine sukzessive Integration von Funktionen im Laufe der Entwicklung. Am Ende der Entwicklung wurde die Produktions- und Verkaufsfreigabe basierend auf den Ergebnissen der Test- und Qualifikationsphasen erteilt. Die Freigabe beinhaltete zudem die Ergebnisse von Winter- und Sommererprobungen sowie länderspezifischen Erprobungen [65].

Im realen Fahrversuch wurden Fahrzeuge unter spezifizierten Bedingungen im realen Betrieb getestet. Die durch professionelle Testfahrer durchgeführten Fahrversuche basierten dabei auf definierten Prüfkataloge [66]. Die Prüfung durch den Fahrversuch erfolgte sowohl auf öffentlichen Straßen als auch auf Prüfgeländen. Insbesondere die Validierung von sicherheitskritischen Fahrfunktionen wurde auf dezidierten Prüfgeländen durchgeführt, deren Verfügbarkeit sehr begrenzt ist [67]. Die Prüfkataloge basierten zumeist auf Erfahrungswissen bspw. aus vorherigen Baureihen sowie der Expertise des Ingenieurs. Hierbei wurde das Fahrzeug stets in einen definierten Ausgangszustand gebracht und anschließend Manöver beschrieben, welche der Testfahrer durchzuführen hatte. Am Ende des Manövers erfolgte die Auswertung subjektiv durch den Testfahrer, das Ergebnis wurde entsprechend dokumentiert. Zudem waren im Rahmen von Prototypenfahrzeugen sowie Erprobungsträgern zumeist Datenlogger verbaut, welche sämtliche Informationen aufgezeichnet haben. Diese haben es erlaubt, sich kritische Situationen nochmals im Labor anzuschauen und mögliche Ursachen zu identifizieren.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt VVMethoden hatte zwei wesentliche externe Anschlüsse: Zum einen hat es stark auf den Ergebnissen von PEGASUS aufgebaut. Zum anderen war der Austausch mit einem weiteren teilweise parallel laufenden Projekt fest eingeplant – SET Level 4to5. Außerdem konnte auf Vorarbeiten von Projektpartnern zurückgegriffen werden, und das Projekt hat aktiv den Austausch mit externen Partnern gesucht.

1.5.1 Zusammenarbeit mit SET Level 4 to 5

VVMethoden war Teil der Projektfamilie „Verifikation und Validierung“ der VDA-Leitinitiative autonomes und vernetztes Fahren. Zeitlich weitgehend parallel war ein weiteres Projekt aus dieser Familie in Vorbereitung: SET Level 4to5. Dort wurden Simulationsmethoden und -technologien entwickelt, die im Projekt VVMethoden eingesetzt werden konnten, während in VVMethoden wiederum Anforderungen erarbeitet wurden, die SET Level 4to5 zur Verfügung gestellt werden konnten.

Eine Zusammenarbeit der beiden Projekte hat die Effizienz in der Erreichung des übergeordneten Ziels beider Projekte erhöht: Da Informationen und Ergebnisse kontinuierlich während der Laufzeit der beiden Projekte ausgetauscht wurden, konnten die Erkenntnisse zum Testen von L4/L5-Systemen für den Einsatz im urbanen Umfeld zusammen mit Simulationsmethoden und -technologien schrittweise entwickelt und verfeinert werden (Kosten- und Zeiteffizienz).

Inhaltlich war in VVMethoden ein spezielles Teilprojekt (TP5) definiert, das die Simulationsplattform bereitgestellt und die Verbindung mit SET Level 4to5 hergestellt hat. Im SET Level 4to5 Projekt wurden die Simulationsmethoden sowohl für die Kritikalitätsanalyse als auch für die Testumgebung entwickelt. Das VVMethoden Projekt wiederum hat die Umgebung bereitgestellt, in der die Einsatzfähigkeit der Simulationsmethoden geprüft und verifiziert werden konnten.

Ein kontinuierlicher Austausch der fast parallel laufenden Projekte hat die Möglichkeit geboten, die Wirkung der beiden Projekte noch einmal deutlich zu steigern. Um jenseits der Einzelergebnisse dieses zusätzliche Potential zu heben, waren die relevanten Schnittstellen bzw. Austauschpunkte für den Ergebnistransfer zwischen den Projektpartnern beider Konsortien abgestimmt.

In VVMethoden war es Teil der Projektmanagement-Aufgabe, den Austausch zwischen den Projekten zu koordinieren. Mögliche oder nötige Adaptionen in der geplanten Zusammenarbeit wurden mit SET Level 4to5 abgestimmt und dann umgesetzt. Idealerweise wurde in beiden Projekten der Arbeits- und Zeitplan so eingelöst, dass die identifizierten Potentiale mobilisiert werden konnten. Bei Zielkonflikten hatten die Einzelinteressen von VVMethoden hier naturgemäß den höheren Stellenwert. Für das Projektmanagement von VVMethoden bedeutete dieser angestrebte und über die herkömmliche Kooperationspraxis hinausgehende Bezug eine zusätzliche Messgröße in der Fortschritts- und Ergebnisbewertung und wurde in die periodische Statusberichterstattung auf AP-, TP- und Gesamtprojektebene einbezogen.

Da in den beiden Konsortien eine hohe Überschneidung der Partner vorhanden war und beide Projekte in den Rahmen der VDA Leitinitiative eingebunden waren, ist ein hohes Interesse an der hier beschriebenen Potentialmaximierung vorhanden, so dass das Risiko eines solchen Außenbezugs begrenzt war. Sollten Ergebnisse aus SET Level 4to5 nicht in dem vorgesehenen Ausmaß in VVMethoden eingebracht werden können, so war vorgesehen, die fehlenden Beiträge in angemessener Form über die vorhandenen Simulationskompetenzen der beteiligten Häuser und Wissenschaftspartner auch unter Nutzung weiterer laufender Aktivitäten wie „Smart SE“ einzubringen. In diesem Fall wäre eine Bündelungsfunktion der Simulationsaspekte in TP9 durch Aufnahme und Bewertung der Simulationsansätze der Industriepartner erfolgt. In TP5 wäre dann die entsprechende Koordination der Simulationsansätze erfolgt.

1.5.2 Zusammenarbeit mit SmartSE

Das Projekt Smart Systems Engineering (SmartSE) wurde im Jahre 2012 mit dem Ziel, „smartes Systems Engineering“ zu etablieren von einem Industriekonsortium unter dem Dach des prostep ivip Vereins gestartet [79] [80]. Als Hauptanwendungsfall wurde der Austausch von Verhaltensmodellen von eingebetteten Systemen zwischen Entwicklungspartnern identifiziert. Während der ersten Projektphase wurden unterschiedliche Anwendungsfälle für den Austausch von Verhaltensmodellen identifiziert und diese im V-Modell „verortet“. Für den Austausch von Verhaltensmodellen wurden ein generischer Referenzprozess sowie das Verhaltensmodell-

beschreibende Begleitdokument entwickelt. Als Datenformat für den Austausch von Verhaltensmodellen wurde das neutrale „Functional Mockup Interface“ – FMI - [78] ausgewählt und dessen praktischer Einsatz in der Industrie validiert.

Während der zweiten Projektphase wurden zum einen die FMI-Begleitdokumente um eine Modellcheckliste erweitert und zum anderen FMI sowie dessen praktischer Einsatz in den Unternehmen weiter untersucht. Darüber hinaus wurden Anforderungen für zukünftige Versionen des FMI-Standards abgeleitet. Zur praktischen Erprobung der FMI wurde das FMI-Modell einer Drosselklappe und mehrere FMI-Fahrermodell inkl. aller Begleitdokumente erstellt und die (Simulations-) Ergebnisse verglichen. Außerdem wurden Anforderungen für ein phasen- und domänenübergreifendes Datenmanagement gesammelt, das die während der Entwicklung anfallenden Systems Engineering Objekte persistieren und verwalten kann.

In der dritten Phase des Projekts lag der Fokus auf der Erweiterung der Anwendungsfälle aus der ersten Projektphase, sowie der Identifikation von Maßnahmen für den IP-Schutz der FMI-Modelle. Außerdem wurde das Datenmanagement von Systems Engineering Objekten aufgegriffen und um spezifische Aspekte des FMI-basierten Modellaustauschs angereichert, sowie die industrielle Erprobung der FMI weiter vorangetrieben. In der dritten Projektphase neu hinzugekommen war zudem die Untersuchung der System Modelling Language (SysML [82]) für die phasen- und domänenübergreifende Modellierung von Architekturen sowie den Austausch von SysML-Modellen zwischen Entwicklungspartnern mittels des XMI-Standards und die Entwicklung eines Ansatzes für notwendige Standards zur Simulation von Electronic Control Units (ECUs) - virtuelle ECUs bzw. vECUs.

Im SmartSE-Projekt wurden und werden weiterhin grundlegende Methoden und Prozesse entwickelt, um die Interaktion zwischen Entwicklungspartnern zu verbessern. Die bisherigen Projektergebnisse wurden in Form einer Empfehlung („Recommendation“) unter https://www.prostep.org/mediathek/veroeffentlichungen veröffentlicht.

Im Projekt VVMethoden sollten diese Erkenntnisse aufgegriffen und weiterentwickelt werden. Außerdem sollten die im Projekt VVMethoden entstandenen Erkenntnisse zurück in das SmartSE-Projekt überführt werden. Im Projektplan war diese Aufgabe in TP9 angesiedelt.

Ein enger Austausch zwischen dem Projekt VVMethoden und dem SmartSE-Projekt war notwendig, um Synergieeffekte zwischen den Projekten zu nutzen und Doppelarbeiten zu vermeiden. Möglich war dies, da die wesentlichen Industriepartner (OEMs und Tiers) in beiden Projekten vertreten waren.

1.5.3 Einbindung assoziierter Partner

Das Konsortium war gegenüber der Einbindung weiterer Partner, jenseits der Konsortialstruktur, offen. Um das Ziel der Erstellung und perspektivisch nachhaltigen Etablierung eines Regelwerkes (TP4) zu erreichen, bedurfte es des Austausches und der Abstimmung mit relevanten Administrationen (z.B. der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)) und weiterer Prüforganisationen.

1.5.4 Offene Treffen zur Ergebnisverbreitung

Das Konsortium hatte einen umfassenden Austausch mit externen Stakeholdern geplant.

Hierfür notwendige Ressourcen wurden in den jeweiligen Teilprojekten abgebildet sowie Gegenstand der Unterbeauftragung eines Projektbüros (GUA2).

Mit Blick auf die definierte Ergebnisdokumentation hat es sich aus Sicht des Konsortiums angeboten, konkrete Ergebnisse definierten Stakeholder-Gruppen vorzustellen und zu diskutieren.

Durch die Projektstruktur mit drei Iterationsphasen lagen zu drei Zeitpunkten konsolidierte Ergebnisse vor, die sich hauptsächlich in den verwendeten Daten und den Reifegraden der Methodenentwicklung unterschieden haben. Um eine zeitnahe Übernahme der Projektergebnisse in die industrielle Wertschöpfungskette zu ermöglichen, wäre es sinnvoll gewesen, die entwickelten Konzepte und ihre technische Umsetzung zu allen drei Zeitpunkten der Fachöffentlichkeit vorzustellen. Die hätte bei den geplanten offenen Treffen zur Ergebnisverbreitung stattfinden sollen, die jeweils am Ende der Iterationsphasen geplant waren und damit in den Projektquartalen 8, 12 und 16. Aufgrund der Covid19-Pandemie konnte nur das erste dieser Treffen als Vor-Ort-Veranstaltung durchgeführt werden. Die verbleibenden zwei Treffen wurden dann als Onlineveranstaltung durchgeführt.

Die entsprechenden Inhalte wurden in den öffentlich zugänglichen Deliverables 03, 06 und 11 dokumentiert.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 TP1 Rahmenbedingungen und Impulsgeber

Im Teilprojekt 1 wurden umfassende Rahmenbedingungen gesetzt und zu Beginn eine gesamtheitliche Projektperspektive entwickelt, die als Impulsgeber und Ordnungsfunktion für das Gesamtprojekt im Bereich der Methodenentwicklung diente. Insbesondere wurden über die gesamte Projektlaufzeit hinweg Querschnittsthemen identifiziert und koordiniert. In diesem Kontext hat die ZF ihre Erfahrung und Sicht als TIER1 eingebracht, um ausgehend von der Analyse der PEGASUS-Methode die zentralen Rahmenbedingungen und Aufsatzpunkte zu entwickeln und die Projektaktivitäten auf die industrielle Anwendbarkeit hin auszurichten. Der besondere Schwerpunkt lag dabei auf der genauen Definition des Use Cases Urbane Kreuzung und der Erarbeitung des Bewertungskonzepts.

2.1.1.1 AP1.1

Innerhalb des AP1.1 hat ZF zur Identifikation von Anforderungen an VVM und zur Konsolidierung der Gesamtmethode beigetragen.

Zu Beginn des Projekts erfolgte eine Analyse des State of the Art, um davon ausgehend die Entwicklungsrichtung festzulegen und entsprechende Anforderungen an das Projekt zu entwickeln. In diesem Rahmen wurde gemeinsam mit den Partnern eine Analyse der PEGASUS-Methode durchgeführt und mit Vertretern des TP2 ein Review der Begriffsdefinitionen rund um das Themengebiet „Kritikalität“. Daneben erfolgte mit dem Förderprojekt SetLevel4to5 ein Abgleich der Begriffsdefinitionen und Methodik zur Erarbeitung eines Glossars.

Über die gesamte Projektlaufzeit hinweg hat sich ZF bei der Konsolidierung der Gesamtmethode mit einem stetigen Abgleich zwischen Projektergebnissen und initialer Ausrichtung eingebracht, u.a. über den in TP1 eingerichteten BOARD-Prozess zum Review von VVM-Ergebnissen. Insbesondere wurde zum Ende der Projektlaufzeit in einem Durchstich-Workshop die Struktur zur finalen Konsolidierung der Gesamtmethode geschaffen. Wesentliches Element zur Strukturierung aller Arbeiten im VVM-Projekt war dabei das Assurance Framework, das zusammen mit den Partnern entwickelt wurde. Im Folgenden sind die vier Perspektiven des Assurance Frameworks dargestellt:

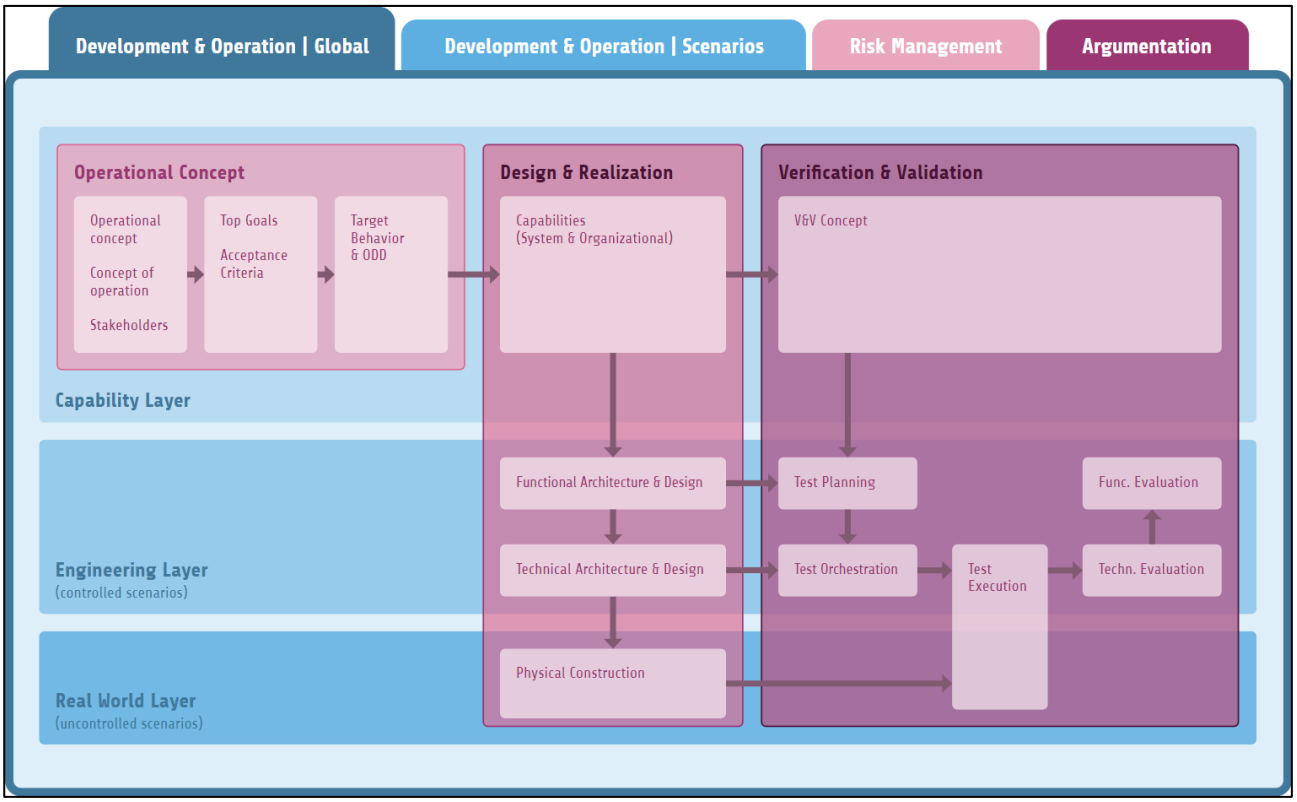


Abbildung 8: Assurance Framework - Development & Operation | Global

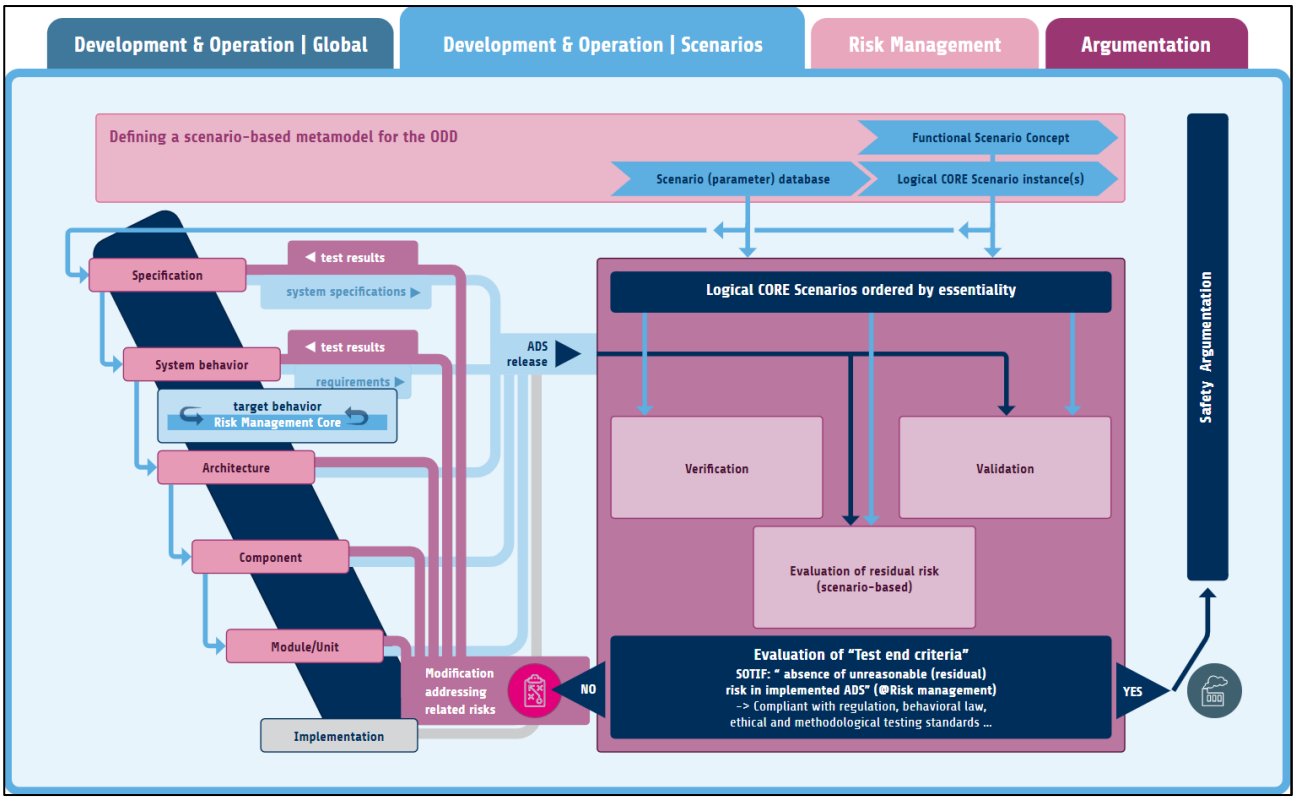


Abbildung 9: Assurance Framework - Development & Operation | Scenarios

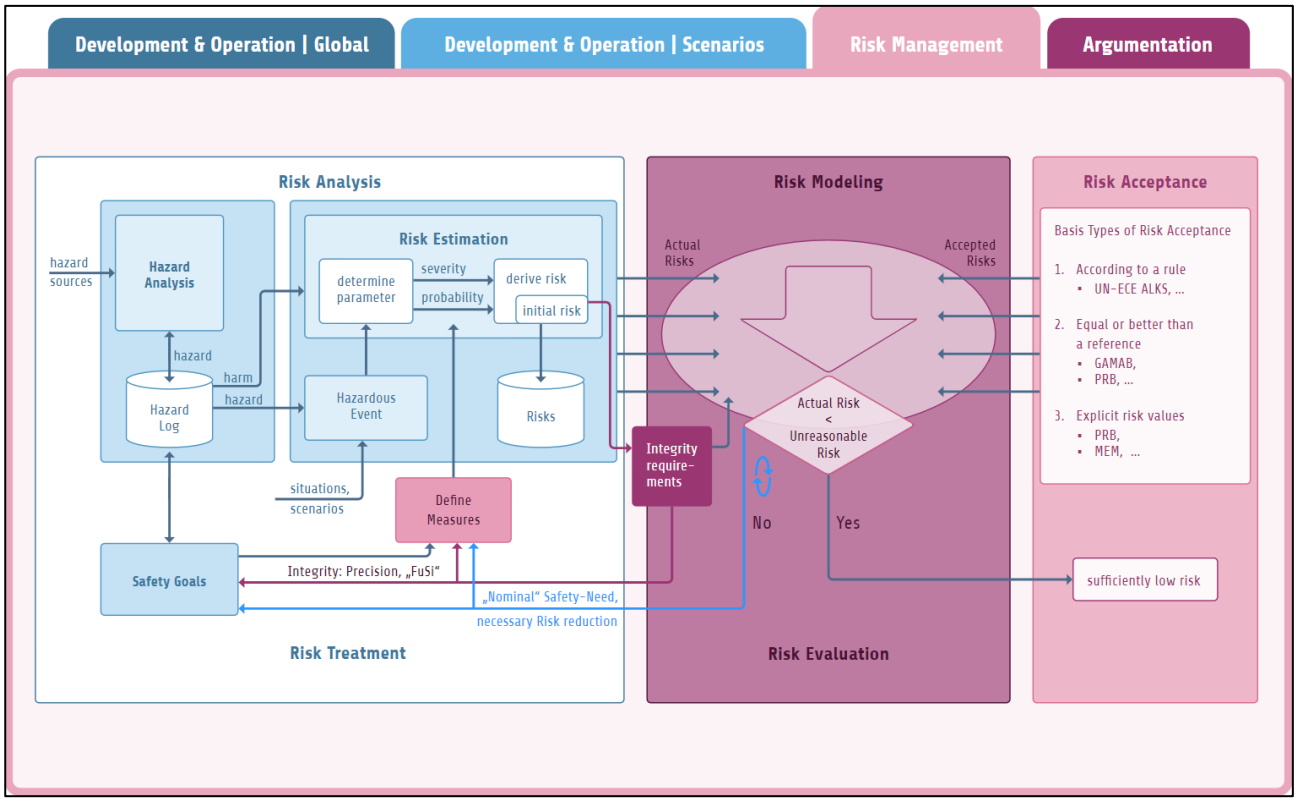


Abbildung 10: Assurance Framework - Risk Management

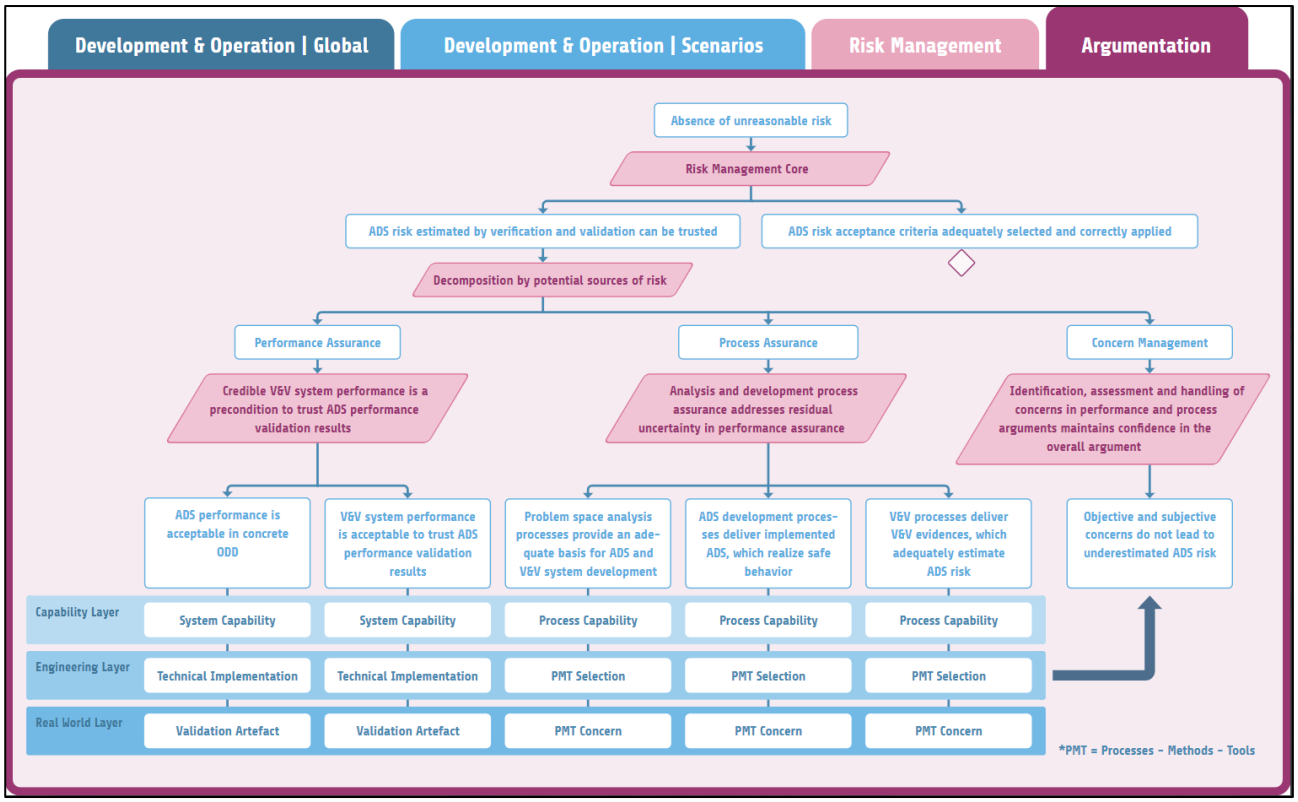


Abbildung 11: Assurance Framework - Argumentation

2.1.1.2 AP1.2

Im AP1.2 hatte ZF keine Beiträge geplant.

2.1.1.3 AP1.3

Im AP1.3 wurden Querschnittsthemen identifiziert, abgegrenzt und während des gesamten Projektverlaufs über Teilprojektgrenzen hinweg koordiniert. Dazu wurden die Schnittstellen zwischen den Teilprojekten definiert und die Querschnittsthemen entsprechend strukturiert.

Innerhalb des AP1.3 hat ZF zunächst Expertise aus dem Bereich der Teststrategien für Assistenzsysteme nach SAE L1 bis L3 eingebracht. Konkret wurde ein exemplarisches Vorgehen in diesem Bereich vorgestellt, das als Grundlage für erste Test- und Testtoolanforderungen diente und somit einen Aufsatzpunkt für mehrere Teilprojekte darstellte: TP4 Testanforderungen, TP7 Testvorgehen, TP5 Simulationssteuerung, TP6 Datenbereitstellung, TP8 Datenbanken.

Daneben wurde zusammen mit den Partnern die generische Kundenfunktion erarbeitet. Diese bildete mit ihren exemplarischen ADS (automated driving system) Funktionsumfängen (siehe Abbildung 12) und neben den entsprechenden ODD-Inhalten die Grundlage für Entwicklung und Prüfung in allen Teilprojekten.

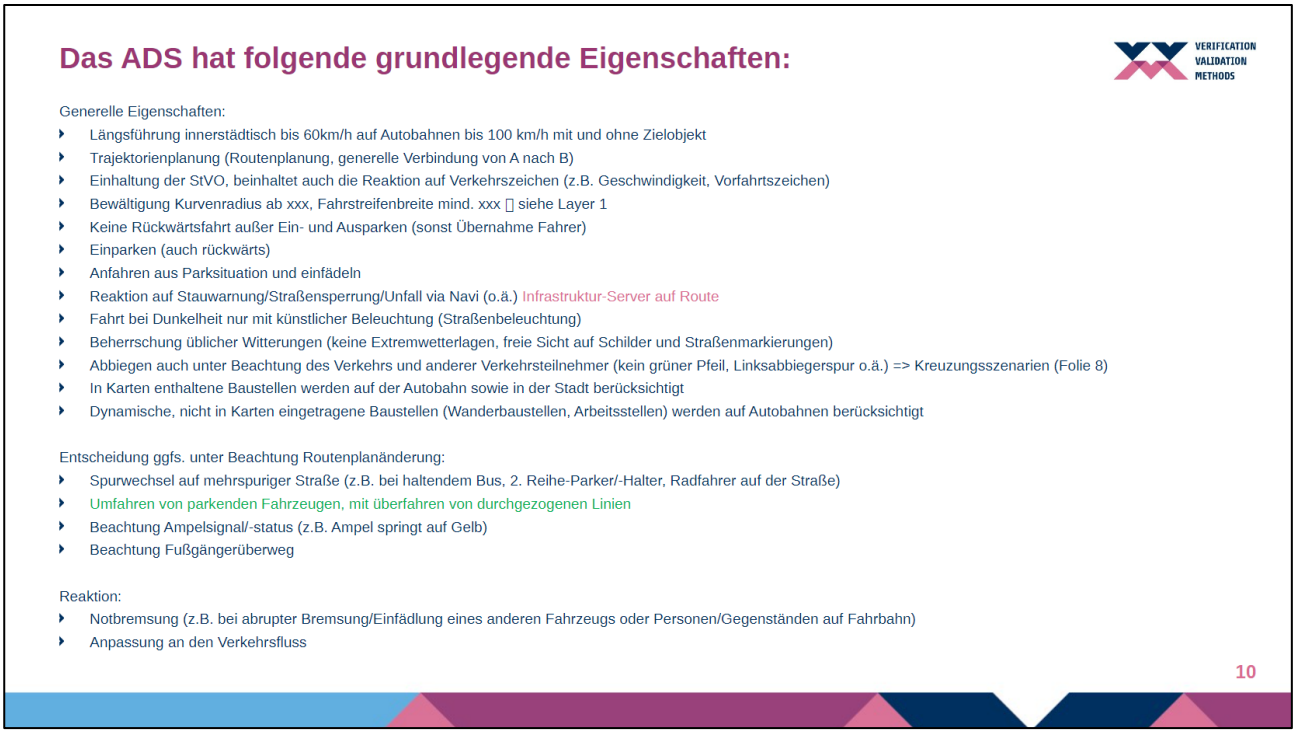


Abbildung 12: Grundlegende Umfänge der Kundenfunktion

Zur Beschreibung der exemplarischen ODD wurden in VVM drei Functional Use Cases (FUC) definiert:

- Linksabbiegen an einer Ampelkreuzung (FUC 1)
- Geradeausfahren an einer T-Kreuzung / Einmündung mit Zebrastreifen (FUC 2)
- Linksabbiegen an einer vorfahrtsberechtigten Kreuzung (FUC 3)

Durch Verbindung dieser FUC in jeweils verschiedenen Variationen und zusammen mit einem ergänzenden Autobahn Use Case wurde die ODD generiert (siehe Abbildung 13). Die Beschreibung der ODD erfolgte auf Basis des 6-Layer-Modells.

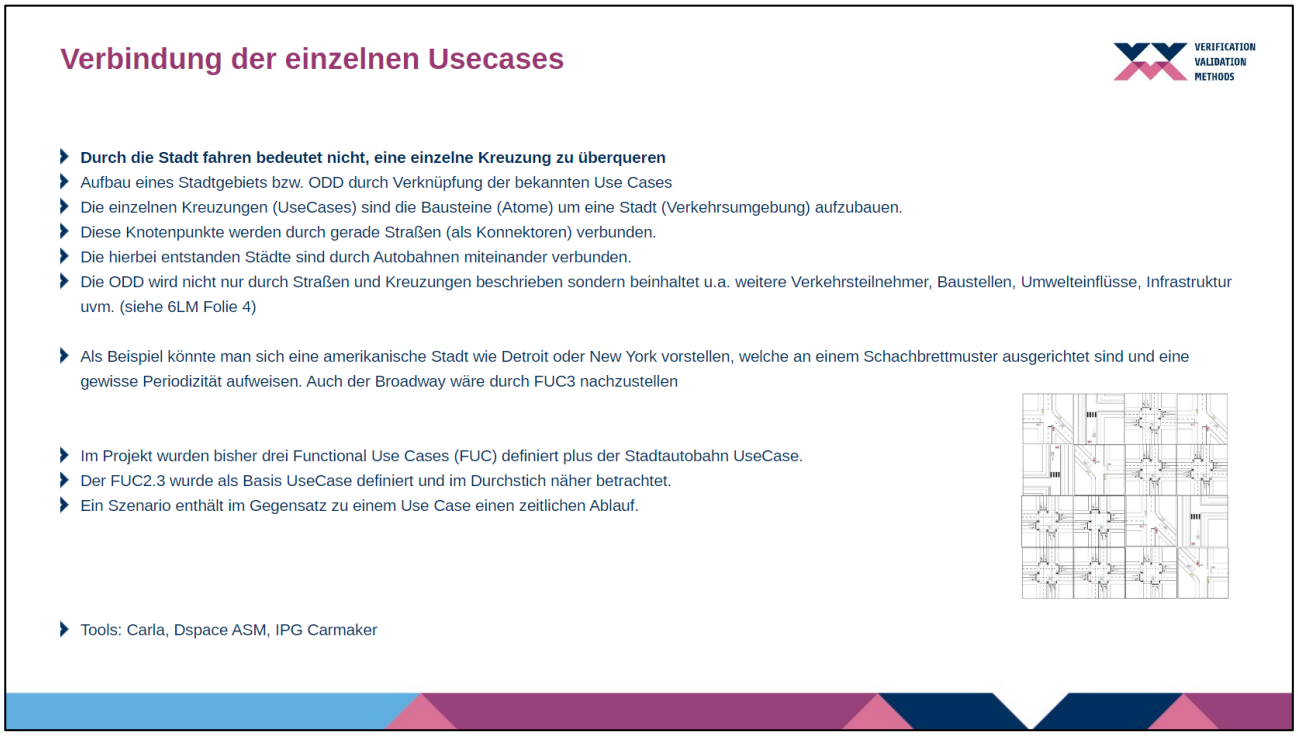


Abbildung 13: Verbindung der Functional Use Cases (FUC) zur ODD

Darüber hinaus hat sich ZF mit einem systematischen Ansatz zur Systemspezifikation und einem Konzept für eine initiale funktionale Architektur eingebracht. Auf dieser Basis konnten die weiteren Arbeiten im Bereich der FuSi und der Testanforderungen in TP3 und TP4 gestartet werden.

Die über exemplarische Kundenfunktion und ODD geschaffenen Randbedingungen wurden während der Projektlaufzeit kontinuierlich überprüft. ZF hat dazu über Reviews und Rückmeldungen beigetragen. Insbesondere wurde die Berücksichtigung der nationalen und europäischen Gesetzgebung diskutiert. Auch wurden weitere relevante Veröffentlichungen wie das Dokument „Cross-Domain Safety Assurance for Automated Transport Systems“ der Universität Warwick und die UN ECE 157 diskutiert.

Auch innerhalb des AP1.3 wurde das Assurance Framework stetig weiterentwickelt und diente zur Koordination der Querschnittsthemen und Zusammenführung der Ergebnisse. Abbildung 14 zeigt das Assurance Framework mit Fokus auf den Synchronisationspunkten, wie sie im bereits genannten Durchstichworkshop vereinbart wurden. Abbildung 15 zeigt die Ergebnisstruktur, auf deren Basis die Ergebnisse aus den Teilprojekten zusammengeführt wurden.

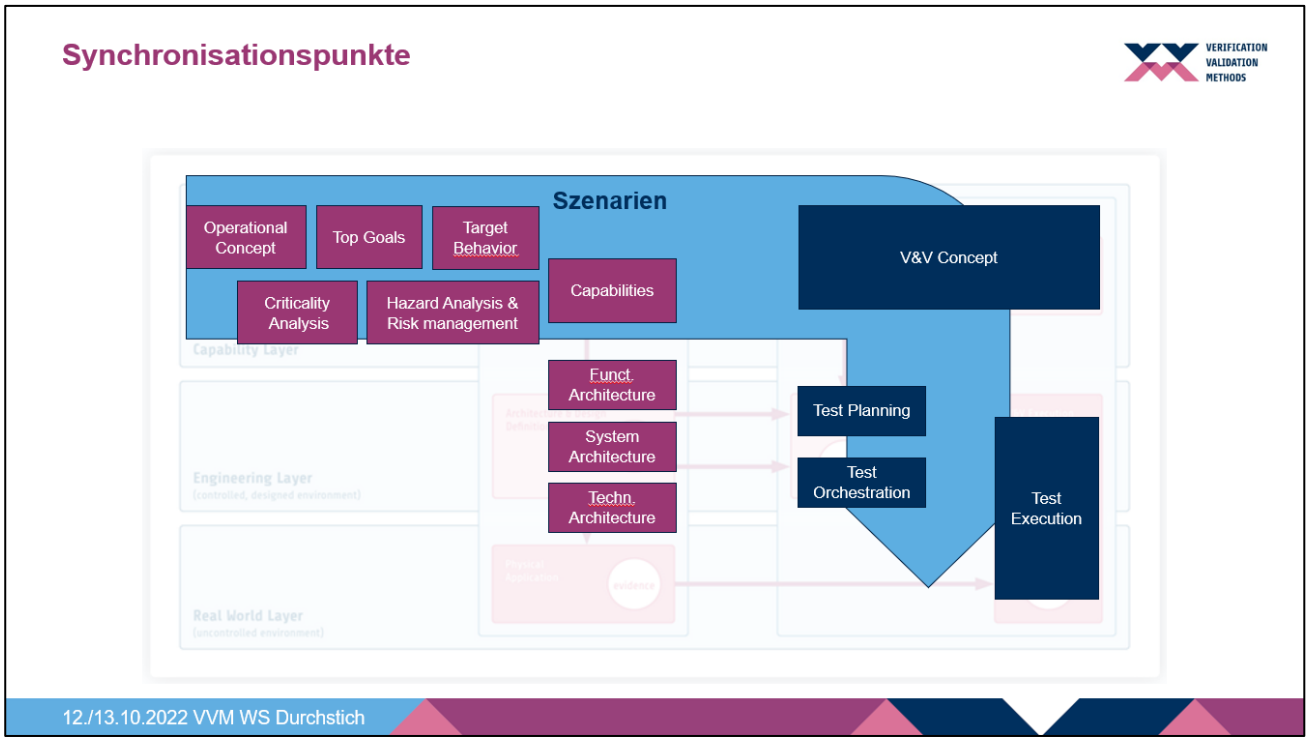


Abbildung 14: Synchronisationsunkte im Assurance Framework

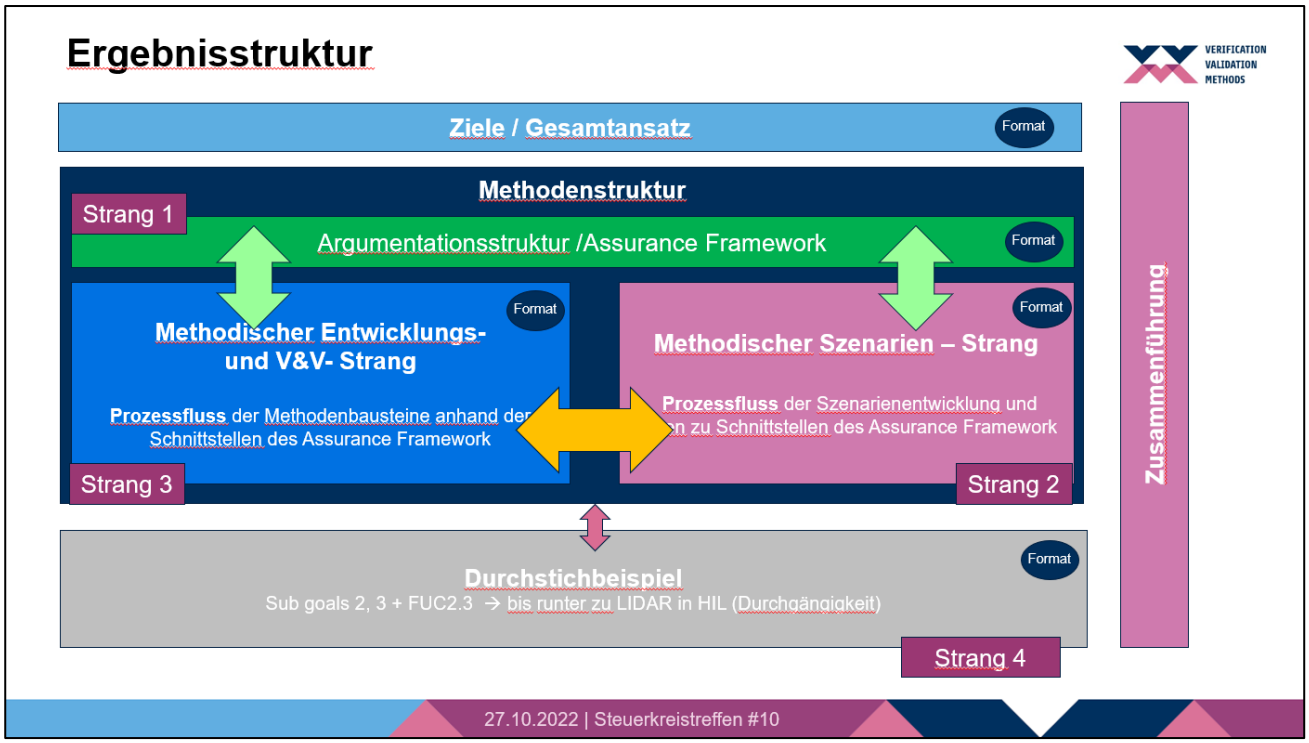
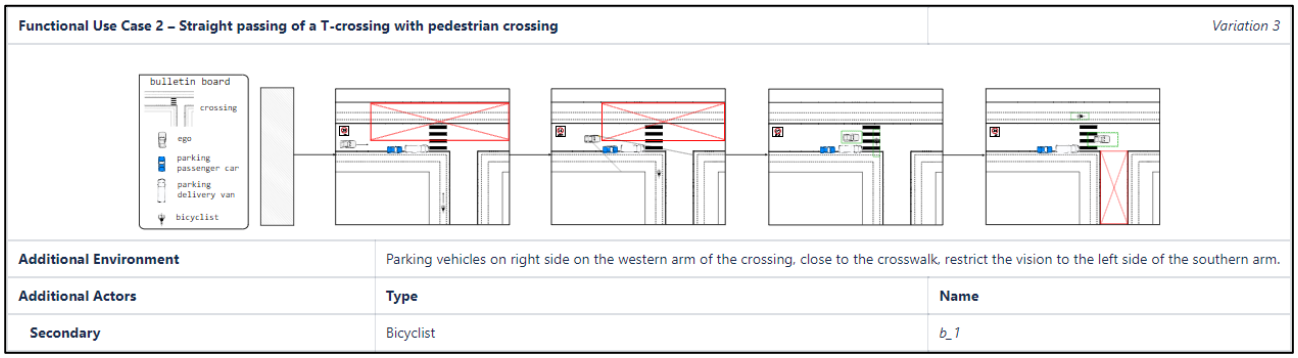


Abbildung 15: Ergebnisstruktur des Gesamtprojekts

2.1.1.4 AP1.4

Im AP1.4 wurden die funktionalen Use Cases sowohl bezogen auf die Form als auch den Inhalt erarbeitet. Dies geschah in enger Zusammenarbeit mit dem TP2. Der Functional Use Case 2.3 (FUC 2.3) diente als das große zusammenhängende Strukturelement des Gesamtprojekts, sowohl in der Arbeit nach innen als auch nach außen. ZF hat hierzu sowohl als TIER 1 mit der entsprechenden Sichtweise auf den Anwendungsfall der urbanen Kreuzung als auch als industrieller TP2-Lead wesentliche Beiträge geleistet. Abbildung 16 zeigt den FUC 2.3 als wesentlichen Teil der Ergebnisse.



Functional Use Case 2 – Straight passing of a T-crossing with pedestrian crossing		Variation 3
Additional Environment	Parking vehicles on right side on the western arm of the crossing, close to the crosswalk, restrict the vision to the left side of the southern arm.	
Additional Actors	Type	Name
Secondary	Bicyclist	b_1

Abbildung 16: Anwendungsfall FUC 2.3

Zur Erreichung dieser Ergebnisse hat ZF zunächst mit hausinternen Bereichen, die automatisierte Fahrfunktionen spezifizieren, entwickeln und testen, detailliert abgestimmt, welche Kreuzungstypen speziell auf den ZF-eigenen Teststrecken in Friedrichshafen für die Verwendung als Modellkreuzungstypen in VVM infrage kommen können. Es folgte dann ein interner Abgleich der Use Case Begriffe und das Einbringen der Ergebnisse und Vorschläge im Rahmen der TP1 Konferenzen. Daneben hat sich ZF an den Abstimmungen der Kreuzungstypen zwischen VVM und SetLevel4to5 beteiligt. In der Abstimmung mit den Experten aus TP2 wurde der Fokus darauf gelegt, dass zu den Functional Use Cases entsprechende OpenX-Dateien verfügbar gemacht werden, die Sensitivitäts- und Korrelationsanalysen im Kontext der Kritikalitätsparameter in der Simulationsumgebung ermöglichen.

2.1.1.5 AP1.5

Innerhalb des AP1.5 wurde auf Basis der definierten Kundenfunktion eine Item Definition in Anlehnung an die Norm ISO 26262 entworfen. So konnten Gütekriterien für die Bewertung von Sicherheit im Use Case Urbane Kreuzung identifiziert werden. Dazu erfolgte zunächst durch die ZF eine interne Startpunktbildung. Es wurden mit Experten der hausinternen Fachabteilung für Funktionssicherheit vergleichbare Item-Definitionen und entsprechende Ergebnisse aus vorangegangenen Förderprojekten (u.a. PEGASUS) gesichtet und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit für das VVM-Projekt bewertet. Die Erkenntnisse wurden in das AP1.5 eingebracht und in der Folge die Erarbeitung der Item-Definition in mehreren Iterationen mit Reviews begleitet.

2.1.1.6 AP1.6

Innerhalb des AP1.6 hat sich ZF an den Arbeiten zur Erstellung eines VVM-Glossars (deutsch und englisch) auf Basis der Ergebnisse aus dem Projekt PEGASUS beteiligt.

Die Auswahl der Begriffe sowie Form und Plattform wurde ZF-intern abgestimmt und entsprechend an TP1 zurückgemeldet. Ebenfalls lieferte ZF ein Feedback bzgl. der Definition des internen Aufbaus der Datenbank (Labels, Hierarchien, etc.) sowie bzgl. des ersten Entwurfs des VVM-Glossars. ZF konnte hierfür durch die breite Beteiligung an VVM die unterschiedlichen Sichtweisen der Mitarbeiter in den verschiedenen TPs sowie die verschiedenen ZF-internen Bereiche (automatisierte Systeme: Spezifikation, Entwicklung, Testen, Validieren, Recht, etc.) befragen. Darüber hinaus fand eine Abstimmung des VVM-Glossars mit dem Förderprojekt SetLevel4to5 statt.

2.1.2 TP2 Kritikalitätsanalyse

Als industrielle Leitung von TP2 „Kritikalitätsanalyse“ hat ZF maßgeblich bei der Organisation des Teilprojekts (Regeltermine, Quartalstreffen, Planung, etc.) mitgewirkt. Das zweite Quartalstreffen im TP2 wurde durch ZF am Stammsitz in Friedrichshafen organisiert und durchgeführt. Auch wurde die Abstimmung der Arbeiten an den Schnittstellen zu anderen TPs (TP7, TP6, TP3, TP8) abgestimmt.

2.1.2.1 AP2.1

Ziel des AP2.1 war die Charakterisierung des Szenarienraums und die Beschreibung einer Ontologie für die Szenarienannotation, das gemeinsam mit den Partnern erreicht wurde. ZF hat in diesem Kontext zunächst eine detaillierte State of the Art Analyse bekannter Beschreibungssprachen (foretellix, OpenScenario) durchgeführt und die Ergebnisse in einem TP2-Quartalstreffen vorgestellt. Darüber hinaus wurde ein initialer Vorschlag für eine ZF-Beschreibungssprache präsentiert und gemeinsam mit den Projektpartnern diskutiert (siehe Abbildung 17). Enthalten waren ein Metamodell, das in die VVM Ontologie aufgenommen wurde, eine maschinenlesbare XML-basierte Beschreibung sowie eine Darstellungsform über ein menschenlesbares Story-Board.

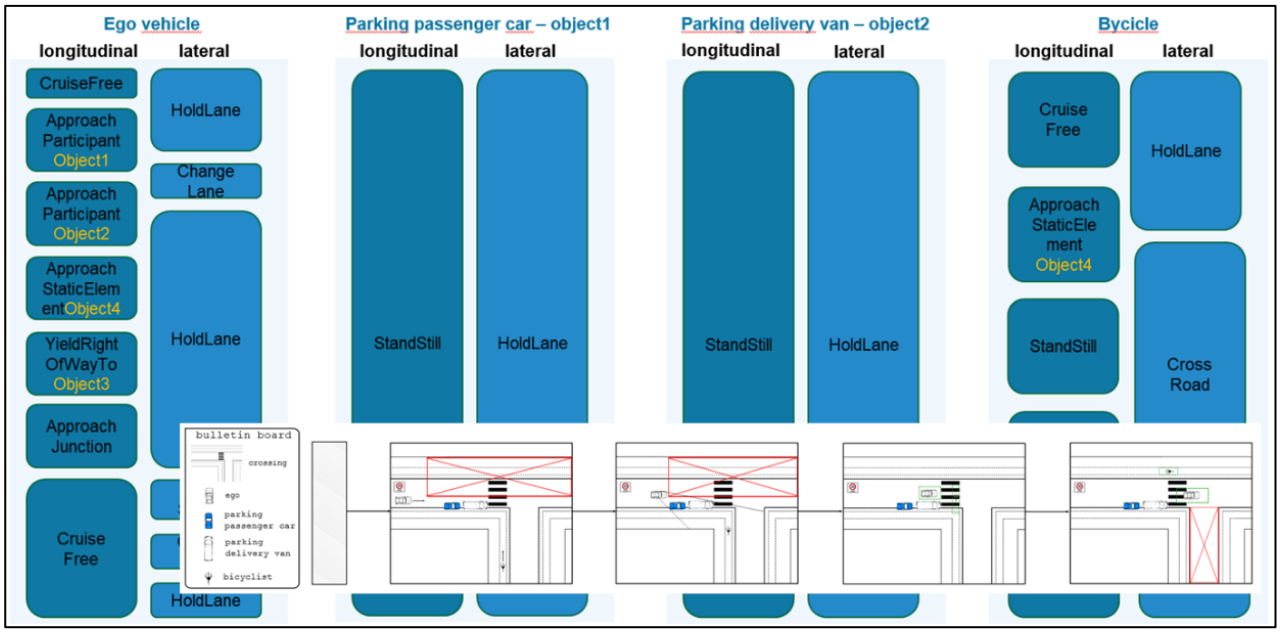


Abbildung 17: ZF-Beschreibungssprache (Story Board) am Beispiel eines VVM Use Case

Ein weiteres wesentliches Element zur Entwicklung der Ontologie war das 6-Layer-Modell zur Beschreibung der Verkehrsszenarien. ZF hat sich in diesem Bereich mit Vorschlägen zur Konkretisierung eingebracht (siehe Abbildung 18).

Overview – ZF Proposal

Layer	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6
Name	Road network and traffic regulation	Roadside equipment	Modifications to Layer 1 and Layer 2 and quasi-static objects	Movable objects	Environment conditions	Signals and communication data
Exemplary content	• Road network • Geometry of roads • Logic of roads • Topology of roads with height and inclination profiles • Objects for traffic regulation • Road markings • Traffic signs • Traffic lights (placement only) • Shoulders • Sidewalks • Grass stripes • Roundabouts • Traffic islands • Road surface • Road conditions	• „Road decoration" • Roadside equipment • Permanently present static objects • Buildings • Trees and bushes • Walls and fences • Street lamps • Hydrants, bollards, other types of poles • Oscillating motion of leaves, banners, or flags	• Permanent and temporary changes to Layers 1 and 2 • Potentially moveable objects with fixed positions • No permanent installations, roadside equipment, road users • Covered road markings • Trees lying on the street • Garbage bins (at fixed position) • Coke cans (at fixed position)	• Traffic participants: passenger cars, commercial vehicles and trailers, busses, motorcycles, bicycles, pedestrians, rail vehicles and trams, animals • Parking vehicles • Stationary pedestrians • Objects with impressed motion (by trajectories): Garbage bins, pylons, coke cans, balls • Objects moved through elementary events	• Constant and time-varying environmental conditions • Weather: sun, precipitation, wind, fog • Daytime: date, hour, season • Artificial illumination: Light sources like street lamps and advertising boards • No effects of environmental conditions	• V2X communication • Information about cellular network coverage • States and control of signals like traffic lights, switchable traffic signs, signs of moving road network • Police officer when controlling traffic • Additional information with signal functionality

Abbildung 18: Konkretisierung des 6-Layer-Modells

Abbildung 18 zeigt die Inhalte den Ebenen 1-6 zugeordnet. Hierbei repräsentieren die Ebenen 1-3 den räumlichen oder stationären Anteil eines Straßennetzes bzw. den Inhalt einer entsprechenden openDRIVE-Datei, die Ebenen 4-6 enthalten die temporären und dynamischen Anteile, die dynamischen Objekte, die Umweltbedingungen sowie die digitalen Informationen und Signale. Diese Inhalte finden sich entsprechend in einer openSCENARIO-Datei.

Es erfolgte eine Ausarbeitung unterschiedlicher Ebenen, die Hauptarbeiten seitens ZF erfolgten in der Detaillierung der Ebene 5 / L5 innerhalb der Ontologie. Hierbei wurden die Arbeiten auf die Bereiche Niederschlag, Wind und Tages- / Jahreszeiten konzentriert und die Abhängigkeiten zwischen den Inhalten der Ebene 1 (Straßennetz) mit den Inhalten der Ebene 5 exemplarisch modelliert (resultierend bspw. in Glätte, schwerem Erkennen von Straßenmarkierungen etc.).

Die Beiträge aller Partner zum 6-Layer-Modell wurden im TP2 konsolidiert und führten zu einer gemeinsamen Veröffentlichung. Siehe dazu Kapitel 2.5.1 „Erfolgte Veröffentlichungen“.

Die Arbeiten der VVM Ontologie Arbeitsgruppe wurden auf Initiative von ZF mit den Ergebnissen der entsprechenden Ontologie Arbeitsgruppen aus dem Förderprojekt KI-Absicherung abgeglichen. Ziel war es, die speziellen Ontologien aus dem KI-Kontext als Teil oder Untermenge der VVM Ontologie aufzubauen. Auch flossen Impulse aus entsprechenden ASAM openXOntology Aktivitäten ein.

Schließlich wurde im TP2 der initiale Vorschlag zur Ontologie weiterentwickelt zum gemeinsamen Ergebnis, der "Automotive Urban Traffic Ontology (A.U.T.O)". Diese steht auf GitHub zur Verfügung: https://github.com/lu-w/auto

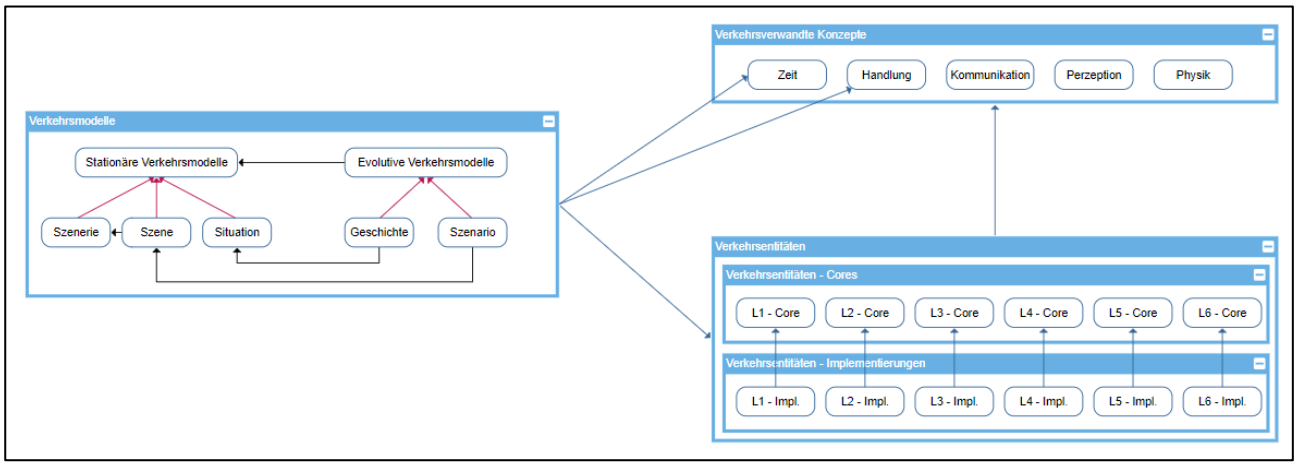


Abbildung 19: Architektur der Ontologie A.U.T.O.

Die erarbeitete Ontologie sowie die vollständige Beschreibung der relevanten Kernkonzepte im Projektergebnis E2.1b war ein wesentlicher Baustein zur Identifikation relevanter Szenarien und Parameter in Verkehrsdaten sowie zum Thema Datenanreicherung und -labelling. In mehreren Workshops wurden von ZF und den Konsortialpartnern die diesbezüglichen Ergebnisse in die relevanten Teilprojekte in VVM weitergetragen.

2.1.2.2 AP2.2

Ziel des AP2.2 war die Ermittlung von kritikalitätsbeeinflussenden Wirkzusammenhängen. In diesem Kontext hat ZF untersucht, wie kritikalitätsverursachende und -vermeidende Verkehrsphänomene identifiziert und bewertet werden können. Dabei wurde auch die Frage der numerischen Auswertbarkeit von Kritikalitätsmaßen und der Automatisierung behandelt.

Die Arbeiten von ZF konzentrierten sich innerhalb des AP2.2 auf insgesamt vier Bereiche:

1. Kritikalitätsmaße: Es wurden bestehende Konzepte zur Bewertung der Kritikalität gesichtet, neue Kritikalitätsmaße entwickelt und eine vergleichende Untersuchung der Kritikalitätsmaße durchgeführt.
2. CriSys SW-Framework: Für die Anwendung von Kritikalitätsmaßen auf Verkehrsszenarien wurde von ZF ein eigenes SW-Framework namens CriSys (Criticality Identification System) entwickelt. CriSys ermöglicht es einerseits, Szenarien aus verschiedenen Quellen einzuspeisen und auf ein einheitliches Eingabeformat zu bringen und andererseits auf Basis der verschiedenen Maße die Kritikalität zu berechnen. So wurde die vergleichende Untersuchung der Kritikalitätsmaße möglich.
3. Simulation der Szenarien: Die kritikalitätsbeeinflussenden Wirkzusammenhänge wurden in simulierten Verkehrsszenarien untersucht. Dazu wurden auf Basis der VVM FUCs (Functional Use Cases) aus dem TP1 logische Szenarien in CarMaker, Carla und OpenPASS variiert. Auch eine Reihe von Unfallszenarien aus der GIDAS Unfalldatenbank wurden genutzt.
4. Korrelationsanalyse: Es wurde untersucht, wie die einzelnen Parameter innerhalb eines Szenarios zusammenhängen und in welchen Konstellationen und Wertebereichen diese zu einer erhöhten Kritikalität führen.

Im Bereich der Kritikalitätsmaße wurden zunächst bestehenden Konzepte untersucht. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick:

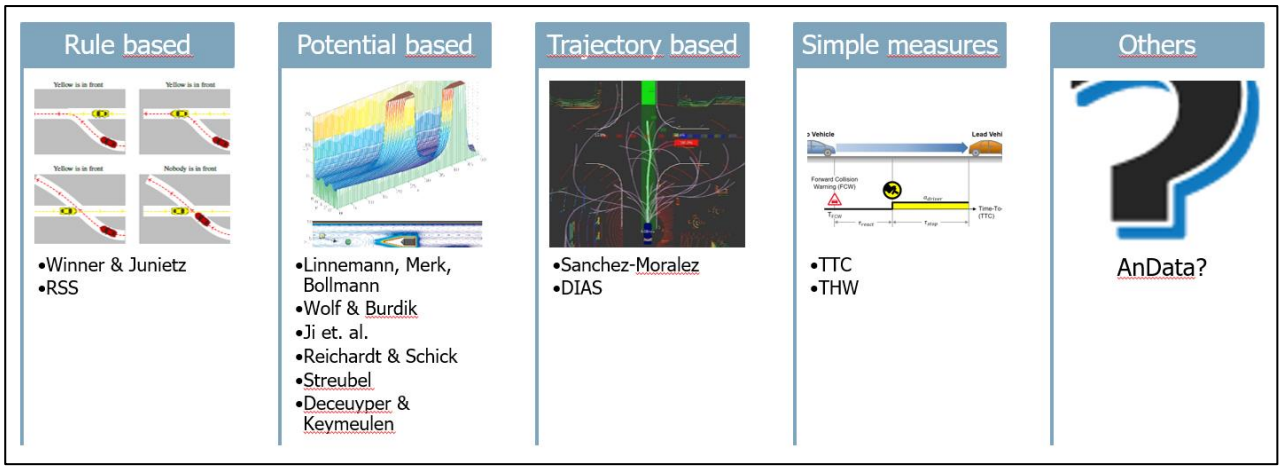


Abbildung 20: Überblick bestehender Kritikalitätsmaße

Hier wurde auch die ZF eigene Methode eingebracht und im Projektverlauf weiterentwickelt. Es handelt sich dabei um das Kritikalitätsmaß MerLin. MerLin ist ein potential basiertes Maß, d. h. jedem Objekt wird eine Potenzialfunktion zugewiesen, die auf die Sicherheitszone des Objekts

übertragen werden kann. Bewegt sich ein Objekt in diese Sicherheitszone eines anderen Objekts oder haben andere Sicherheitszonen eine gewisse Überlappung, so kann die Situation kritisch werden. Um zu ermitteln, wie kritisch die Situation ist, wird eine Bewertungsformel verwendet, die Werte für die Kritikalität von 0 bis 1 liefert, wobei 0 absolut unkritisch ist und 1 bedeutet, dass der Kontakt zwischen den beiden Objekten als absolut kritisch eingestuft wird. Auf diese Weise wird eine Kritikalitätsbewertung möglich. Zu MerLin wurde von ZF im VVM-Projekt das wissenschaftliche Paper „MerLin – a potential based criticality measure to quantify danger and risk in traffic scenarios“ veröffentlicht (siehe Kapitel 2.5.1 „Erfolgte Veröffentlichungen“).

Zur Untersuchung des Themas Unfallschwere (Severity) wurde innerhalb des AP2.2 eine eigene Arbeitsgruppe gegründet. Auch hier wurden zunächst relevante Szenarien auf Basis der VVM FUCs (Functional Use Cases) identifiziert und vor diesem Hintergrund Methoden zur Unfallschwerebestimmung untersucht. Der Fokus von ZF lag dabei auf der Kooperation mit dem Projektpartner Bosch zur Entwicklung des Kritikalitätsmaßes ETM (Evasion-Threat-Metric). Dazu wurde ein gemeinsames GIT-Repository eingerichtet, CriSys inkl. einer Entwicklungsschnittstelle beim Projektpartner installiert, ETM in CriSys implementiert, sowohl Methode als auch Implementierung gemeinsam weiterentwickelt und Tests der CriSys-Berechnungen durchgeführt. Das Ergebnis ist in der VVM-Veröffentlichung „Auswertung von Unfallschwere in simuliertem Test“ dokumentiert (siehe Kapitel 2.5.1 „Erfolgte Veröffentlichungen“).

Wesentliche Voraussetzung für die vergleichende Untersuchung von Kritikalitätsmaßen war neben der Simulation der relevanten Verkehrsszenarien die Möglichkeit, die Kritikalitätsmaße auf diese Szenarien anzuwenden. Das wurde mittels des oben genannten SW-Framework CriSys realisiert. Die ZF hat innerhalb des AP2.2 das Werkzeug CriSys entwickelt und dem VVM-Projekt zur Verfügung gestellt. Zum Projektende steht es in der Version 0.4 zur Verfügung und kann von den Partnern im Rahmen einer Open Source Lizenz genutzt werden. Abbildung 21 zeigt CriSys in seinem Anwendungsrahmen, Abbildung 22 zeigt die Möglichkeit der Visualisierung im CriSys Dashboard.

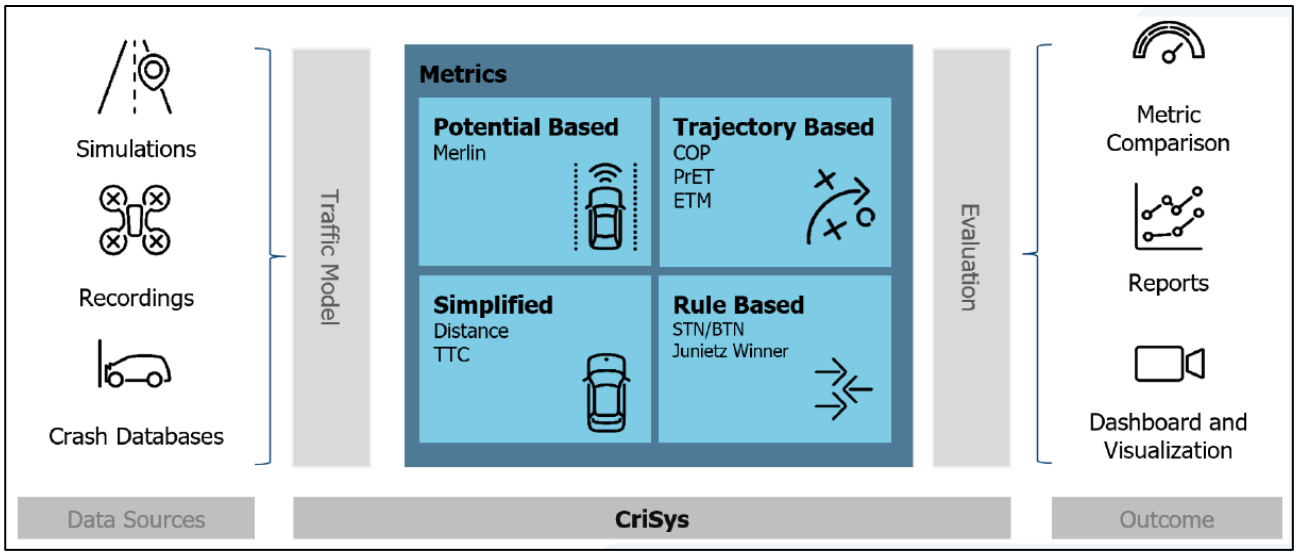


Abbildung 21: SW-Framework CriSys

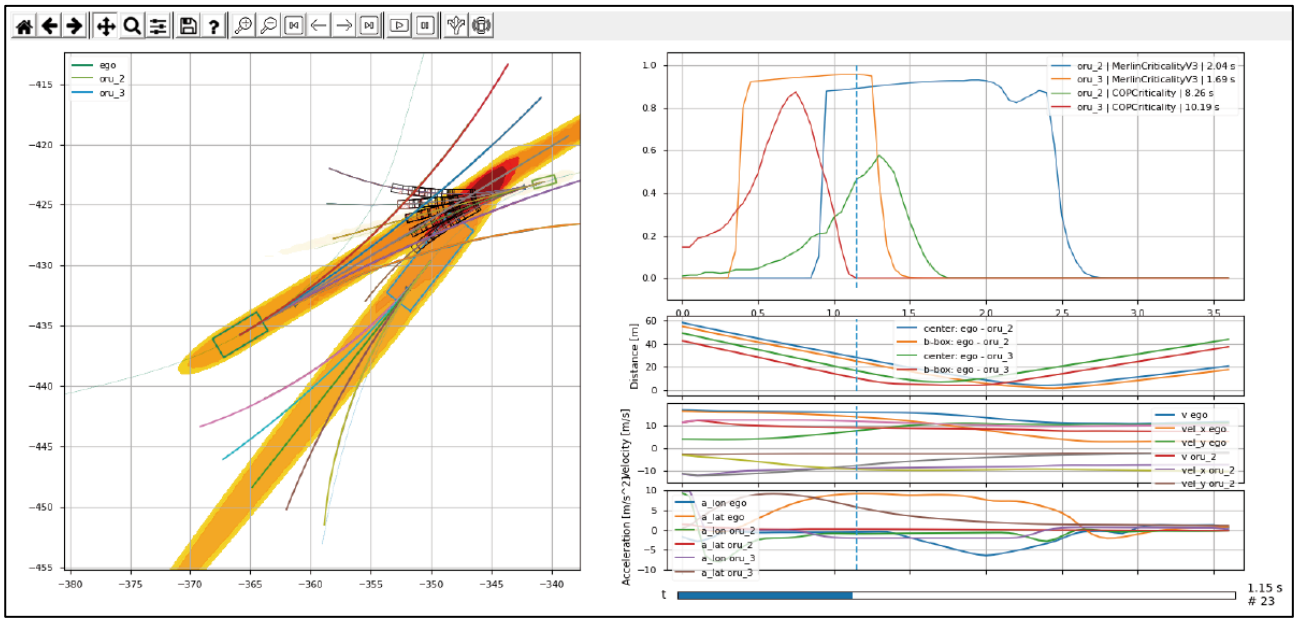


Abbildung 22: CriSys Dashboard

Dem in Abbildung 21 dargestellten Anwendungsrahmen folgend, wurden im AP2.2 von ZF ausgewählte Kritikalitätsmaße mit Hilfe von Design of Experiments (DoE) und Sensitivitätsanalysen quantitativ verglichen. Die im VVM-Projekt definierten funktionalen Anwendungsfälle (FUC – Functional Use Cases) wurden in einem sinnvollen, logischen Parameterraum variiert und in einer Simulationsumgebung ausgeführt. Die resultierenden konkreten Trajektorien wurden dann mit dem Tool CriSys ausgewertet und quantitativ im Parameterraum verglichen. Konkret wurden vier Kritikalitätsmaße untersucht:

- die normalisierte TTC als Vertreter der einfachen Maße,
- MerLin als Vertreter der potenzialbasierten Maße,
- COP/CES als Vertreter der Trajektorien basierten Maße,
- ETM als weiterer Vertreter der Trajektorien basierten Maße.

Aus dem FUC2.3 wurden konkrete Szenarien abgeleitet, die dann in CarMaker simuliert wurden. Dabei wurden die kritikalitätsbeeinflussenden Parameter Verdeckung, Reibung und Sichtweite variiert. In Summe wurde auf 100.000 konkreten CarMaker-Szenarien mit jeweils den vier genannten Maßen die Kritikalität erhoben und die so erlangten Ergebnisse verglichen. Dabei zeigten sich die unterschiedlichen Stärken der Kritikalitätsmaße. Abbildung 23 zeigt die Zusammenfassung, wie sie im VVM-Projekt diskutiert wurde.

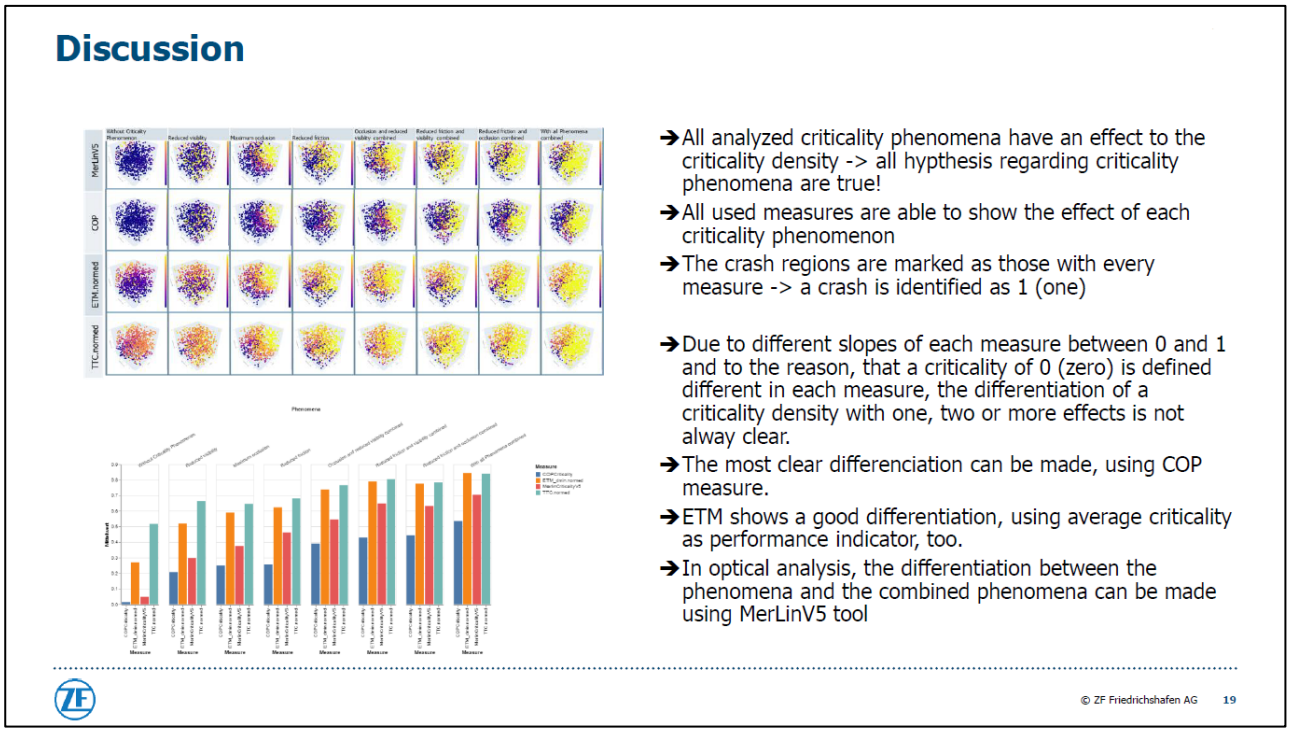


Abbildung 23: Vergleichende Untersuchung von Kritikalitätsmaßen

Die Ergebnisse der vergleichenden Untersuchung sind von ZF im VVM-Ergebnis E2.2g „Identifizierung von Kritikalitätsphänomenen mit Hilfe von Kritikalitätsmetriken“ veröffentlicht worden. Außerdem wurden die Erkenntnisse in das VVM Deliverable D08 „Advances on the Criticality Analysis for Automated Driving Systems“ integriert, das über die VVM-Homepage abgerufen werden kann.

Zum VVM-Abschlussevent konnte ZF die Online-Berechnung von Kritikalitätsmaßen in einem Fahrsimulator demonstrieren.

Im Bereich der Korrelationsanalyse wurden von ZF innerhalb des AP2.2 Konzepte untersucht. Ziel war es, die Frage zu beantworten, wie einzelne Parameter innerhalb eines Szenarios zusammenhängen und in welchen Konstellationen und Wertebereichen diese zu einer erhöhten Kritikalität führen. Die Untersuchungen fanden sowohl auf Basis simulierter Szenarien statt als auch auf Basis von Drohnenmessdaten. ZF hat wesentliche Ergebnisse im wissenschaftlichen Paper „Modeling Stochastic Data Using Copulas for Application in Validation of Autonomous Driving“ veröffentlicht. Es wird dort beschrieben, wie mit dem Wahrscheinlichkeitsmodell der Copula die Abhängigkeiten zwischen den Parametern innerhalb eines logischen Szenarios untersucht werden können.

2.1.2.3 AP2.3

Innerhalb des AP2.3 wurden auf Basis der relevanten Ergebnisse vorangegangener Förderprojekte (PEGASUS) und anhand relevanter Daten aus Unfalldatenbanken (GIDAS) kritikalitätsverursachende Wirkzusammenhänge identifiziert und darauf aufbauend Sicherheitsprinzipien systematisch ermittelt. In die Arbeitsgruppe zur Erstellung der

Gefährdungsanalyse konnte sich ZF mit seinen Erfahrungen als TIER1 einbringen. Konkret wurde der hauseigene Ansatz einer exemplarischen Gefährdungsanalyse eines ADS vorgestellt (siehe Abbildung 24).

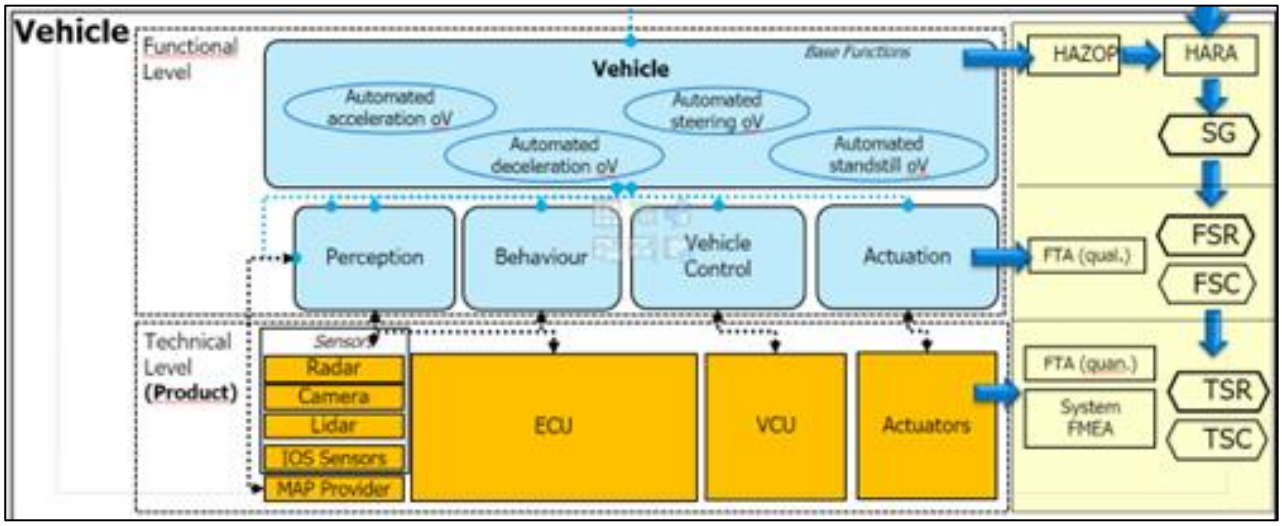


Abbildung 24: Key Word Driven HARA within Safety Process

Auf dieser Basis erfolgte gemeinsam mit den Konsortialpartnern die weitere Ausarbeitung der Vorgehensweise zur Gefährdungsanalyse und deren exemplarische Anwendung. In enger Abstimmung mit den Partnern Bosch und Offis (später DLR) wurden auf Fahrzeugebene in den Functional Use Cases FUC2-3 “Occlusion of Bicyclist through Parking Cars“ sowie FUC3-1 „Traffic with Right of Way“ beispielhaft Gefährdungen identifiziert (siehe Abbildung 25). Da es sich dabei um ein Querschnittsthema zwischen den Teilprojekten TP2 und TP3 handelte, erfolgten die beschriebenen Arbeiten innerhalb einer Workshopreihe, die von der TU Braunschweig und der ZF vorbereitet und durchgeführt wurde und die Partner aus AP2.3 und AP3.2 zusammenbrachte.

ID	Basic Maneuver in Scenario	Correct if (Context)	Deviation (Keywords)	Observable Effect(s) in Scenario	Hazard
1.1 (longitudinal)	Zielgeschwindigkeit folgen	Fahrzeug fährt mit der örtlich vorgeschriebenen Geschwindigkeit (siehe Schild)	More	Geschwindkeitsübertretung	Kollision mit querenden Verkehrsteilnehmern
1.2 (lateral)	Fahrstreifen halten	Orientierung in Fahrstreifenmitte	No	Abweichung vom Fahrstreifen	Kollision mit statischen Objekten (Bordstein, Verkehrsschild,...)
2.1	Zielgeschwindigkeit folgen (neu setzen)	Reduzierte Geschwindigkeit erreicht	No	Die Geschwindigkeit wird nicht reduziert	Kollision mit querenden Verkehrsteilnehmern
			Less	Die Verzögerung reicht nicht aus, um die vorgegebene Zielgeschwindigkeit zu erreichen.	Kollision mit querenden Verkehrsteilnehmern
			Late	Die Geschwindigkeit wird zu spät angefangen zu reduzieren, die Zielvorgabe wird nicht erreicht	Kollision mit querenden Verkehrsteilnehmern
2.2	Fahrstreifen halten	Orientierung in Fahrstreifenmitte	No	Abweichung vom Fahrstreifen	Kollision mit Gegenverkehr Kollision mit statischen Objekten (Bordstein, Verkehrsschild,...)
3.1	Anhalten	Fahrzeug kommt an Haltepunkt des Kreuzungsastes zum stehen	No	Das Fahrzeug fährt unverzögert auf die Kreuzung	Kollision mit LKW

Keywords	Meaning
No	Intend does not occur, or operational aspect is not achievable
Else	Different intend occurs, or alternative operational aspect is trying to be achieved
Early / Late	The timing is different from the intention. Usually used when studying sequential operations, this would indicate that a step is started at the wrong time or done out of sequence
Faster / Slower (alternative early / late)	The step is done / not done with the right timing
Less	A qualitative decrease in intend occurs (e.g. Pressure / Less)
More	A qualitative increase in intend occurs (e.g. Pressure / More)

Abbildung 25: Schlüsselwort getriebene Identifikation von Gefährdungen auf Fahrzeugebene

Diese Ergebnisse aus dem AP2.3 dienten dann dem AP3.2 als Grundlage zur lokalen Sicherheitsbetrachtung und letzten Endes zur Definition des Sollverhaltens, das ein wesentliches Element des Sicherheitskonzepts darstellt.

2.1.2.4 AP2.4

Innerhalb des AP2.4 wurden Anforderungen an die Perzeption zur Kritikalitätsvermeidung erarbeitet. ZF konnte sich hier mit Wissen und Erfahrung als TIER1 aus dem Bereich ADAS/AD-Sensorik und Perzeptionsalgorithmen in das Thema State oft he Art und in die Entwicklung der Methoden einbringen. Außerdem wurde der Abgleich an der Schnittstelle zum AP2.2 wie unten beschrieben durchgeführt.

Zunächst wurden mit den Konsortialpartnern Perzeptionscharakteristika identifiziert und deren Auswirkungen auf Kritikalität analysiert. Auf dieser Basis konnte dann das Thema Anforderungen an die Perzeption untersucht werden.

Begonnen wurde damit, den State of the Art bzgl. relevanter Sensortechnologien zu analysieren und zu bewerten. So wurde die Basis geschaffen, Perzeptionscharakteristika und -anforderungen realistisch einschätzen zu können. Weiter wurde ein Konzept zur Unterscheidung zwischen "realer Perzeptionstechnologie" und "perfekter Perzeptionstechnologie" entwickelt mit Fokus auf den Sensoren Kamera, Radar und Lidar sowie dem Perzeptionsalgorithmus. Es dient dazu, eine abstrakte Kategorisierung von Kritikalitätsphänomen im Bereich der Perzeption vornehmen zu können. Darauf aufsetzend wurden dann die in AP2.2 auf Fahrzeugebene im Verkehr ermittelten Kritikalitätsphänomene ergänzt um solche, die in Wirkzusammenhängen mit dem Sub-System Perzeption stehen.

Um die Perzeptionsanforderungen zur Kritikalitätsvermeidung entwickeln zu können wurde im AP2.4 eine Methodik zur Analyse der Sollperzeption erarbeitet, die aus Szenarienbeschreibungen konkrete Anforderungen an die Perzeption ableitet. Außerdem wurde das Thema der Kausalanalyse von Kritikalitätsphänomenen betrachtet. Auch in diesem Bereich gab es Überschneidungen mit dem AP2.2, weshalb eine enge Abstimmung erfolgte.

Die Ergebnisse des AP2.4 sind im Deliverable D08 „Generische Systematik der Kritikalitätsanalyse“ dokumentiert (siehe Kapitel 2.5.1).

2.1.3 TP3 Sicherheitsbewertung & -konzept

Ziel des TP3 war die Sicherheitsbewertung und das Sicherheitskonzept eines ADS nach SAE Level L4/L5. ZF als TIER1 hat sich mit seiner Kompetenz in der Entwicklung sicherheitsrelevanter Fahrzeugsysteme eingebracht. Konkret hat ZF im Bereich des Entwurfs der Systemarchitektur wesentliche Beiträge zur Fähigkeitenanalyse und zur Verhaltensspezifikation geleistet. Auf Basis der Vorarbeiten des TP2 zu Gefährdungsidentifikation und Kritikalitätsanalyse wurden quantitative Betrachtungen von Sollverhalten, Fähigkeiten und Sicherheitsanforderungen angestellt. Und schließlich wurde gemeinsam mit den Konsortialpartnern eine Argumentationsstruktur erstellt, die die lokale und globale Sicherheitsbetrachtung verbindet.

Die Ergebnisse des TP3 wurden in den drei Deliverables D02, D05 und D10 dokumentiert.

2.1.3.1 AP3.1

Innerhalb des AP3.1 wurde die globale Sicherheitsbetrachtung angestellt. Das bedeutet, dass der Fokus auf dem automatisierten Fahrzeug als komplexes System in Verkehrsszenarien lag und Sicherheit als emergente Eigenschaft betrachtet wurde, die nicht durch die Einzelbetrachtung von Komponenten, sondern durch deren Zusammenwirken erfasst werden kann. ZF konnte hier auf hausinternen Erfahrungen zur Hazard and Risk Analysis nach ISO 26262 aufbauen und bestehende Safety Prozesse und Analysen zur Untersuchung auf den VVM Use Case einbringen. Darauf aufbauend wurden gemeinsam mit den Partnern Methoden zur globalen Sicherheitsbetrachtung erarbeitet. Im Ergebnis wurde das Deliverable D05 „Quantifizierung der Anforderungen und Ableitung globaler Sicherheitsziele“ erzeugt, das von ZF editiert wurde. Im Kern geht es dabei um die Spezifikation des Sollverhaltens zur Erreichung globaler Sicherheitsziele. Abbildung 26 zeigt exemplarisch die Spezifikation eines Sollverhaltens im VVM Functional Use Case 2.4.

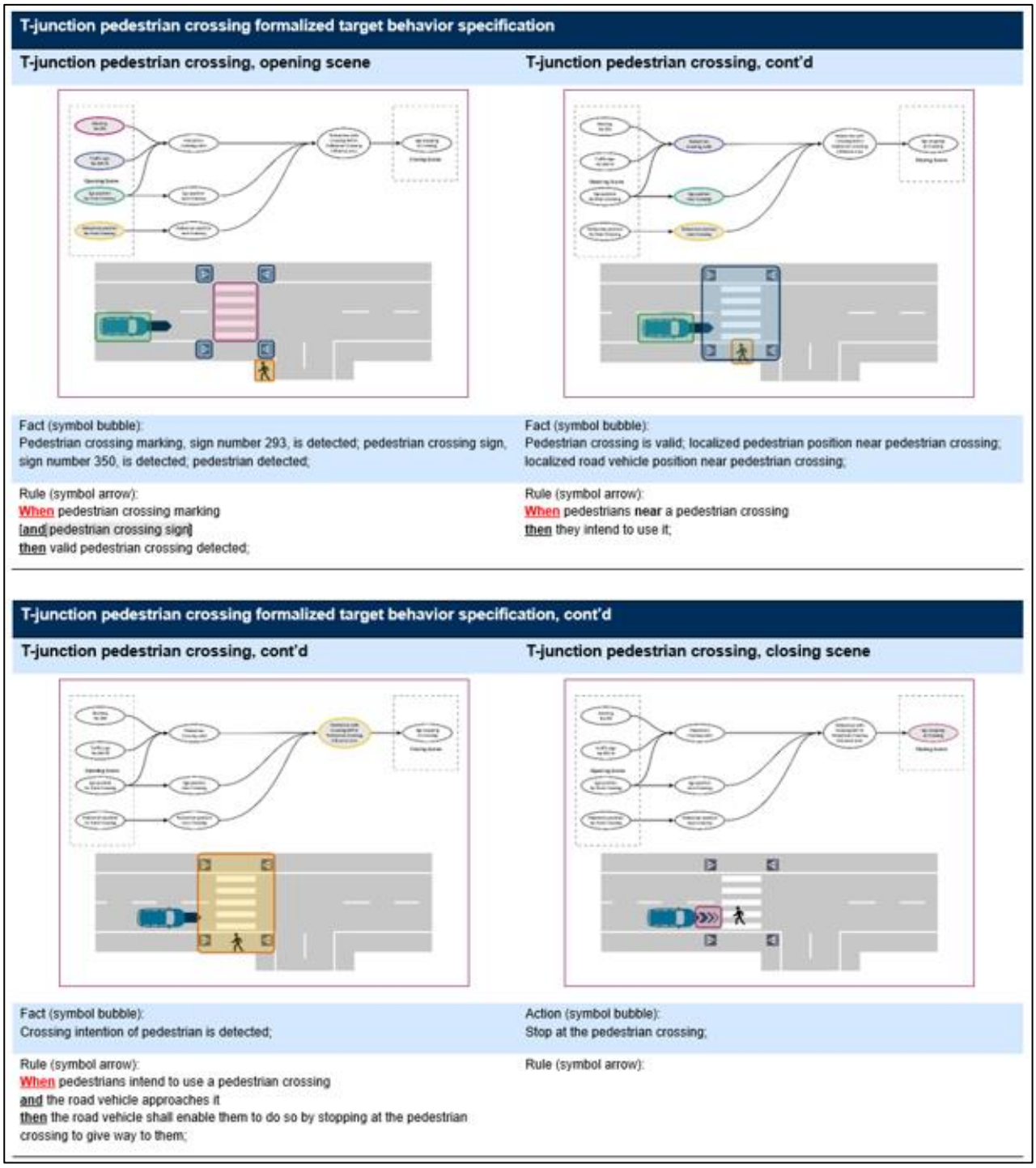


Abbildung 26: D05 - Spezifikation von Sollverhalten

Darüber hinaus hat ZF gemeinsam mit den Partnern dafür Sorge getragen, die Ergebnisse des AP3.1 an die übergeordnete Sicherheitsargumentation (AP3.3) und an das Konzept der Fähigkeiten basierten Architektur (AP3.4) anzubinden. Es erfolgte auch die Abstimmung an der Schnittstelle zu Kritikalitätsanalyse (TP2) einerseits und System- und Testanforderungen (TP4) andererseits.

2.1.3.2 AP3.2

Im Rahmen der lokalen Sicherheitsbetrachtung im AP3.2 war die Gefährdungsanalyse das zentrale Thema, das in enger Abstimmung mit dem TP2 bearbeitet werden musste. Gemeinsam mit dem Partner TU Braunschweig wurde dazu von der ZF eine mehrteilige, kollaborative Reihe von Workshops organisiert und durchgeführt. In den Workshops Nr.1 und Nr. 2 wurde die Strukturierung der Fahraufgabe, die Zonierung von Szenen/Szenarien und die Bestimmung des Soll-Verhaltens behandelt, in den Workshops Nr.3 und Nr. 4 auf die Gefährdungsidentifikation und Verhaltenssicherheitsziele fokussiert (siehe Abbildung 27).

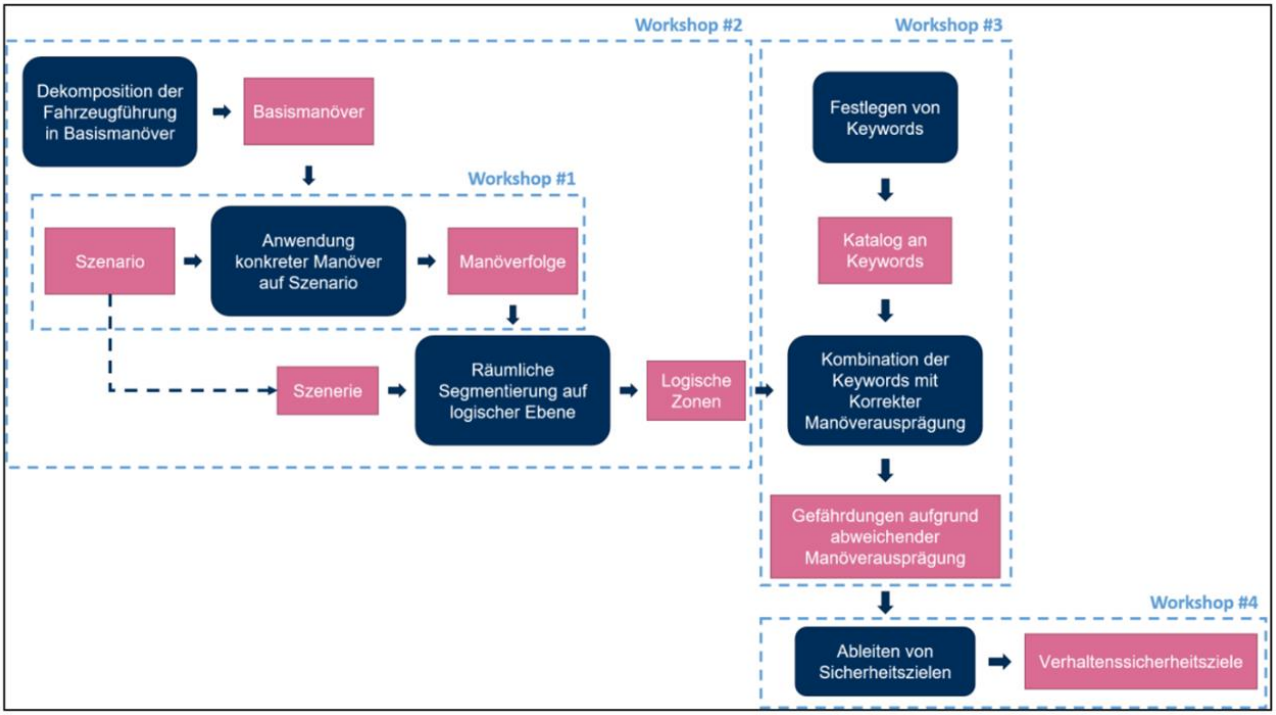


Abbildung 27: Workshopreihe zur Erarbeitung von Sicherheitszielen

Inhaltlich wurden seitens ZF dabei wesentliche Beiträge zur Weiterentwicklung der Methode PSM (Phänomen-Signal-Modell) und zum Formulierungsmuster für Sicherheitsziele (Abbildung 29) geleistet.

Das PSM ermöglicht dabei die Darstellung der Entscheidungsmöglichkeiten eines automatisierten Fahrsystems abhängig von situationsbedingt empfangenen Signalen über den umgebenden Verkehrsraum und das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer. **Fehler! Verweisquelle konnte n icht gefunden werden.** zeigt einen exemplarischen PSM-Graph.

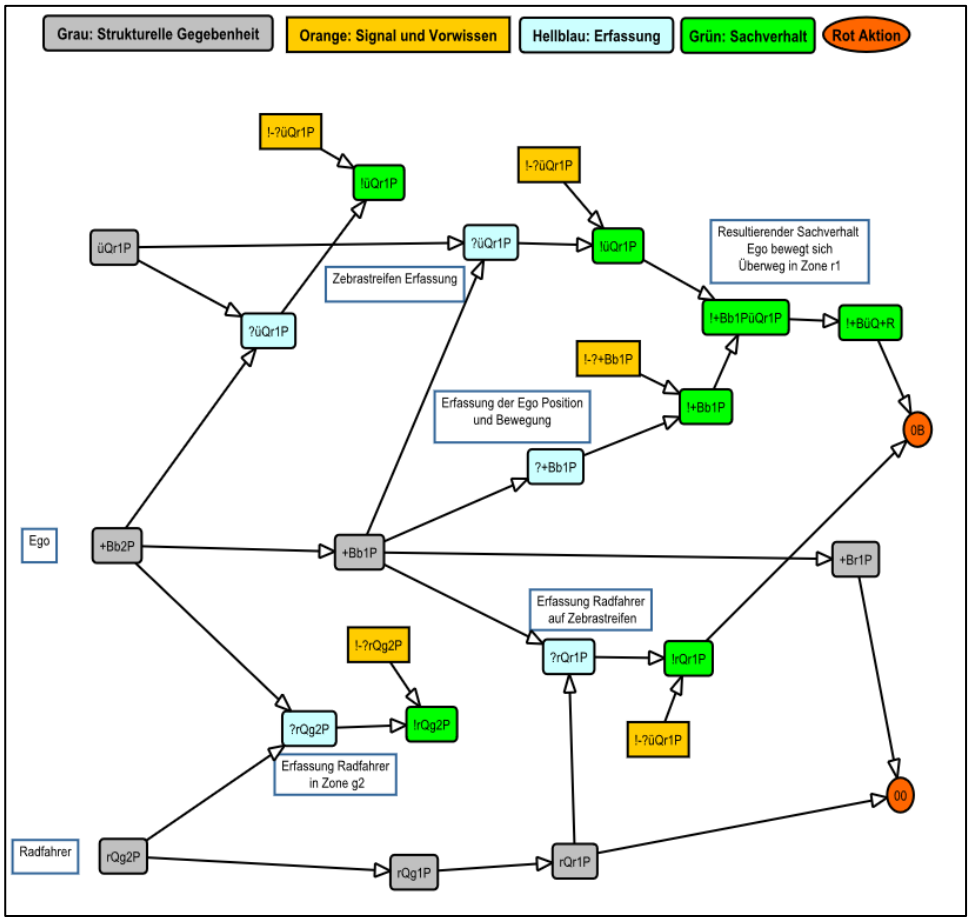


Abbildung 28: Exemplarischer PSM-Graph für ein urbanes Szenario

Abbildung 29: Formulierungsmuster für Sicherheitsziele

Weitere Beiträge der ZF bezogen sich auf die Terminologie zu Sicherheitszielen, gefährlichen Ereignissen, Gefährdungen, Gefahren und Bedrohungen sowie die Entwicklung einer Ontologie zur Risikomodellierung (Abbildung 30) und Positionierung der Sicherheitsziele.

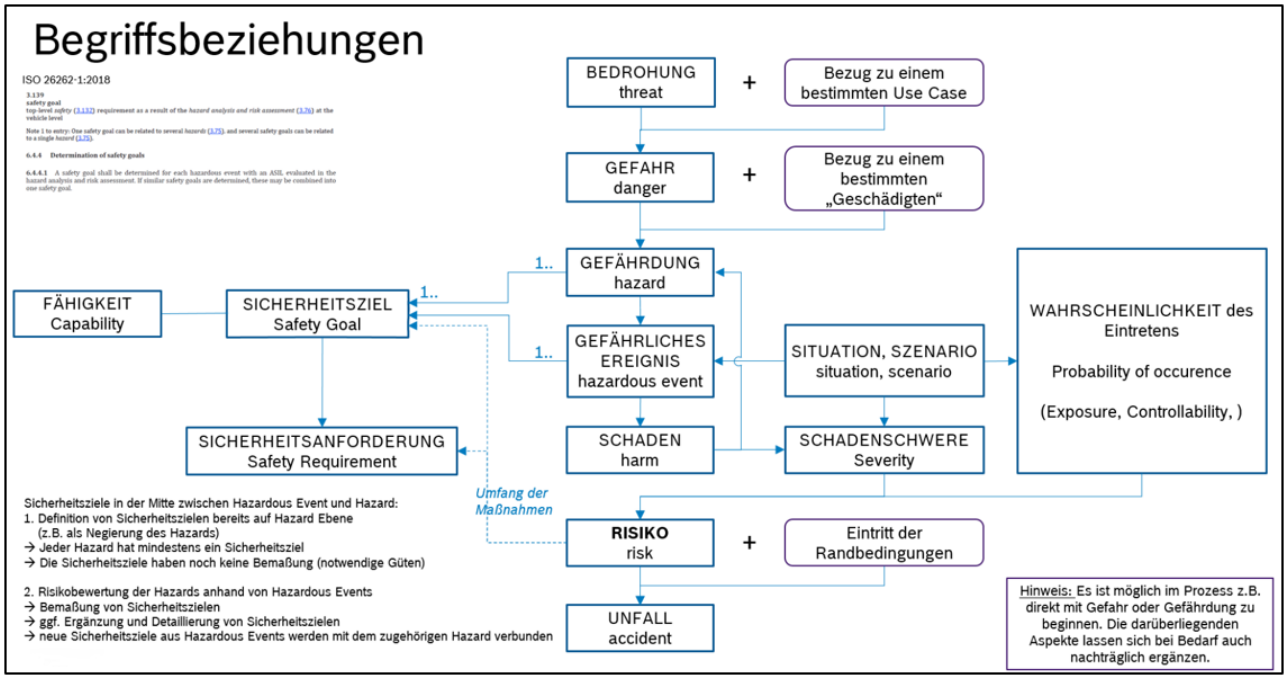


Abbildung 30: Ontologie zur Risikomodellierung

Auf dieser Basis konnte dann der Risk-Management-Core erarbeitet und in das Assurance Framework integriert werden. Der Risk-Management-Core ist ein generisches Modell zur Ermittlung des Systemrisikos. ZF hat sich hier bei Diskussionen und der Anpassung des Modells eingebracht und bei der Anwendung des Risk-Core-Management auf Arbeiten zur Verhaltensspezifikation (Sollverhalten) und das PSM mitgearbeitet. Abbildung 31 zeigt die finale Darstellung des Risk-Management-Core im Assurance Framework. Abbildung 32 zeigt den Prozess zur Risiko basierten Ableitung von Anforderungen.

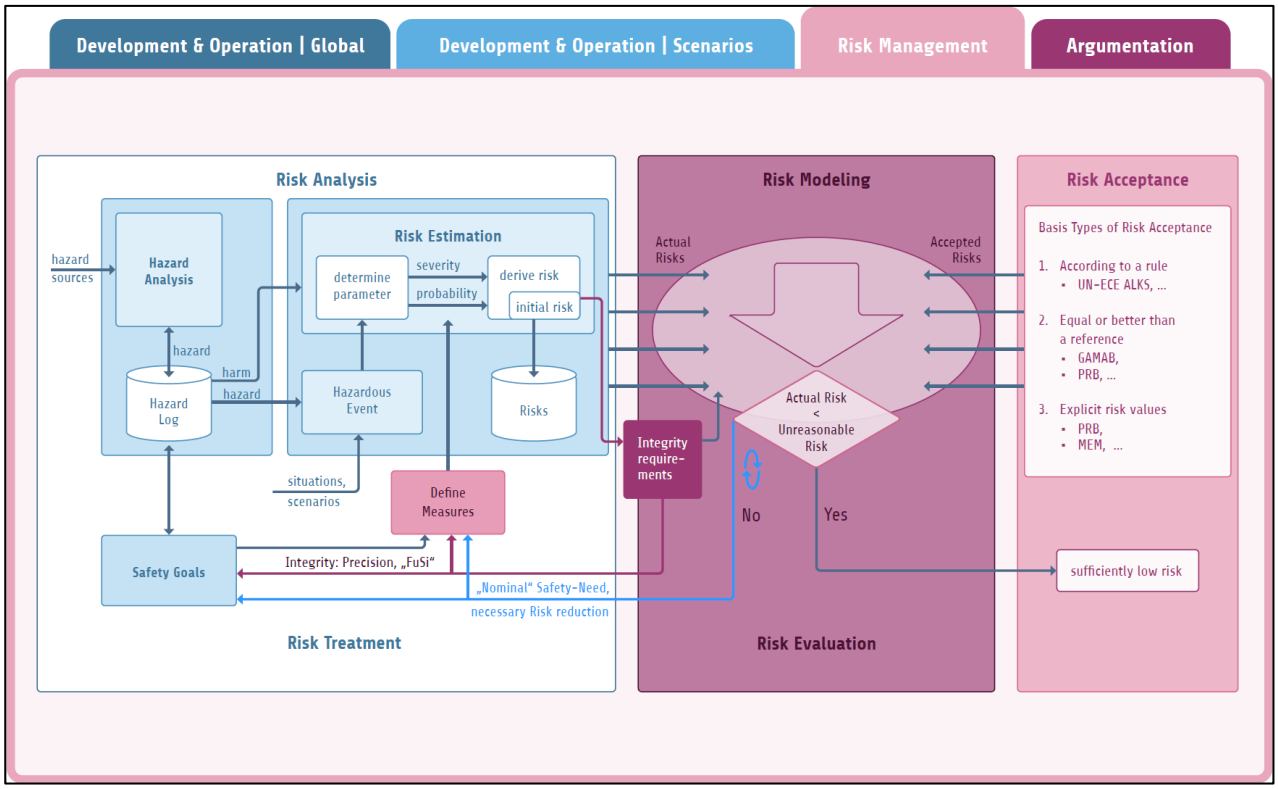


Abbildung 31: Risk-Management-Core im Assurance Framework

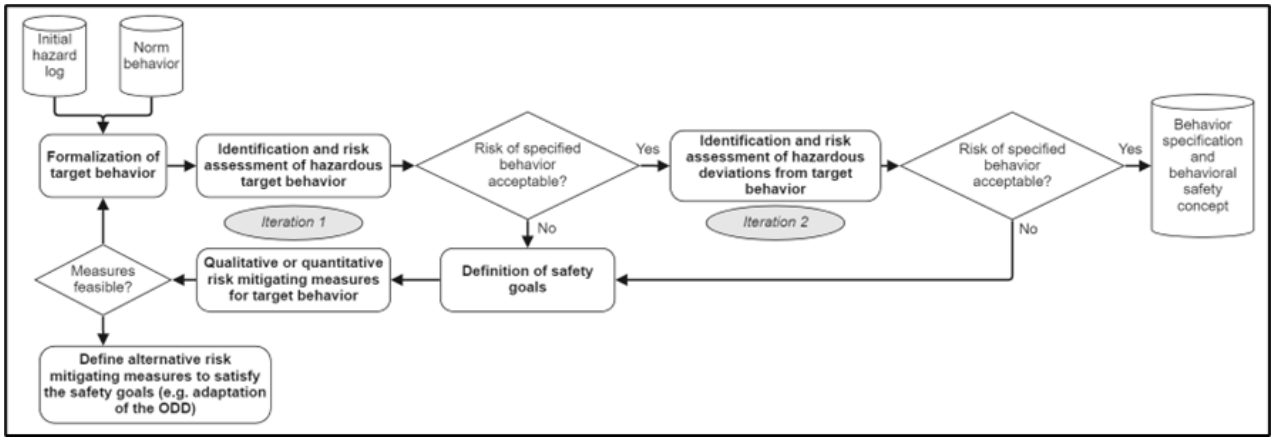


Abbildung 32: Risiko basierte Ableitung von funktionalen Anforderungen

Zum Ende des Projekts wurden die Ergebnisse des AP3.2 im bereits genannten Deliverable D05 „Initiale Quantifizierung der Anforderungen" zusammengefasst. ZF hatte hier die Federführung inne und hat in diesem Rahmen sowohl inhaltlich gearbeitet als auch die Beiträge der Partner koordiniert.

2.1.3.3 AP3.3

Innerhalb des AP3.3 wurden von ZF und den Konsortialpartnern die Grundlagen für die durchgängige Argumentationsstruktur im VVM-Projekt gelegt. Sehr schnell wurde klar, dass das Thema Argumentationsstruktur ein wesentliches Querschnittsthema im VVM-Projekt war. Es wurde deshalb eine TP-übergreifende Arbeitsgruppe Core03 gegründet, die unter der Leitung des Fraunhofer-Institut IESE die Argumentationsstruktur erarbeitete. Diese wurde dann über die TP-übergreifende Arbeitsgruppe Core05 in die VVM-Gesamtmethode und das Assurance Framework integriert. In beide Arbeitsgruppen hat ZF seine Beiträge aus dem AP3.3 eingebracht. Zu Beginn des Projekts hat ZF die Arbeiten der Object Management Group zum Thema Risk Analysis and Assessment Modeling Language (RAAML) vorgestellt. Dies diente als Grundlage für die Erarbeitung der Argumentation in Core03. Daneben wurden verschiedene Ansätze der Safety-Argumentation gesichtet und innerhalb AP3.3 diskutiert, z.B. Goal Structuring Notation (GSN), die System-Theoretic-Process-Analysis sowie der klassische Functional Safety Ansatz aus der ISO26262. Auf dieser Basis konnte dann gemeinsam mit den Partnern die durchgängige Argumentationsstruktur erarbeitet werden, die dann in einem VVM-Results Board am 12. April vorgestellt werden konnte. Abbildung 33 zeigt das finale Ergebnis, die Argumentation innerhalb des Assurance Frameworks.

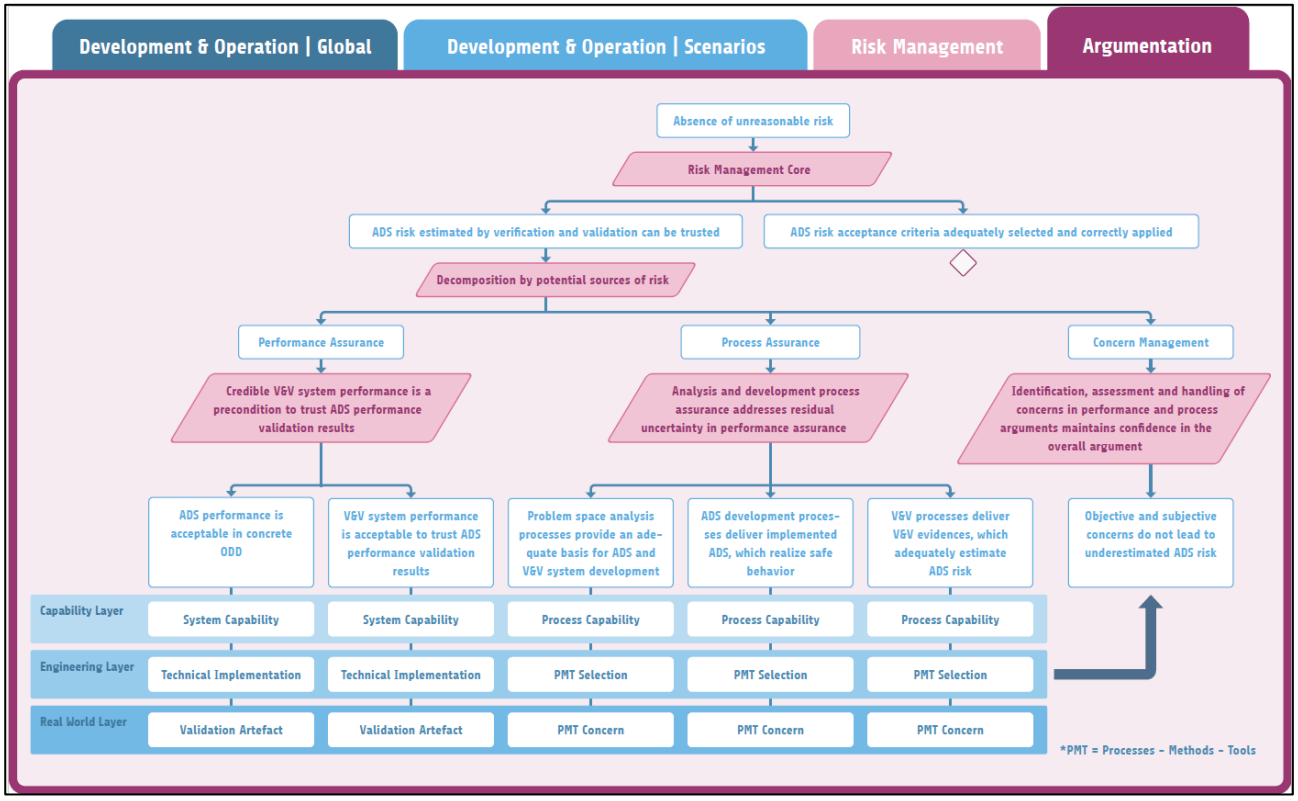


Abbildung 33: Argumentationsstruktur als Teil des Assurance Framework

2.1.3.4 AP3.4

Mit den Arbeiten in AP3.4 zur Ableitung einer exemplarischen Architektur wurde die Verbindung zwischen der Sicherheitsbewertung (TP3) einerseits und dem Thema System- und Testanforderungen (TP4) andererseits geschaffen.

ZF konnte hier zu Beginn Ergebnisse aus der Mitarbeit in der GfSE Arbeitsgruppe System Architektur Framework (SAF) einbringen, u.a. auch die SAF-Ontologie der Operationalen Domäne. In einem ersten Schritt wurde dann gemeinsam mit den Partnern ein Fähigkeitennetzwerk entwickelt, das von ZF unter Nutzung der o.g. Ontologie in das modell-basierte Werkzeug Cameo überführt wurde. Abbildung 34 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt des Netzwerks in Cameo.

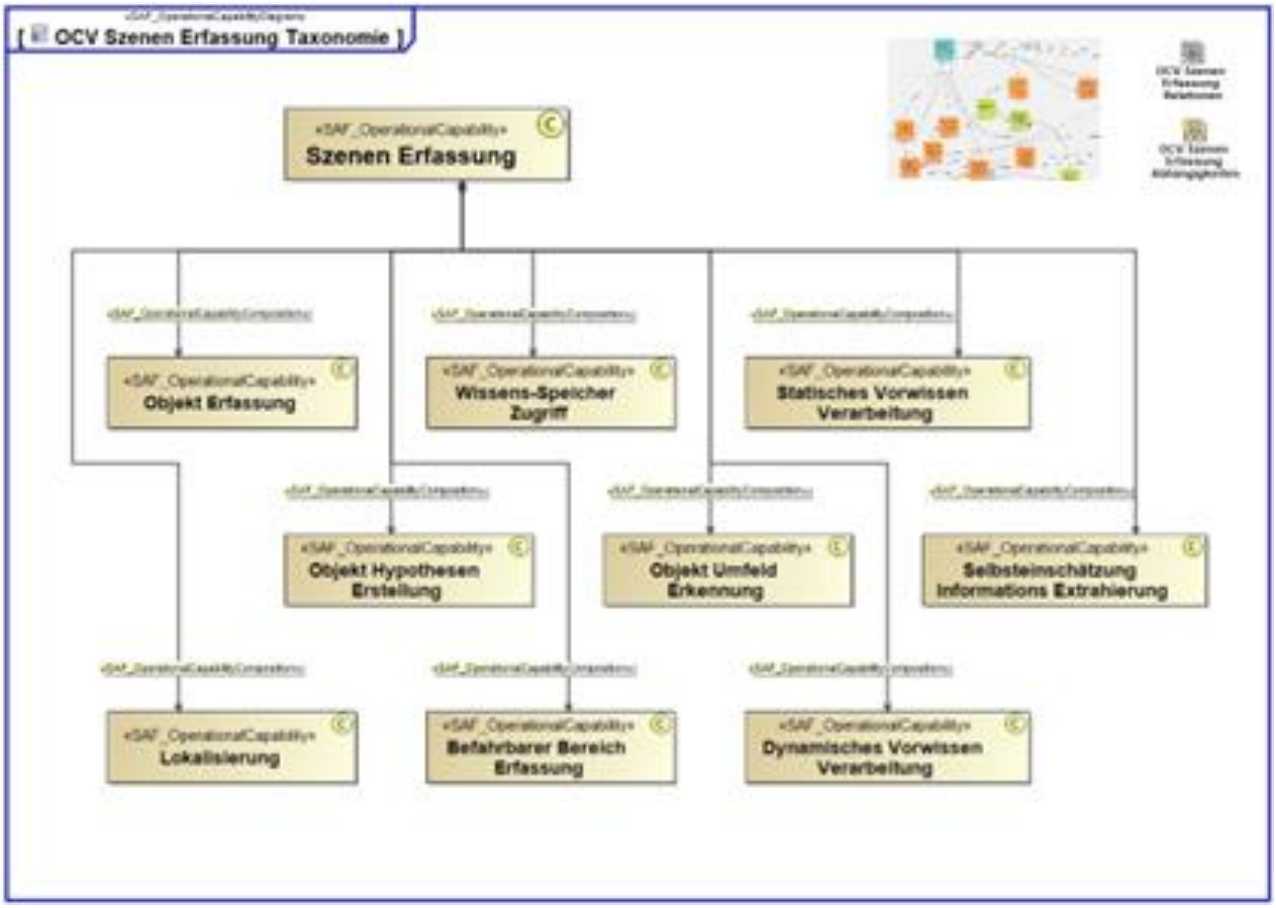


Abbildung 34: Abbildung des Fähigkeitennetzwerks (Ausschnitt) in Cameo

Als Grundlage für die Übertragbarkeit der AP3.4 Ergebnisse in das folgende Teilprojekt TP4 wurde exemplarisch eine funktionale Systemarchitektur maßgeblich seitens ZF erarbeitet. Der Schwerpunkt lag auf der Definition der unterschiedlichen Architektur-Sichten innerhalb der VVM-Gesamtarchitektur, der funktionalen Analyse sowie der logischen Synthese. Es erfolgte eine exemplarische Darstellung der Sichten anhand des sogenannten Null-Designs. Abbildung 35 zeigt die entsprechende Ansicht zu Fähigkeit und Funktion im automatisierten Betrieb.

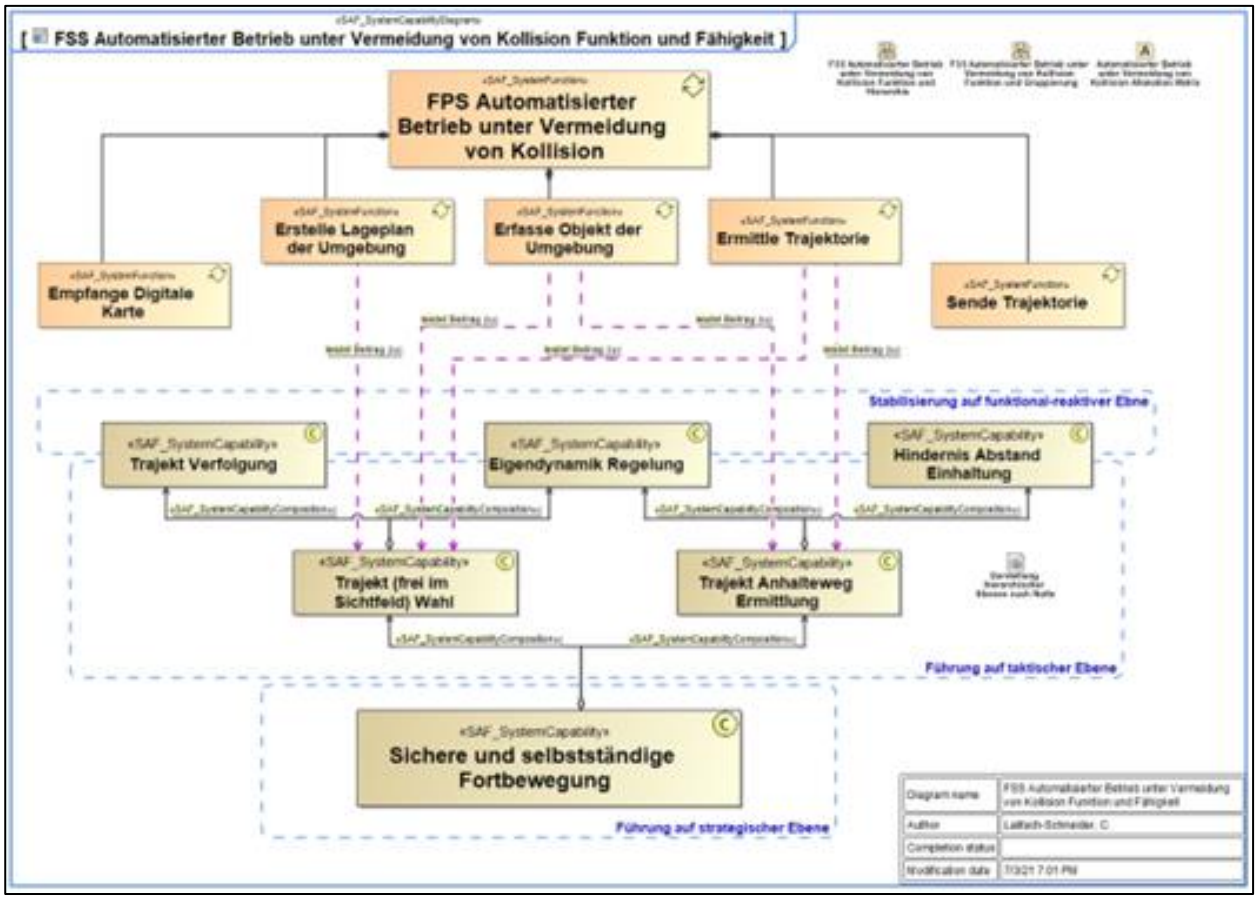


Abbildung 35: Automatisierter Betrieb - Fähigkeit und Funktion

Auf Basis dieser Architekturen erfolgte die Weiterentwicklung des Konzepts der „Fähigkeiten-basierten Architektur“. Insbesondere wurde mit den Partnern ein Ansatz zur Herleitung von Systemfähigkeiten auf Basis einer Verhaltensspezifikation für automatisierte Fahrsysteme entwickelt. In diesem Kontext arbeitete ZF auch bei der Definition und Weiterentwicklung einer Ontologie zur Fähigkeiten-Modellierung mit. Dieser Ansatz ist in Abbildung 36 dargestellt.

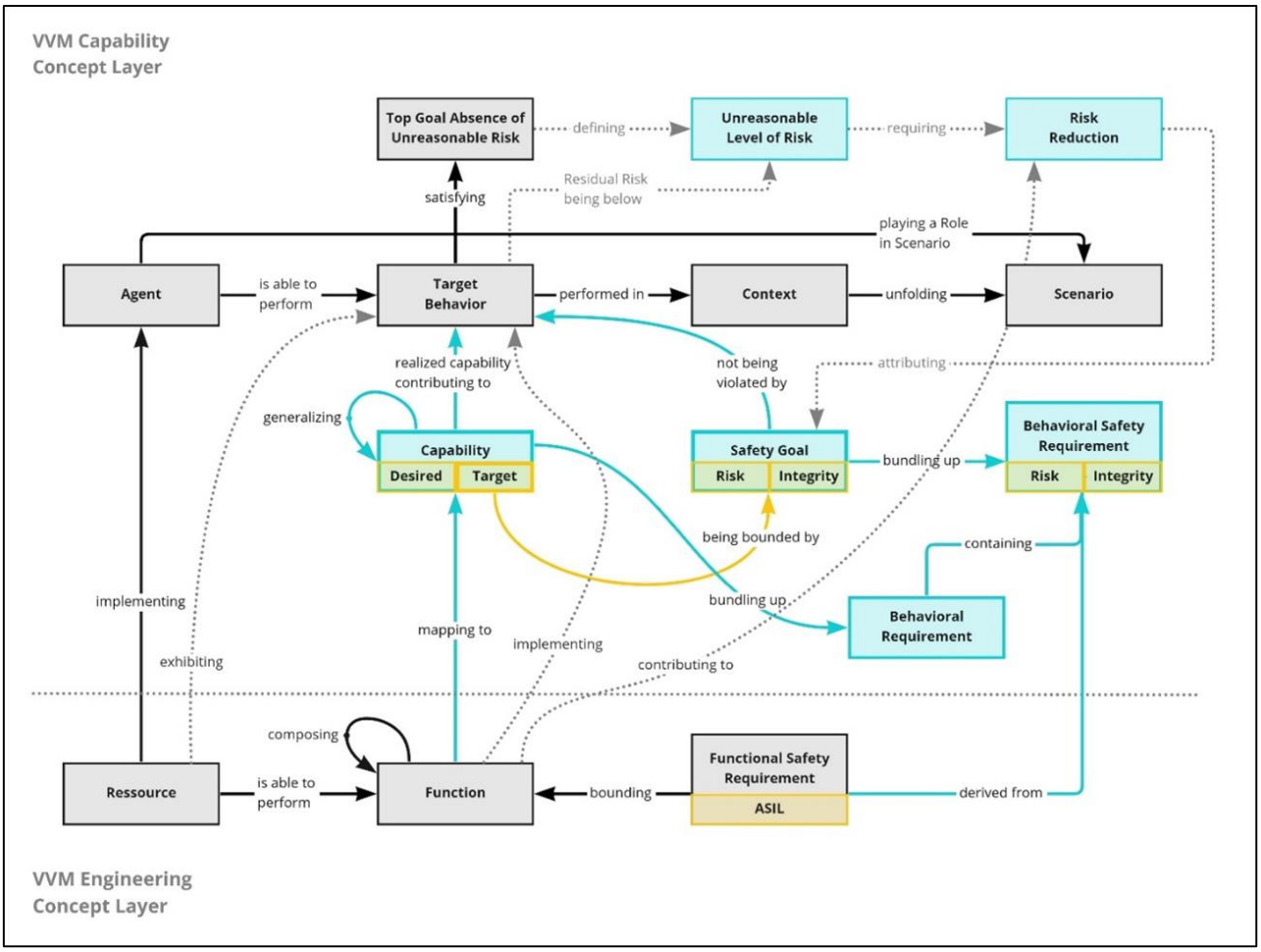


Abbildung 36: Ansatz "Fähigkeit als Brücke" - Verhaltensspezifikation und funktionale Architektur

Die Ergebnisse des AP3.4 wurden in der TP-übergreifenden Arbeitsgruppe Core02 an das TP4 übergeben.

2.1.4 TP4 Regelwerk System- und Testanforderungen

Ziel des TP4 war die Schaffung eines methodischen Ansatzes zur Ableitung von System- und Testanforderungen am Beispiel des Use Case Urbane Kreuzung. Dazu wurden in AP4.1 Methoden entwickelt, anhand derer aus der funktionalen Systemarchitektur und dem Sicherheitskonzept nicht-wettbewerbsdifferenzierende System- und Testanforderungen bestimmt werden können. Die Methodenentwicklung erfolgte zunächst auf Basis des ersten Entwurfs der funktionalen Systemarchitektur und des lokalen Sicherheitsziels (aus TP3). Sie wurden anschließend sukzessive verfeinert. Die Plausibilität und Anwendbarkeit der Methoden wurde dann exemplarisch in den Arbeitspaketen Systemanforderungen (AP 4.2) und Testanforderungen (AP 4.3) untersucht.

Innerhalb des TP4 hat ZF wesentliche Beiträge zur Methodik der Ableitung von System- und Testanforderungen geleistet. Insbesondere wurden auf Basis der Arbeiten des TP3 nicht wettbewerbsdifferenzierende Systemanforderungen und daraus folgend funktionale Fahrzeug- und Systemarchitekturen erarbeitet. Auch wurden von ZF exemplarisch technische Systemanforderungen und -architekturen erzeugt, die ein wesentlicher Beitrag zur Verbindung zum

TP7 waren. Als zentrales Teilprojekt im VVM-Gesamtprojekt hatte das TP4 entscheidende Schnittstellen vor allem zu TP3, TP7 und zum Thema VVM-Gesamtmethode. ZF hat sich in den entsprechenden TP-übergreifenden Arbeitsgruppen (Core02, Core04, Core05) inhaltlich und organisatorisch eingebracht, teilweise auch die Leitung von Gruppen (Core04) übernommen.

2.1.4.1 AP4.1

Innerhalb des AP4.1 fanden die Arbeiten zur Methodik der Ableitung von System- und Testanforderungen statt. Das beinhaltete auch die Entwicklung von entsprechenden KPI-Konzepten, bzw. Güte- und Akzeptanzkriterien. ZF hat sich in diesem Kontext an der Identifikation von relevanten Metriken mittels des GQM-Modells (Goal, Question, Metric) beteiligt. Die Ergebnisse sind im öffentlich zugänglichen Deliverable D03 „Assurance framework and new methodologies within the V & V structure“ verfügbar.

Außerdem hat ZF im AP4.1 zum Thema Testplanung und der Methode zur Erstellung der funktionalen Testspezifikation gearbeitet. Eine wesentliche Voraussetzung war dabei auch die Verbindung von funktionalem Design und Testplanung. Abbildung 37 zeigt die Testplanung im Assurance Framework, Abbildung 38 ist die Übersicht der Testplanung in der Gesamtdarstellung.

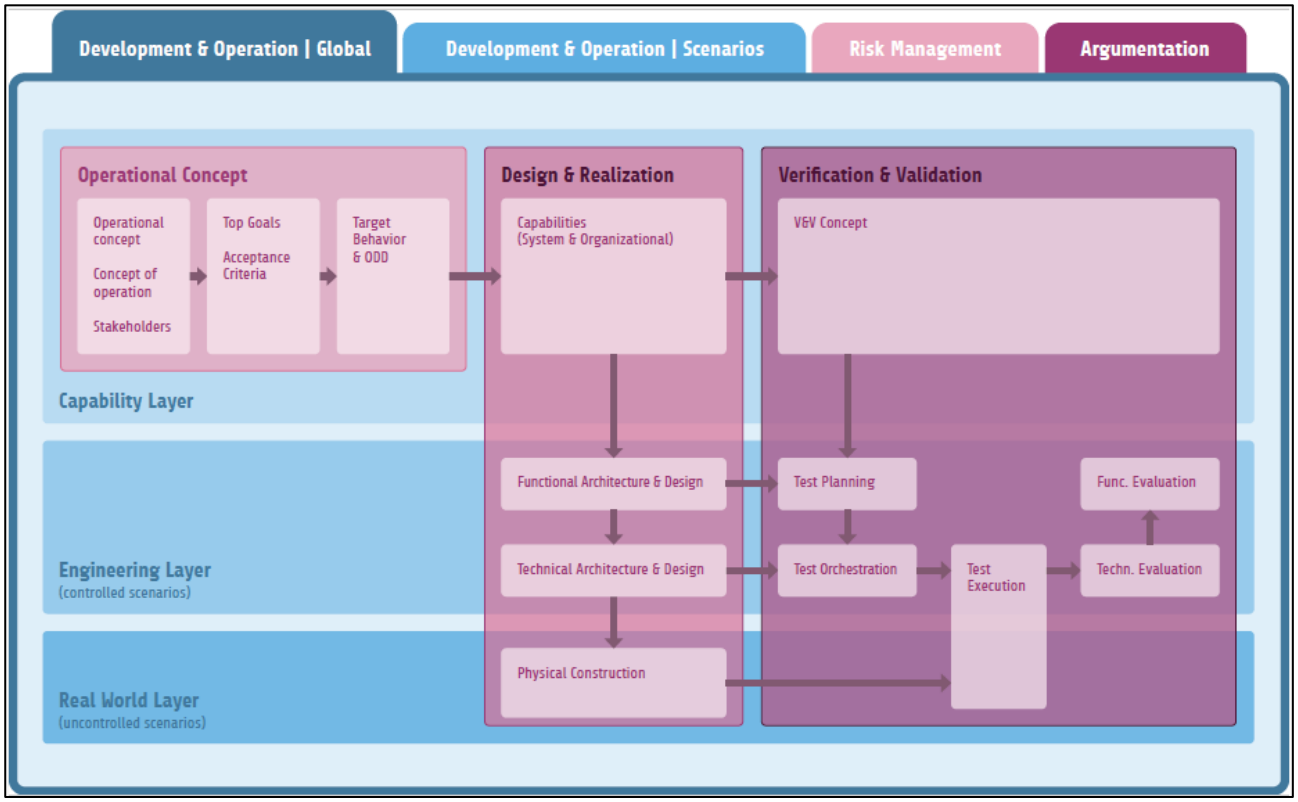


Abbildung 37: Testplanung im Assurance Framework

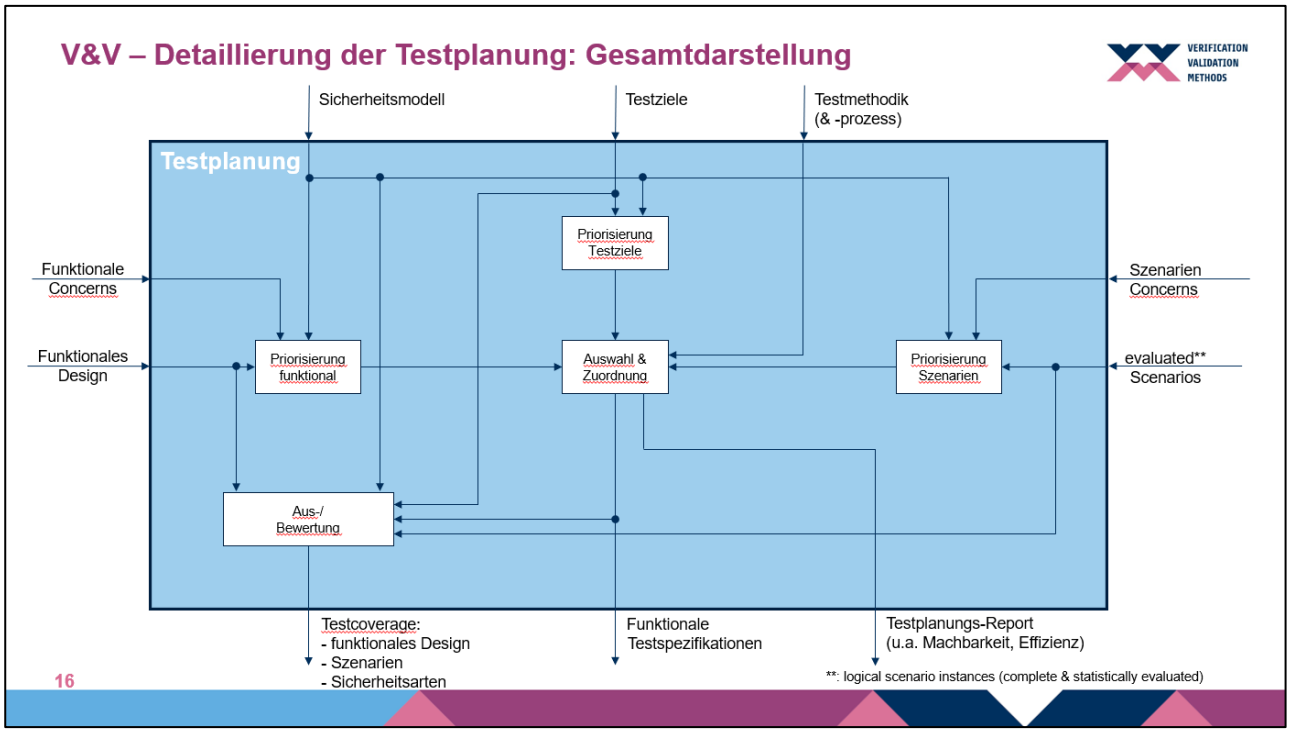


Abbildung 38: Gesamtdarstellung der Testplanung

Die Methode der Testplanung wurde von ZF und den Konsortialpartnern im Deliverable D06 „Verfeinerte Gütekriterien, System- und Testanforderungen“ beschrieben. Auch dieses Dokument ist öffentlich zugänglich.

Die Einbindung der Testplanung in die VVM-Argumentationsstruktur erfolgte in einem Workshop der TP-übergreifenden Arbeitsgruppe Core03.

2.1.4.2 AP4.2

Im AP4.2 stand die Anwendung der Methoden zur Ableitung exemplarischer Systemanforderungen im Vordergrund. Außerdem wurden beispielhaft Ausschnitte von Systemarchitekturen auf funktionaler und technischer Ebene erarbeitet, um dem folgenden TP7 eine Grundlage für die Testumsetzung mittels Testorchestrierung geben zu können. Innerhalb des AP4.2 hat ZF die Arbeitsgruppen 6 „Ableiten von Systemanforderungen aus dem Null-Design“ und 9 „Technische Architektur“ geleitet und dort wesentliche Beiträge zur Erstellung exemplarischer Anforderungen und Architekturen geleistet. Abbildung 39 verdeutlicht diese Inhalte und deren Umfang. Die Schnittstelle zwischen AP4.2 und dem TP7 wurde über die bereits o.g. Arbeitsgruppe Core04 sichergestellt, die von ZF geleitet wurde.

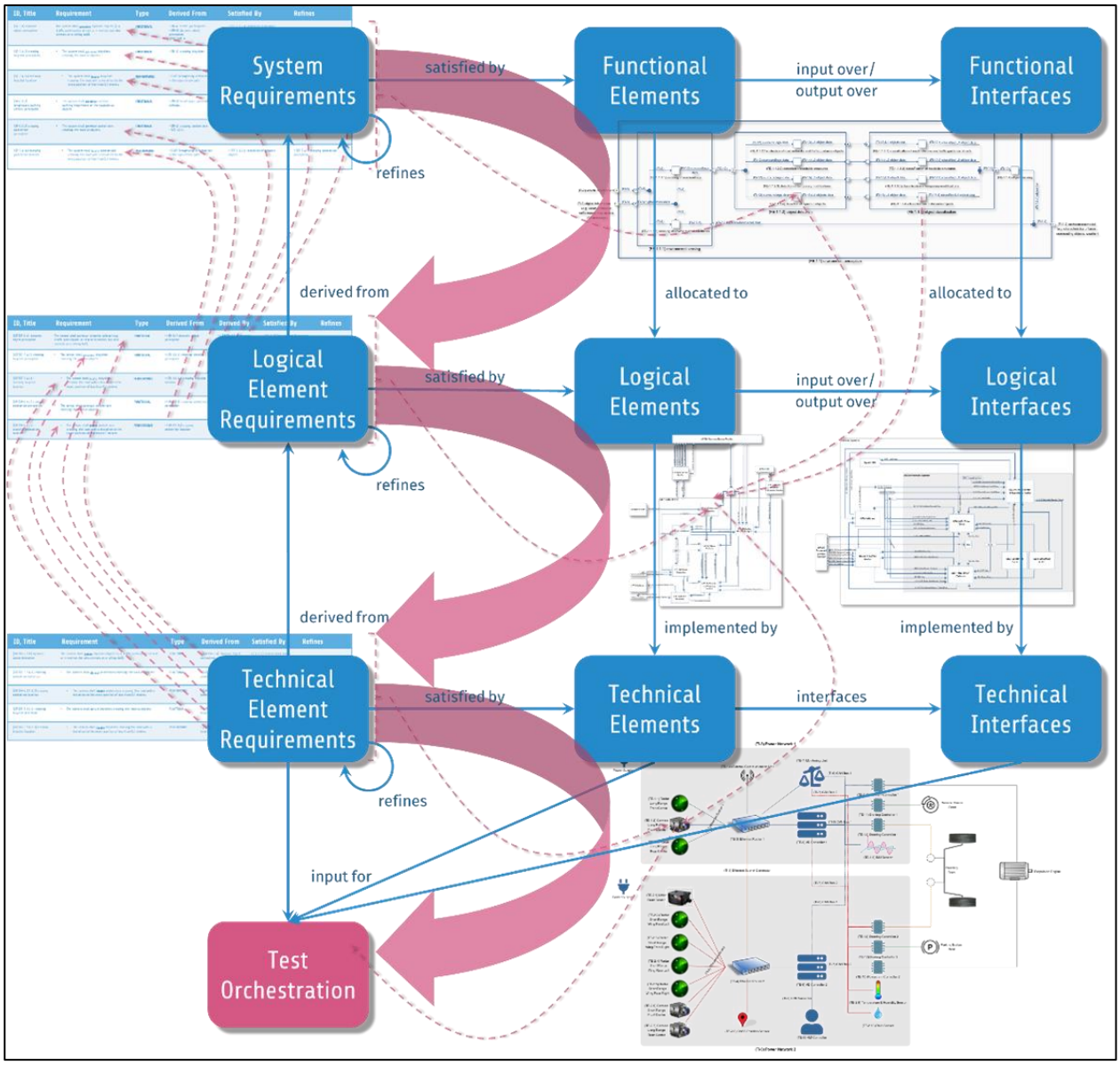


Abbildung 39: Systemanforderungen und -architektur als Voraussetzung der Testorchestrierung

Neben den Aktivitäten in den o.g. Arbeitsgruppen hat ZF an der Schnittstelle zum TP3 (Sicherheitsbewertung und Konzept) in der Arbeitsgruppe Core02 mitgearbeitet. Hier wurde der Einfluss von Fähigkeiten und Sollverhalten auf Funktionen und Architekturen untersucht. Basierend auf exemplarischen Verhaltenssicherheitsanforderungen des TP3 wurden funktionale Sicherheitsanforderungen und der Entwurf eines funktionalen Sicherheitskonzepts erarbeitet. In diesem Rahmen wurde von ZF die Methode zur Ableitung von Güten exemplarisch angewendet. Die Ergebnisse sind im Deliverable D11 „Finale Gütekriterien und finale Methodik“ veröffentlicht.

2.1.4.3 AP4.3

Im AP4.3 wurde die Definition von Testanforderungen bearbeitet. Das betraf die Methode, die Form und die exemplarische Anwendung. Die enge Zusammenarbeit mit dem TP7 „Testvorgehen“ war dabei besonders wichtig. Hier konnte sich ZF mit der Leitung der übergreifenden Arbeitsgruppe

Core04 (Testplanung und Testorchestrierung an der Schnittstelle TP4-TP7) und innerhalb der AG10 (Testplanung und funktionale Testspezifikation) einbringen.

Im Rahmen der AG10 konnte ZF gemeinsam mit den Partnern das Format der funktionalen Testspezifikation entwickeln. Basierend auf der Methode zur Testplanung aus dem AP4.1 wurden dann konkrete Beispiele einer funktionalen Testspezifikation für Verifikation und Validierung erarbeitet, die in der Folge an das TP7 übergeben werden konnten. Wesentliche Grundlagen waren bei der konkreten Umsetzung auch die funktionale Architektur einerseits und der FUC2.3 andererseits. Auch die entsprechenden Güten wurden berücksichtigt, wie sie in der GQM des AP4.2 definiert wurden. Abbildung 40 zeigt exemplarisch den Ausschnitt aus einer solchen funktionalen Testspezifikation.

Beispiel für eine Funktionale Testbeschreibung

		Erläuterung, Anmerkung	Beispiel
1	**ID**	Eindeutige ID	FT-101
2	**Titel**	Eindeutige Bezeichnung	Einhalten unkritischer lateraler Abstände im Kontext FUC2.3
3	**Umgebung**	Ziel im Rahmen der Validierung ist es, die ODD zufällig und vielseitig zu durchfahren, um kritische Unknowns finden zu können.	
4	**Testobjekt**	ADS-Funktion (Damit ist das gesamte funktionale System gemeint.)	TP4 AG9 AD Funktionale Systemarchitektur
4	**Validierungskriterien (streggenommen sind Validierungs-Maße gemeint)**	Es muss nachgewiesen werden, welche Sicherheitsreserve im Falle einer Kollisionsvermeidung besteht. Als KPI müssen Kritikalitätsmaße herangezogen werden. Für dieses Beispiel ziehen wir folgenden KPI heran: • benötigte Verzögerung als Funktion von Geschwindigkeit und Abstand im Verhältnis zur max. möglichen Verzögerung • max. mögliche Verzögerung hängt vom Reibwert ab → wenn der Reibwert nicht mit gemessen werden kann, muss hier eine Vorgabe gemacht werden	zu messen: • Geschwindigkeit des Fahrzeugs in X-Richtung • Abstand zum Fußgänger in X-Richtung • Bezugsgröße: gefahrene Strecke, gefahrene Zeit, durchfahrene Szenarien zu berechnen: • benötigte Verzögerung, um Kollision zu vermeiden • benötigte Verzögerung / max. möglicher Verzögerung
4	**Gütekriterien**	1. Gütekriterium (z.B. Schwellwert für die Kritikalität). 2. Statistische Auswertung (inkl. Konfidenzbestimmung): Überschreitung des Gütekriteriums (z.B. Schwellwert) je km, h, Anzahl Szenarien.	1. Schwellwert liegt bei 0.3 (30% der max. möglichen Verzögerung) 2. tbd

4a	**Messdaten/Messgrößen**	2023_07_17: Zeile neu eingefügt
		Für die Auswertung benötigte Informationen, zB:
		• um die Ursachen analysieren zu können, warum das Gütekriterium eines Validation Criteria verletzt wurde
			Bsp:
			• Kameramaterial/Bildaufzeichnungen
			• Daten aus dem Ego-Fahrzeug zu
			  ○ Bewegung
			  ○ Umfeld
			  ○ etc.

Abbildung 40: Exemplarische funktionale Testspezifikation

Im Rahmen der Arbeitsgruppe Core04 hat ZF zusammen mit den Partnern die Prozesse Testplanung und Testorchestrierung zusammengeführt und in das Assurance Framework (Abbildung 37) integriert. Die folgende Abbildung 41 zeigt die Verbindung von Testplanung und Testorchestrierung. Wesentlich an dieser Schnittstelle ist die Übergabe der Informationen zu funktionalem Testobjekt, funktionalen Zielgrößen und Umgebung (Szenarien), so dass diese in der Testorchestrierung weiterverarbeitet werden können.

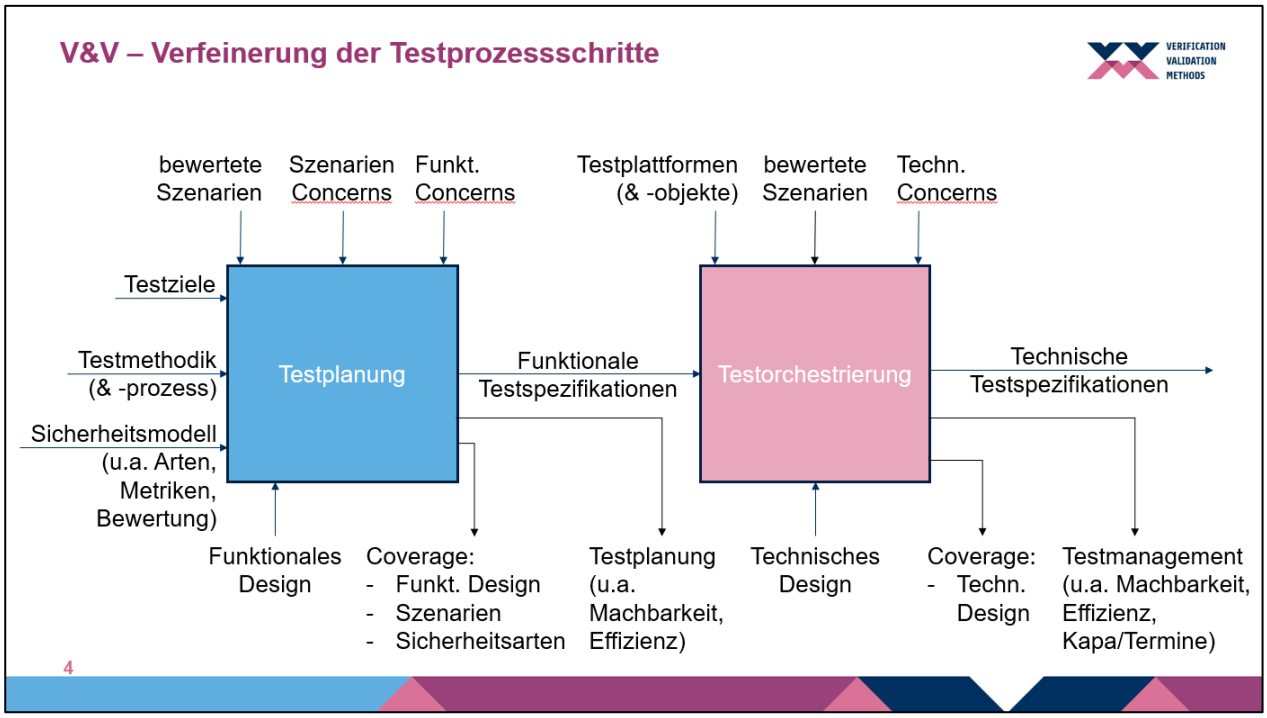


Abbildung 41: Verbindung von Testplanung und Testorchestrierung

Auch die Ergebnisse des AP4.3 sind im bereits genannten Deliverable D06 dokumentiert worden. Auf dieser Basis wurde dann gemeinsam mit den Partnern die Verbindung der Testplanung zum V&V Konzept (Core04) und die Integration in die VVM-Gesamtmethode (Core05) erarbeitet.

2.1.5 TP5 Simulationssteuerung

Im TP5 hatte ZF keine Beiträge geplant.

2.1.6 TP6 Datenbereitstellung

ZF hat sich im TP6 nur im **AP6.1** zu den Themen Datenmanagement und Vorverarbeitung beteiligt. Es ging dabei um die Datenbedarfs- und Datenanforderungsanalyse sowie die Festlegung Datenformaten, um die Arbeiten in den anderen Teilprojekten zu ermöglichen. ZF konnte auf interne Erfahrungen mit verschiedenen Messfahrzeugen und Messdatenerhebungen zurückgreifen. Darauf basierend hat ZF wesentliche Beiträge zur Spezifikation der Anforderungen an zu erhebende Messdaten hinsichtlich Trajektorien, Objektlisten, Georeferenzierung, Resimulierbarkeit, Formatdefinition und Datenqualität geleistet. Die Arbeiten der Partner zu Konzepten für das Datenmanagement eingefahrener Daten und für das Labeling wurden von ZF im Rahmen von Reviews unterstützt. Dabei hat ZF sichergestellt, dass entsprechende Anforderungen aus TP2, TP7 und TP8 einfließen konnten.

Im TP8 war ZF an der Entwicklung des OMEGA-Formats als Messdatenformat beteiligt. Diese Aktivität wurde auch aus dem TP6 heraus unterstützt.

2.1.7 TP7 Testvorgehen

ZF hatte im TP7 „Testvorgehen“ die industrielle Leitung inne. Die wissenschaftliche Leitung wurde durch das FZI Forschungszentrum Informatik ausgeführt. In Rolle des Co-Lead hat ZF maßgeblich bei der Organisation des TP7 (Regeltermine, Quartalstreffen, Planung, etc.) mitgewirkt. Das Quartalstreffen des TP7 im September 2022 wurde durch ZF am Stammsitz in Friedrichshafen organisiert und durchgeführt.

Zum Thema Testvorgehen haben ZF und die Partner die Aspekte Prozesse, Methoden und Tools betrachtet. Dazu wurde in AP7.2 zu Prozessen und Methoden gearbeitet und im Ergebnis das Konzept der Testorchestrierung erstellt. Im AP7.3 fanden alle Arbeiten zu Testwerkzeugen statt mit dem Ergebnis, dass ZF und die Partnern Referenzumsetzungen demonstrieren konnten. Basis aller Arbeiten war die gemeinsame Startpunktbildung zu den Anforderungen im AP7.1.

An der Schnittstelle von TP7 zu TP4 wurden in der Arbeitsgruppe Core04 (Leitung durch ZF) Testorchestrierung und Testplanung verbunden und in das Assurance Framework integriert. Der Abgleich mit der Argumentationsstruktur erfolgte in einem Workshop mit der Arbeitsgruppe Core03.

Im Rahmen der Arbeitsgruppe Core05 wurde seitens ZF an der Integration der Testorchestrierung in die VVM-Gesamtmethode mitgearbeitet.

Die Ergebnisse des TP7 sind in drei Deliverables dokumentiert worden:

- D04 „Initiales Konzept für Orchestrierung der Testinfrastruktur“
- D07 „Finale Methodik zur Orchestrierung“
- D12 „Umsetzung Testinfrastruktur“

Das D12 ist öffentlich zugänglich und beinhaltet auch die finale Methodik der Testorchestrierung. Bei allen Dokumenten war ZF sowohl Editor als auch Bereitsteller wesentlicher Inhalte.

2.1.7.1 AP7.1

Innerhalb des AP7.1 wurde die Analyse der Anforderungen an Testumsetzung und Testinfrastruktur durchgeführt. Im ersten Schritt wurde dazu bei allen Partnern eine Analyse der bestehenden Testinfrastrukturen durchgeführt und initiale Anforderungen daraus abgeleitet (Ergebnis E7.1a). Im zweiten Schritt wurden diese Anforderungen weiterentwickelt, hierarchisiert und priorisiert und im Ergebnis E7.1b zusammengefasst. Diese Ergebnisse dienten dann den folgenden AP als Grundlage in der Entwicklung von Methode und Referenzumsetzung.

ZF hat innerhalb des AP7.1 anhand der eigenen bestehenden Testinfrastruktur zunächst den State of the Art festgestellt und darauf aufbauend initiale Anforderungen entwickelt. Als industrieller Partner hatte ZF dabei einen besonderen Fokus auf den industriellen Einsatz, wie z.B. die Skalierbarkeit oder Qualitätsmerkmale und Fehlertoleranzen der Toolkette. Diese Erkenntnisse wurden in die Unterarbeitsgruppen des AP7.1 eingebracht. Dabei ging es konkret um Anforderungen an Messdatenerhebung und Messdatenmanagement (UAG2, Schnittstelle zu TP6 und TP8) sowie Anforderungen an Simulation (UAG4, Schnittstelle zu TP5 bzw. zum Förderprojekt SetLevel4to5). Im weiteren Projektverlauf hat ZF seine Anforderungen und seine Sichtweise auf Hierarchisierung und Priorisierung von Anforderungen an die Testinfrastruktur auch in die

Unterarbeitsgruppen AG Szenarien (Anforderungen an Szenarienbeschreibung und zu verwendende Standards), AG Orchestrierung Testinfrastruktur (Anforderungen an unterschiedliche Testinstanzen, ZF-Fokus: Sim-SiL und Closed-Loop-HiL) und AG Testbeschreibung (Anforderungen an die Beschreibung von Testmitteln) eingebracht.

Die folgenden Abbildungen verdeutlichen die prinzipielle Vorgehensweise von ZF im AP7.1. Ausgehend vom IST-Zustand wird ein SOLL-Zustand entwickelt, der dann als Basis zur Ableitung von Anforderungen dient. In diesem Beispiel zeigt Abbildung 42 den Ausgangszustand. Dieser ist noch stark durch manuelle Eingriffe, nicht vollständig durchgängige Toolketten, zu enge Verknüpfung von DuT (Device under Test) und Simulationstooling gekennzeichnet. Er ist bestenfalls ansatzweise für Automatisierung und Skalierung geeignet. Abbildung 43 zeigt den SOLL-Zustand und damit eine Vorlage für Anforderungen an eine entsprechende Weiterentwicklung. Durchgängige Toolketten, konsequente Automatisierung und Skalierbarkeit sowie Nutzung eines Simulationsdatenmanagements, Unabhängigkeit von DuT und Simulationstooling sind hier die Faktoren, die Test und Validierung als Serviceangebot in einem industriellen Einsatz ermöglichen.

Ist-Zustand

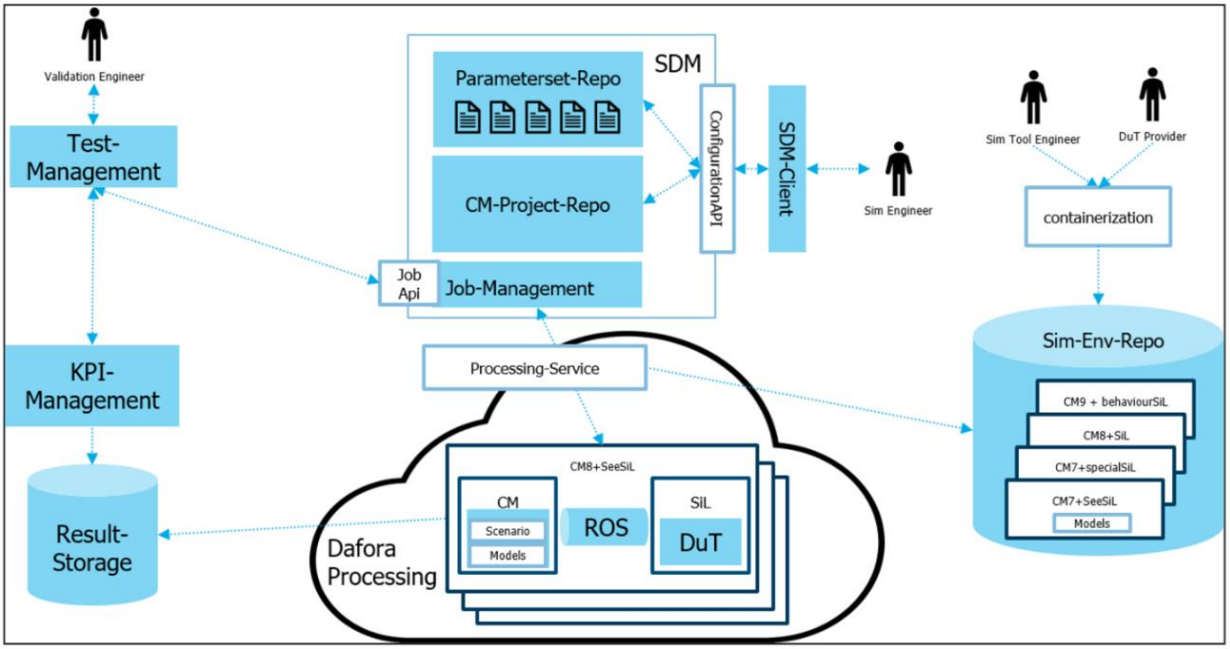


Abbildung 42: IST-Zustand des SiL-Framework

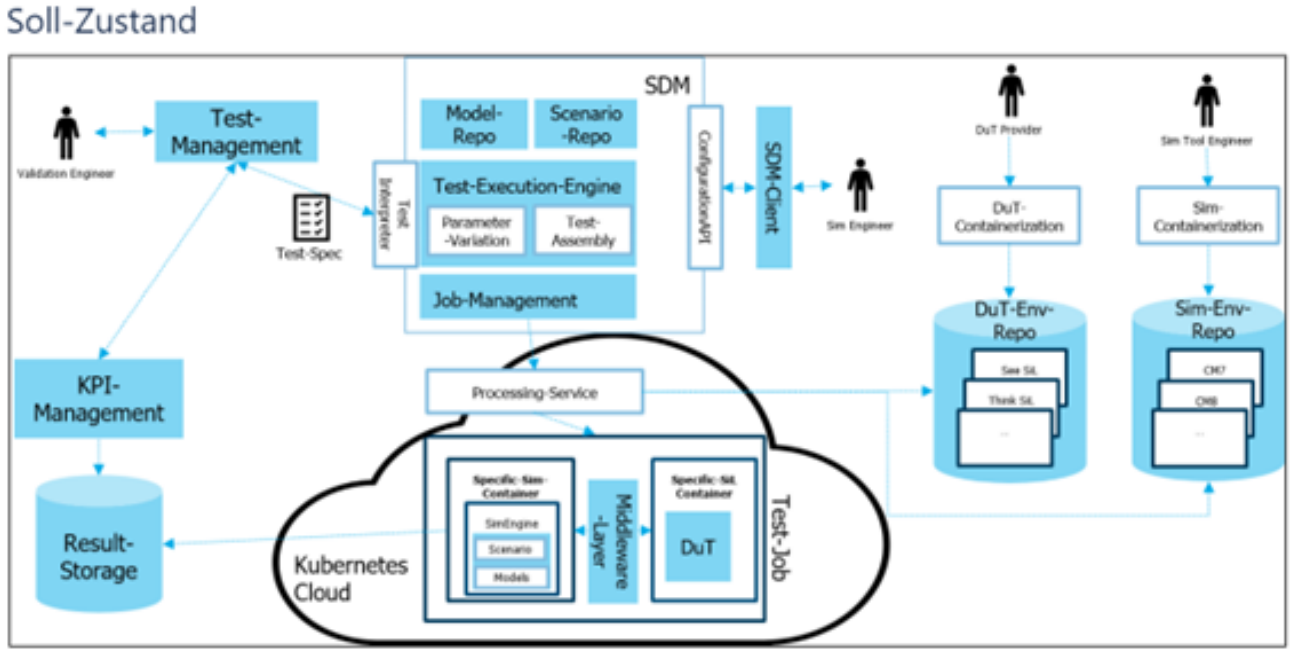


Abbildung 43: SOLL-Zustand des SiL-Framework

2.1.7.2 AP7.2

Im AP7.2 wurden von ZF und den Partnern der Prozess und die Methode zur Realisierung der Testumsetzung erarbeitet. Das Ergebnis ist die Testorchestrierung und damit der Prozess zur Ableitung der technischen Testspezifikation. Diese Ergebnisse wurden in den Deliverables D07 „Finale Methodik zur Orchestrierung“ und D12 „Umsetzung Testinfrastruktur“ dokumentiert. Das D12 ist öffentlich zugänglich.

Die Erarbeitung der Ergebnisse erfolgte innerhalb des AP7.2 in mehreren Unterarbeitsgruppen. U.a. waren dies die UAG „Testorchestrierung“, die von ZF geleitet wurde, und die UAGs „Szenarien“, „Testmittelvalidierung“ und „Testauswertung“, in denen ZF mitgearbeitet hat.

ZF hat dabei wesentliche Beiträge zur Erarbeitung der Prozesse und Methoden im Kontext der Testorchestrierung geleistet. Die Testorchestrierung baut auf der Testplanung (TP4) auf und muss die mit der funktionalen Testspezifikation transportierten Informationen zu funktionalem Testobjekt, funktionalen Zielgrößen und Umgebung (Szenarien) umsetzen in die technische Testspezifikation, die dann Testfälle auf Testinstanzen verteilt. Wie die Testplanung auch, ist sie in das Assurance Framework integriert worden (Abbildung 37). Abbildung 44 stellt die Testorchestrierung in ihrer Gesamtheit dar.

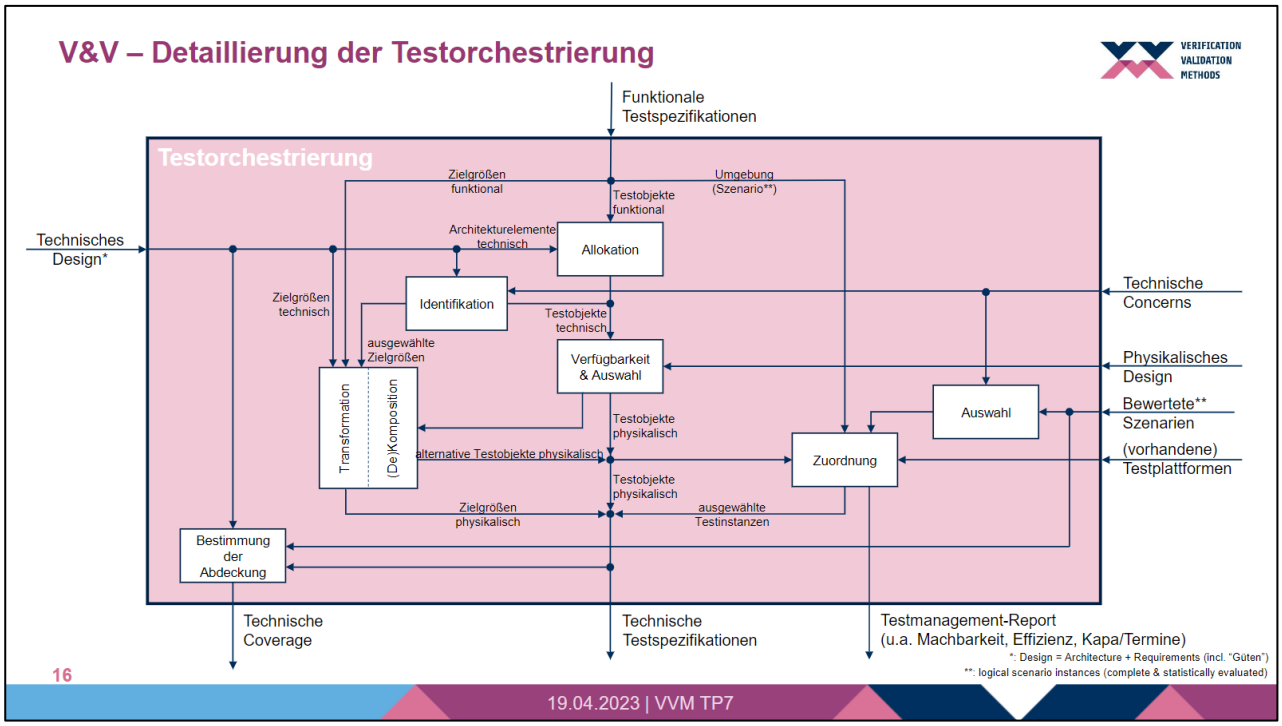


Abbildung 44: Detaillierung der Testorchestrierung

Wesentliche Schwerpunkte seitens ZF in der Entwicklung der Testorchestrierung waren neben der Möglichkeit, Testinstanzen zu bewerten, das Thema Testmittelvalidierung, insbesondere die Validierung virtueller Sensormodelle, und die Entwicklung des Formats der technischen Testspezifikation (Abbildung 45). Dabei wurde von ZF ein besonderes Augenmerk auf die Möglichkeit der Testautomatisierung gelegt.

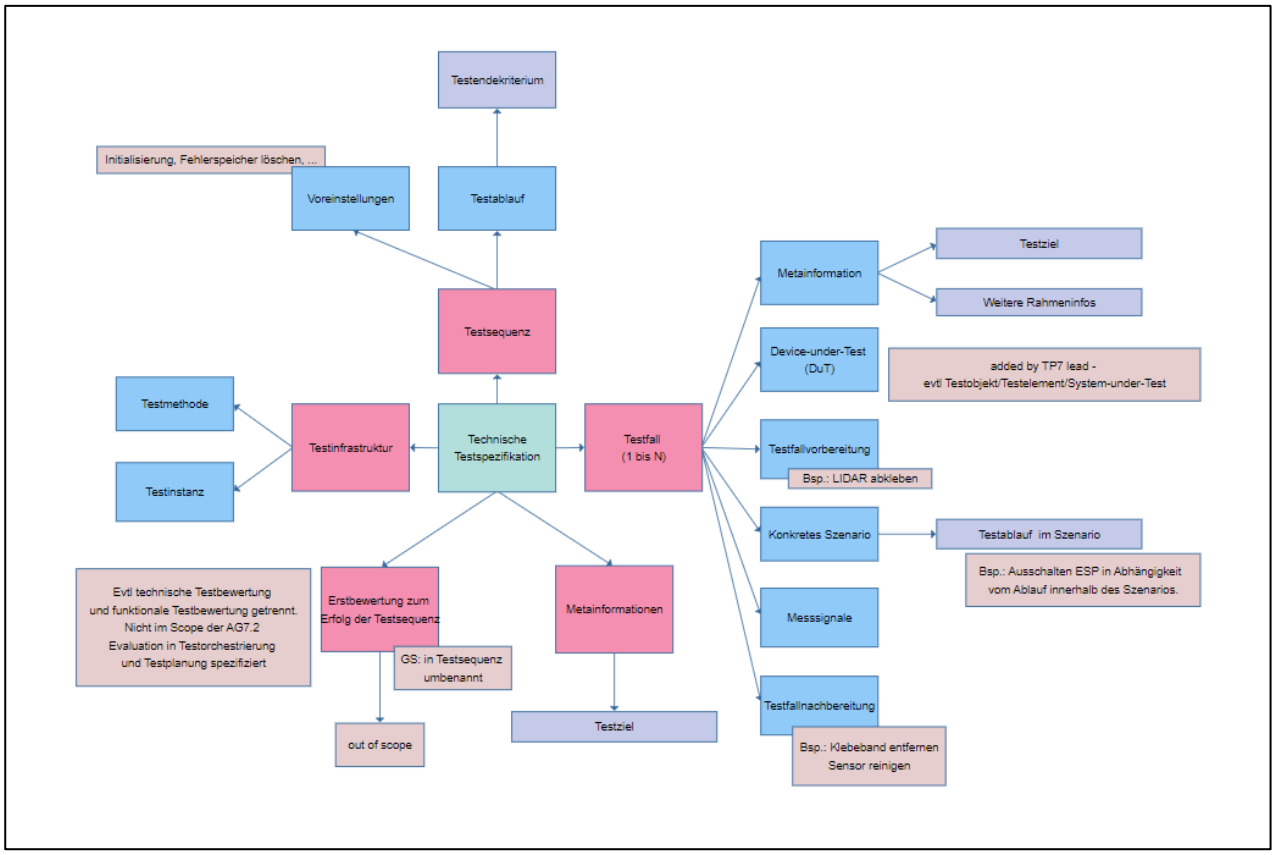


Abbildung 45: Struktur der technischen Testspezifikation

Die Einbindung der Testorchestrierung in die VVM-Argumentationsstruktur erfolgte mit ZF und den Partnern in einem Workshop mit der Arbeitsgruppe Core03. Die Verbindung von Testorchestrierung und V&V-Konzept, sowie die Integration der Testorchestrierung erfolgte im kontinuierlichen Austausch über die Arbeitsgruppen Core04 und Core05.

Ein weiteres Ergebnis, das von ZF in Zusammenarbeit mit dem fka innerhalb des AP7.2 erreicht werden konnte, war eine Studie zum Thema Einsetzbarkeit der einheitlichen (und im Projekt gesetzten) Szenarienformate openDRIVE (Statik) und openSCENARIO (Dynamik) in den gängigen Simulationsumgebungen (CarMaker, dSpace, Carla, etc.). Die Studienergebnisse wurden in das VVM-Projekt zurückgespielt (TP5, TP6, TP8, AG Szenarien). Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebniszusammenfassung.

OpenDRIVE Support Overview

- **Findings:**
  - Basic elements such as roads, lanes and intersections are supported
  - Some information for lanes and junctions may get lost
  - Road marks may pose problems
  - Certain configurations lead to connection or continuity issues
  - Signals are supported but very sensitive to definition and mapping
  - Assets do not get imported
  - Stop lines, zebra crossing and road paintings are not supported for both tools.
- **Conclusion:**
  - XODR is not fully supported
  - XODR currently not suited for exchange between tools.
  - Repeatability (speed limits, right-of-way, etc.) needs further analysis

- **Extract from results:**

Requirement	Description	OpenDRIVE Element	Carmaker	dSPACE
Georeference	[illegible]	[illegible]	Yes (>= CM10.2)	yes
Road linkage	[illegible]	[illegible]	Yes	yes
Number of lanes	[illegible]	[illegible]	Yes	Partially, only none, driving
Lane width	[illegible]	[illegible]	Yes	Only width, not border
Junction	[illegible]	[illegible]	Yes, improvement s in CM 10.2	Yes
Junction connection roads	[illegible]	[illegible]	Yes	Yes
Signal	[illegible]	[illegible]	Yes, right type according to ISO/VCD ID have to be set	Yes, needs mapping

Abbildung 46: Studienergebnisse zu Szenarienformaten

OpenSCENARIO Support Overview

- **Analyzed tools:**
  - Carla, VTD, Carmaker, dSPACE, Esmini
- **Findings:**
  - Small differences in files for different tools, e.g. path
  - Limited debugging information
  - Good XODR support required.
  - Detailed XOSC elements need further investigation. E.g. shapes
  - Controller definition currently tool specific
- **Conclusion:**
  - XOSC support is currently not complete
  - esmini has the best support for OpenSCENARIO, but limite simulation capabilities.
  - XOSC support is rapidly expanding

- **Extract from results:**

PrivateAction	Carla Story support	VTD Story support	Carmaker Story support	dSPACE Story support	esmini Story support
ControllerAction	Yes		No	Constraint	Yes
LaneChangeAction	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
LateralDistanceAction	No	Yes	No (CM11 DynamicShape)	No	No
LongitudinalDistanceAction	No	Yes	No (CM11 DynamicShape)	Yes	Yes
SpeedAction	Yes	Yes	Yes	Constraint	Yes
SynchronizeAction	No		No	Constraint	Yes
AcquirePositionAction	Yes	Yes	No	Yes	Yes
AssignRouteAction	Yes	No	No	Yes	Yes
FollowTrajectoryAction	No	Yes	Yes (with limitations)	Yes	Yes

Abbildung 47: Studienergebnisse zu Szenarienformaten

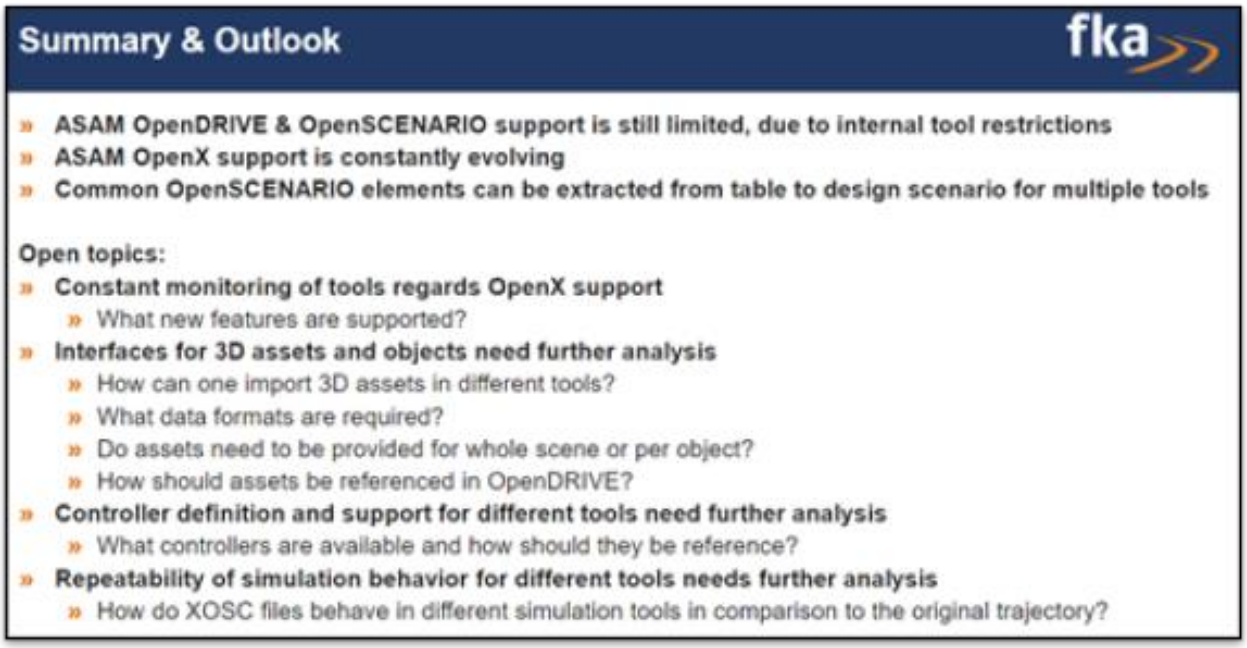


Abbildung 48: Studienergebnisse zu Szenarienformaten

2.1.7.3 AP7.3

Im AP7.3 erfolgten durch die beteiligten Konsortialpartner Referenzumsetzungen in Testinfrastrukturen. Diese Umsetzungen sind im Abschlussevent demonstriert und im Deliverable D12 dokumentiert worden.

Innerhalb des AP7.3 lagen die Schwerpunkte der ZF auf den Themen Testautomatisierung, SiL-Framework und skalierbare Ausführung in der Cloud, Szenario basiertes Testen sowie Einbindung von Sensormodellen. ZF hat in diesem Kontext an einer prototypischen Simulationsplattform zum Testen und Validieren von AD-Systemen gearbeitet. Dabei wurde ein virtuelles LIDAR Sensormodell aus dem Förderprojekt SetLevel4to5 in die Validation Tool Chain eingebunden und es erfolgte die Kopplung mit der CarMaker Simulation. Erkenntnisse wurden laufend in die Unterarbeitsgruppe „Testdurchführung“ zurückgespielt und dort die Übersicht der verfügbaren Testinstanzen (Testmittelbibliothek) entsprechend aktualisiert.

Zur Unterstützung der Testautomatisierung wurde von ZF eine DSL für technische Testspezifikationen entwickelt, die als JSON-Schema-basiertes Domänenmodell implementiert ist, das Testfälle beschreibt (siehe Abbildung 49). Jeder Testfall besteht aus Verweisen auf eine Testinstanz, ein logisches Szenario, eine Variationsregel, die die Ableitung konkreter Szenarien aus logischen Szenarien ausdrückt, ein Device under Test, eine Reihe von Ersatzmodellen und aus Verweisen auf während des Tests aufzuzeichnende Messgrößen, gegebenenfalls auch auf eine Beschreibung und Parametrisierung der Simulations-Engine.

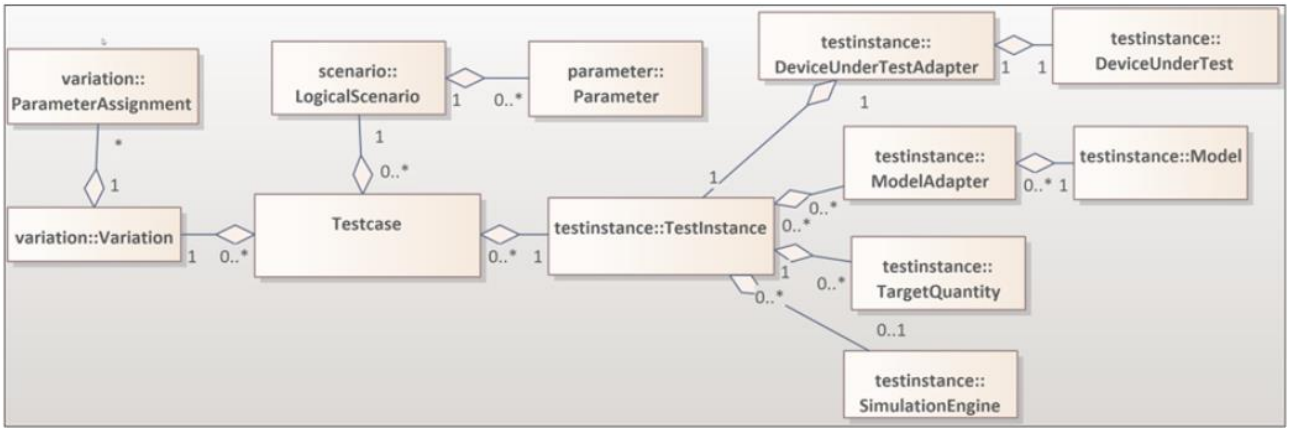


Abbildung 49: Domänenmodell der maschinenlesbaren technischen Testspezifikation

Ein Framework zur Testausführung, das die eingehenden Testspezifikationen interpretiert, wurde als choreografierte Micro-Batch-Verarbeitungspipeline implementiert, die aus unabhängig skalierten (Post-) Prozessoren und einem abschließenden Aggregationsschritt besteht (Abbildung 50).

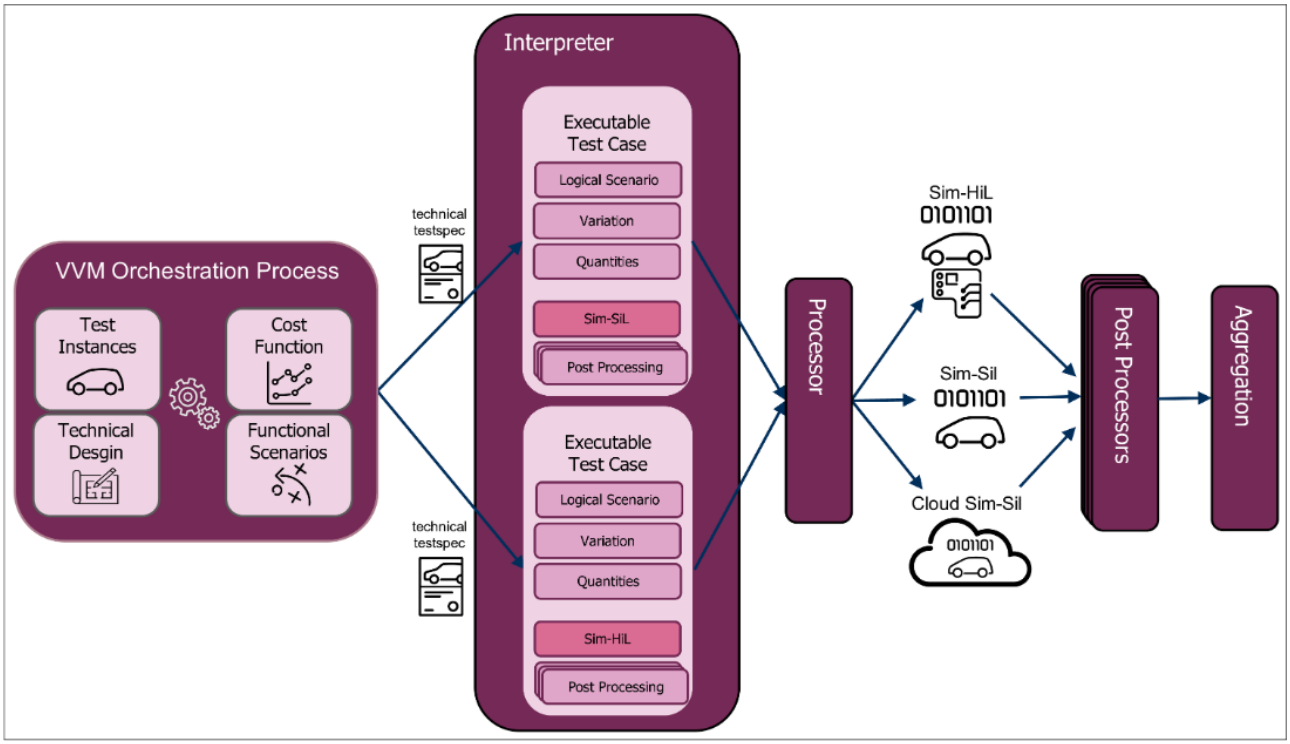


Abbildung 50: Framework zur Testausführung

Durch die Beschreibung von Testaktivitäten als generische technische Testspezifikationen und durch die Bereitstellung eines Testinstanz agnostischen Frameworks zur Testausführung wird die durchgängige orchestrierte Nutzung verschiedener Testinstanzen ermöglicht, die lediglich auf das generische Framework zur Testausführung angepasst werden müssen. Aufgrund der ereignisbasierten Architektur des Frameworks ist eine Integration in verschiedene Geschäftsprozesse möglich, sei es der V&V-Prozess oder z.B. ein klassischer V-Modell-Ansatz.

2.1.8 TP8 Datenbanken

Innerhalb des TP8 „Datenbank“ hat ZF in den AP8.1 „Anforderungsanalyse und Datenbankdefinition“ und AP8.2 „Datenbankmechanik“ mitgearbeitet. Der Fokus von ZF lag dabei auf den Themen Schnittstellen und Datenformate sowie Inhalt und Form von Szenarienbeschreibungen.

ZF hat an der Definition der Anforderungen an das Messdatenmanagement und die Messdatenverarbeitung mitgewirkt. Die Anforderungen aus Sicht TP2 wurden bilateral zwischen TP2 und TP8 unter Mitwirkung von ZF erarbeitet. Die Anforderungen aus Sicht TP7 wurde unter Beteiligung von ZF in den entsprechenden Unterarbeitsgruppen in TP7 erarbeitet. Auch die Anforderungen an Datenbanken und deren Strukturen wurden aus der Perspektive der Kritikalitätsanalyse und der Testumsetzung von ZF im TP8 gemeinsam mit den Partnern erarbeitet. In diesem Kontext wurden auch relevante Ergebnisse aus der bereits in AP7.2 beschriebenen Studie zu einheitlichen Szenarienformaten eingebracht.

Im Bereich der Szenarienbeschreibung hat sich ZF an der Weiterentwicklung des 6-Layer-Models (Inhalt) und des Messdatenformats OMEGA (Format) beteiligt.

2.1.9 TP9 - Prozess Instanziierung und Anwendung

ZF als einer der drei großen TIER1 im VVM-Konsortium hat im TP9 seine Perspektive als System-, Subsystem- und Komponentenhersteller im Bereich des hochautomatisierten Fahrens eingebracht. Dabei lag der Fokus auf der Reflektion der Freigabeargumentation und deren Weiterentwicklung bezüglich der Anforderungen für SAE-Level 4 ADS sowie der Einbindung von Simulation unter Berücksichtigung aller Aspekte aus Sensorik, Entscheidungsfindung und Aktuatorik.

2.1.9.1 AP9.1 – Anforderungsmanagement

Ziel des AP9.1 war es, Anforderungen an die Entwicklung des methodischen Ansatzes für den Sicherheitsnachweis hochautomatisierter Fahrzeuge (SAE-Level 4/5) zur Homologation im urbanen Umfeld bei den Industriepartnern im Projekt VVM zu erheben, diese zu harmonisieren und an die TPs zur Bearbeitung und Umsetzung weiterzureichen.

ZF hat sich an der Anforderungserhebung mit einem Industrieworkshop beteiligt, der am 02.10.2020 unter Beteiligung hausinterner Fachabteilungen stattfand und von der Firma prostep moderiert wurde.

Die Vorbereitung des Workshops erfolgte in zwei Stufen. Zunächst wurden innerhalb des AP9.1 die vorbereitenden Arbeiten zur organisatorischen und inhaltlichen Planung einem Review unterzogen. Dies betraf vor allem eine generische Präsentation der Firma prostep. Im zweiten Schritt wurde diese Präsentation zur Weitergabe an die ZF internen Fachabteilungen aufgearbeitet und auf dieser Basis der Workshop bei ZF abschließen vorbereitet.

Im Workshop selbst wurden basierend auf dem IST-Stand bei ZF Erwartungen an VVM und Anforderungen hinsichtlich des o.g. Zieles erarbeitet. Schwerpunkte der ZF waren dabei: Prozess und Methoden im Bereich Design und Absicherung, Architektur und Integrationsstrategie, Szenario basiertes Testen, Kritikalitätsanalyse und Testinfrastruktur mit dem Thema Validation Tool Chain sowie Betrachtung der Simulationswerkzeuge, -modelle und Schnittstellen.

Es folgte die Aufarbeitung der Ergebnisse durch die Firma prostep gemäß ihrer modellbasierten Methodik. Dieses Arbeitsergebnis wurde im Rahmen der Nachbereitung des Industrieworkshops einem Review unterzogen und schließlich freigegeben zur Weitergabe an die TPs.

Da ZF in VVM an allen TPs mit der Ausnahme von TP5 beteiligt war, wurde der Weitergabe-prozess aktiv unterstützt und durch die entsprechenden ZF-Vertreter direkt in die TPs gewirkt.

2.1.9.2 AP9.2 - Werkzeugschnittstellen & Dateiformate

Wie bereits oben beschrieben, lag ein Schwerpunkt der ZF auf dem Thema Testinfrastruktur. Innerhalb des AP9.2 hat die ZF in diesem Kontext die Anforderungen an Testwerkzeuge, an Simulationsmodelle und an die Validation Tool Chain insgesamt erarbeitet. Ausgehend von der zentralen Anforderung, über die Testorchestrierung ein durchgehendes Testen (Stichwort „Seamless Testing“) zu ermöglichen, ergaben sich entsprechende Anforderungen an die Skalierbarkeit der Testinfrastruktur sowie an Austauschbarkeit und Güte der zu verwendenden Werkzeuge und Simulationsmodelle. Nicht zuletzt folgten daraus Anforderungen an Schnittstellen und Datenformate.

Die Ergebnisse wurden an AP9.1 übergeben. Darüber hinaus hat ZF die Ergebnisse dank der guten Vernetzung innerhalb des Projekts VVM auch direkt über ihre Vertreter in die entsprechenden TPs 5, 6, 7 und 8 eingebracht.

2.1.9.3 AP9.3 – Instanziierung

Im AP9.3 hat ZF wesentliche Beiträge zur Prozessinstanziierung und -anwendung geleistet. Das betrifft die Themen Fähigkeiten Konzept, funktionale und technische Architektur, Testplanung, Testorchestrierung und Testauswertung, zu denen ZF relevante Ergebnisse in den TPs 3, 4 und 7 erarbeitet und eingebracht hat. Dies geschah zunächst in Vorbereitung und Durchführung des Durchstichworkshops am 12. und 13.10.2022 in Unterschleißheim. In der Nachbereitung des Workshops wurde dann die detaillierte Dokumentation der Synchronisierungspunkte beigetragen. In der Folge hat ZF dabei unterstützt, die genannten VVM-Ergebnisse in einem SysML-Model abzubilden. Das von prostep in CAMEO erzeugte Model wurde in mehreren Iterationen Reviews unterzogen. Dabei flossen die Erkenntnisse mit ein, die bei ZF zum einen im Bereich der V&V Prozesse (TP 4, 7) und zum anderen im Bereich der Testinfrastruktur (TP7) gemacht wurden.

2.1.10 TPX – Interner und externer Informationsaustausch

ZF hat in Verbindung mit seinen Arbeiten in TP1 und TP9 auch regelmäßig an den Telefonkonferenzen des TPX teilgenommen. In diesem Rahmen lag der Schwerpunkt der ZF auf der Zusammenarbeit und dem Austausch zwischen den Förderprojekten SetLevel4to5, KI-Absicherung und VVM, insbesondere zu den Themen Ontologie, Testspezifikation (Sprache und Automatisierung) und Sensormodelle.

ZF hat sich im TPX an den Diskussionen zur nationalen und europäischen Gesetzgebung im Bereich automatisiertes Fahren beteiligt und das Review des VVM-Positionspapiers begleitet.

2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Die ursprüngliche Zeitplanung konnte vor dem Hintergrund von Corona-Pandemie ab Frühjahr 2020 sowie Ukraine-Krieg und Energiekrise ab Februar 2022 nicht eingehalten werden. Weil während der Corona-Pandemie bei ZF Kurzarbeit durchgeführt wurde, wie bei den Projektpartnern auch, kam es zu einem Verzug von 6 Monaten über alle Teilprojekte in VVM hinweg. In diesem Kontext fielen auch wesentlich weniger Reisekosten an als ursprünglich geplant, weil auf Grund der Beschränkungen viele Besprechungen virtuell stattfinden mussten. Der angesprochene zeitliche Verzug konnte auch nach der Pandemie nicht aufgeholt werden. Es kam deshalb zu einer kostenneutralen Verlängerung des VVM-Projekts um 6 Monate, also von einer Projektlaufzeit von 48 Monaten auf 54 Monate.

Der Gesamtkostenrahmen für den Anteil von ZF gem. Gesamtvorkalkulation konnte über die Projektlaufzeit von 54 Monaten knapp eingehalten werden. Die Gesamtnachkalkulation liegt nur 0,9% über Plan. Allerdings mussten im Rahmen der kostenneutralen Projektverlängerung Mittel innerhalb der Positionen des Gesamtbudgets umgewidmet werden.

Alle Abweichungen bewegen sich deutlich unter 20%. Einzige Ausnahme stellen die Reisekosten dar, die sehr deutlich unterschritten wurden. Grund dafür waren restriktive Reiserichtlinien der ZF auch noch nach der Pandemie in den Jahren 2022 und 2023. Außerdem konnten in vielen Teilen des VVM-Projekts die virtuellen Besprechungen beibehalten werden, nachdem sie sich in der Pandemie bewährt hatten und gut funktionierten.

Die Seite 81 bleibt in der Version 1.1 des Dokuments für die TIB Hannover absichtlich frei.

2.3 Notwendigkeit der Förderung

Zur Durchführung des VVM-Projekts waren die Fördermittel notwendig und angemessen. Erst auf Grund der Förderung war es möglich, die intensive Zusammenarbeit zwischen Industrie und Wissenschaft im notwendigen Umfang zu realisieren. In diesem Verbund konnten die technologischen Risiken, die mit der Entwicklung automatisierter und vernetzter Fahrfunktionen und damit mit dem Betreten technologischen und wissenschaftlichen Neulandes einhergehen, reduziert werden. Diese Reduzierung wurde dadurch erreicht, dass das relevante Know-How in der Breite eingebracht wurde und sichergestellt wurde, dass die entwickelten Methoden und Werkzeuge herstellerübergreifend ineinandergreifen können. Im Kern hat das VVM-Projekt dazu beigetragen, dass eine Harmonisierung der Absicherungsketten zwischen OEM und Zulieferern erfolgt. Die durchgängige (Wieder-)Verwendbarkeit von Modellen und Ergebnissen entlang aller Integrationsstufen und Testebenen ist maßgeblich für eine erheblichen Vereinfachung und Reduzierung der Kosten der Tests für die Freigabe von Fahrzeugen und Komponenten.

Neben dem Aspekt der Zusammenarbeit war ein zweiter Faktor die Geschwindigkeit, mit der Innovationen im Bereich automatisiertes und vernetztes Fahren – auch im Vergleich zu den Entwicklungen außerhalb des Standorts Deutschlands – realisiert werden. Durch die Bereitstellung der Fördermittel für das Projekt VVM konnte Innovationstätigkeit gesichert werden, die nicht zuletzt zu einer schnelleren Industrialisierung von Schlüsseltechnologien in diesem Bereich beitragen kann.

Die Förderung ermöglichte die breite und umfassende Einbindung von wissenschaftlichen Partnern. So wird auch sichergestellt, dass die Ergebnisse in die Lehre übergehen und in ausreichender Menge und Qualität jene Experten ausgebildet werden, die es für den langfristigen und nachhaltigen Kompetenzaufbau am Standort Deutschland braucht.

Neben dem Kompetenzaufbau für die Funktionsabsicherung im Bereich des automatisierten und vernetzten Fahrens ermöglichte die Förderung auch Investitionen in digitale Infrastrukturen bei den Wissenschaftspartnern, die dem ganzen Konsortium zugutekamen.

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit

Am ursprünglichen Verwertungsplan der ZF hat sich seit Projektbeginn nichts geändert. Alle erwarteten Ergebnisse konnten wie folgt erreicht werden:

Mit der VVM-Gesamtmethode hat das VVM-Projekt erstmals einen durchgängigen methodischen Sicherheitsansatz für automatisiertes Fahren im urbanen Umfeld geschaffen. Zentrale Aspekte dabei sind der Szenarien basierte Ansatz, die Kritikalitätsanalyse, die Fähigkeiten basierte Architektur, durchgängiges Testen in virtuellen, semi-virtuellen und realen Testumgebungen, die Einbindung in eine übergreifende Argumentationsstruktur. Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Förderprojekte Pegasus und SetLevel4to5 kann damit die branchenweite Zusammenarbeit im Bereich des automatisierten und vernetzten Fahrens weiter verbessert werden.

Die ZF als TIER1 und Zulieferer von Komponenten und Teilsystemen kann nun die VVM-Gesamtmethode für die Freigabeargumentation im Bereich von SAE L4/5 Systemen nutzen und so die Zusammenarbeit mit Kunden und Entwicklungspartnern und letztendlich die Ergebnisse verbessern.

Die im Bereich der Szenarien basierten Kritikalitätsanalyse erreichten Ergebnisse können in den hausinternen Entwicklungsprozess einfließen, sowohl in den Produktentwurf als auch in Test und Validierung. Das betrifft sowohl die Methode als auch die Werkzeuge und Werkzeugketten zur Erhebung von KPI. Ein Abgleich des bestehenden Produktentwicklungsprozess mit dem Fähigkeiten basierten Ansatz kann ebenfalls erfolgen.

Im Kontext des simulationsgestützten und Szenarien basierten Testens konnte die ZF Wissen, Kompetenzen und Technologien aufbauen, die sowohl in den Testprozess als auch in die Testinfrastruktur einfließen können. Das betrifft Methoden der Testplanung und -orchestrierung, Wissen zu Simulationswerkzeugen und den relevanten Datenschnittstellen und -formaten, sowie Kompetenzen und Technologien zur Integration der Validation-Tool-Chain und der Cloud basierten Prozessierung von Tests.

2.5 Veröffentlichungen

2.5.1 Erfolgte Veröffentlichungen

1. Öffentlich zugängliche VVM Deliverables (Veröffentlichungsklasse PU gem. VHB) mit ZF-Co-Autoren:
   - D03 „Assurance framework and new methodologies within the V & V structure"
   - D06 „Verfeinerte Gütekriterien, System- und Testanforderungen“
   - D08 „Generische Systematik der Kritikalitätsanalyse“
   - D11 „Finale Gütekriterien und finale Methodik“
   - D12 „Umsetzung Testinfrastruktur“

2. Weitere Veröffentlichungen durch oder mit Beteiligung von ZF:

Titel	Datum	Autoren
6-Layer Model for a Structured Description and Categorization of Urban Traffic and Environment IEEE-Access	Dezember 2020	Maike Scholtes, RWTH Aachen Lara Turner, DIAX3 Katrin Lotto, DIAX3 Martin Bollmann, XAAV1 Franziska Körtke, DIAX3 et al.
Criticality Analysis for the Verification and Validation of Automated Vehicles IEEE-Access	21.01.2021	Christian Neurohr, DLR Martin Bollmann, XAAV1 et al.
“CriSys Introduction” Vortrag i.R. des VIVALDI Project Meeting	30.09.2021	Martin Bollmann, XAAV1
„Lerngetriebener Produktlebenszyklus für hochautomatisierte Fahrzeuge“ Vortrag i.R. des Tags des Deutschen Systems Engineering 2021	12.12.2021	Christian Lalitsch-Schneider, DIYM11
Criticality Metrics: Introduction and their Use in Practice (HZE Vortrag)	15.03.2022	Martin Bollmann, XAAV1
Technical Test Orchestration – Deriving technical test specifications and ensuring test automation (HZE Vortrag)	15.03.2022	Martin Dörr, DIAX3 Slavisa Krebs-Radic, DIAX3
MerLin Criticality (HZE Poster)	15.03.2022	Tobias Merk, DIYD3 Dr. Andreas Linnemann, DIYD3 Dr. Mladjan Radic, DIAX3 Martin Bollmann, XAAV1
CriSys - SW Framework (HZE Poster)	15.03.2022	Dr. Johannes Daube, DIAX3 Bogdan Cojocaru, DIAX3

Titel	Datum	Autoren
From Capabilities to System Requirements (HZE Poster)	15.03.2022	Christian Lalitsch-Schneider, DIYM11 Martin Mai, DIYM11 Julian Pott, FORD
Technical Test Orchestration at ZF (HZE Poster)	15.03.2022	Franziska Körtke, DIAX3 Slavisa Krebs-Radic, DIAX3
Scenario-based testing at scale (HZE Poster)	15.03.2022	Franziska Körtke, DIAX3 Slavisa Krebs-Radic, DIAX3
Modeling Stochastic Data Using Copulas for Application in Validation of Autonomous Driving	Oktober 2022	Katrin Lotto, DIAX3 Dr. Mladjan Radic, DIAX3 Prof. Dr. Thomas Nagler (LMU)
MerLin - a potential based criticality measure to quantify danger and risk in traffic scenarios	November 2022	Tobias Merk, DIYD3 Dr. Andreas Linnemann, DIYD3 Dr. Mladjan Radic, DIAX3 Martin Bollmann, XAAV1
Risk Management Core - Langtext zur Vortragseinreichung REConf® 2023	November 2022	Christian Lalitsch-Schneider, DIYM11 Nayel Fabian Salem, TU BS et al.
„Diskussion von Kritikalitätsphänomenen anhand der gemessenen Kritikalität und mit Hilfe von statistischer Versuchsplanung“ i.R. der 20th Weimar Optimization and Stochastic Days 2023 (WOST Conference 2023)	22.06.2023	Martin Bollmann, XAHM Armin Rasch, DIAX3 Johannes Daube, DIAX3 Bogdan Cojocaru, DIAX3
“Risk Management Core - Towards an Explicit Representation of Risk in Automated Driving” i.R. Safety Week Würzburg	23.05.2023	Nayel Fabian Salem, TU BS Christian Lalitsch-Schneider, DIYM11 et al.
Criticality Metrics and the Identification of criticality phenomena (Final Event VVM Vortrag)	21.11.2023	Martin Bollmann, XAAV1
Test Orchestration – The way to Seamless Testing (Final Event VVM Vortrag)	21.11.2023	Martin Dörr, DIAX3
System Capability Identification and Consolidation - How to Translate Target Behavior into System Capabilities? (Final Event VVM Poster)	21.11.2023	Christian Lalitsch-Schneider, DIYM11 et al.
System Capability Identification and Consolidation - How to Consolidate System Capabilities? (Final Event VVM Poster)	21.11.2023	Christian Lalitsch-Schneider, DIYM11 et al.
Requirements for Test Planning (Final Event VVM Poster)	21.11.2023	Martin Mai, DIYM11 et al.
Requirements for Test Orchestration (Final Event VVM Poster)	21.11.2023	Martin Mai, DIYM11 et al.

Titel	Datum	Autoren
Safety-related Quality Measures: From Risk Reduction Need to Design Constraints (Final Event VVM Poster)	21.11.2023	Martin Mai, DIYM11 et al.
Examples for Quality Measures of Behavioral and Functional Safety Requirements (Final Event VVM Poster)	21.11.2023	Martin Mai, DIYM11 et al.
Experiencing phenomena of criticality (Final Event VVM Poster)	21.11.2023	Martin Bollmann, XAHM Armin Rasch, DIAX3 Johannes Daube, DIAX3 Bogdan Cojocaru, DIAX3
Criticality Identification System (CriSys) (Final Event VVM Poster)	21.11.2023	Bogdan Cojocaru, DIAX3 Johannes Daube, DIAX3
Test Orchestration (Final Event VVM Poster)	21.11.2023	Martin Dörr, DIAX3 et al.
Test Execution and Evaluation (Final Event VVM Poster)	21.11.2023	Martin Dörr, DIAX3 et al.
Distributed Test Execution (Final Event VVM Poster)	21.11.2023	Slavisa Krebs-Radic, DIAX3 Matthias Beck, DIAX2 Martin Dörr, DIAX3
Auswertung von Unfallschwere in simuliertem Test	30.01.2024	Martin Bollmann, XAHM Daniel Schmidt, Bosch Michael Knoop, Bosch Stefan Schoenawa, VW Jürgen Metzger, DIRDC3

2.5.2 Geplante Veröffentlichungen

ZF hat keine weiteren Veröffentlichungen nach Abschluss des Projekts VVM geplant.

3 Referenzen

[1] [ERT 2017], ERTRAC, Automated Driving Roadmap, ERTRAC Working Group „Connectivity and Automated Driving", Version 7.0, 29.05.2017: http://www.ertrac.org/index.php?page=ertrac-publications, 2017.

[2] [Fraunhofer 2015], Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), „Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen," Studie im Auftrag des BMWi, November 2015.

[3] [Frost & Sullivan 2017], Frost & Sullivan, "Global Autonomous Driving Market Outlook", 2017.

[4] [BMVI 09/2015], Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, "Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren", September 2015.

[5] [W. Wachenfeld und H. Winner], In: Autonomes Fahren, S. 439–464., „Die Freigabe des autonomen Fahrens", 2015.

[6] [N. Kalra, S. M. Paddock], Transportation Research Part A: Policy and Practice, Bd. 94, S. 182–193, 2016., Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? ", 2016.

[7] [S. Ebel, U. Wilhelm, A. Grimm, und U. Sailer], 6. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Deutschland, 2009, S. 48–57., „Wie sicher ist sicher genug? Anforderungen an die funktionale Unzulänglichkeit von Fahrerassistenzsystemen in Anlehnung an das gesellschaftlich akzeptierte Risiko", 2009.

[8] [A. Grunwald], Autonomes Fahren, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2015, S. 661–685., „Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren – Analyse, Einordnung und Bewertung", 2015.

[9] [P. Liu, R. Yang, und Z. Xu], Risk Analysis, Mai 2018, „How Safe Is Safe Enough for Self-Driving Vehicles?", 2018.

[10] [VDA 06/2017], Verband der Automobilindustrie e. V., Positionspapier „Leitinitiative autonomes und vernetztes Fahren".

[11] [VDA 2016], Verband der Automobilindustrie e. V., Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems: VDA Magazin „Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren", 2015; SAE J3016, 2016.

[12] [BMBF 2014], Bundesministerium für Bildung und Forschung, "Die neue Hightech-Strategie Innovationen für Deutschland": https://www.bmbf.de/pub_hts/HTS_Broschure_Web.pdf, 2014.

[13] [BMWi, BMI, BMVI 2014], Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Bundesministerium des Innern, Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur, "Digitale Agenda 2014-2017", 2014.

[14] [BMVI 07/2015], Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, "Bericht zum Forschungsbedarf Runder Tisch Automatisiertes Fahren – AG Forschung", Juli 2015.

[15] [BMWi 04/2017], Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, "Ergebnisse und Handlungsempfehlungen der „AG Innovation" zur Umsetzung der Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren (AVF)", April 2017.

[16] [BMWi 05/2015], Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Fachprogramm Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien", Mai 2015.

[17] [ISO 16290 2013], Beuth, Raumfahrtsysteme - Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien: http://www.beuth.de/de/norm-entwurf/din-iso-16290/224384199, 2013.

[18] [ISO 26262], Road vehicles -- Functional safety: www.iso.org.

[19] [BMI], Bundesministerium des Inneren, V-Modell XT: http://www.v-modell-xt.de.

[20] [Ulb 2015], S. Ulbrich, T. Menzel, A. Reschka, F. Schuldt und M. Maurer, Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren.," Workshop Fahrerassistenzsysteme, Walting, 2015.

[21] [Ste 2018], Steimle, Markus; Bagschik, Gerrit; Menzel, Till; Wendler, Jan Timo; Maurer, Markus, Ein Beitrag zur Terminologie für den szenarienbasierten Testansatz automatisierter Fahrfunktionen, 2018.

[22] [Rod 2012], Claas Rodemerk, Stefan Habenicht, Alexander Weitzel, Hermann Winner and Thomas Schmitt, Development of a general criticality criterion for the risk estimation, 2012.

[23] [Ebner, Adrian], Referenzszenarien als Grundlage für die Entwicklung und Bewertung von Systemen der Aktiven Sicherheit: Dissertation, Technischen Universität Berlin, 2014.

[24] [Dam 2018], W. Damm. a. R. Galbas, Exploiting Learning and Scenario-based Specification Languages for the Verification and Validation of Highly Automated Driving, First Workshop on Software Engineering for AI in Autonomous Systems co-located with ICSE 2018, to appear, 2018.

[25] [Weiß, G.; Becker, K.; Kamphausen, B.; Radermacher, A.; Gérard, S.], Fraunhofer ESK, "Model-driven development of self-describing components for self-adaptive distributed embedded systems": http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-185964.html, 2011.

[26] [Weiß, G.; Grigoleit, F.; Struss, P.], Kontextmodellierung für Adaption: http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-268926.html, 2014.

[27] [DANA], DANA – Ihre Analyseplattform für vernetzte eingebettete Systeme: http://www.dana.fraunhofer.de/.

[28] [Weiß, G.; Schleiß, P.; Drabek, C.; Ruiz, A.; Radermacher, A.], Comprehensive Energy Management - Safe Adaptation, Predictive Control and Thermal Management, S1-18, Safe adaptation for reliable and energy-efficient E/E architectures: http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-456089.html, 2017.

[29] [Schleiß, P.; D., C.; Weiß, G.; Bauer, B.], Computer safety, reliability, and security. 36th International Conference, SAFECOMP 2017: Trento, Italy, September 13-15, 2017; Proceedings, S. 179-194, Generic management of availability in fail-operational automotive systems: http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-470558.html, 2017.

[30] [Rauschenbach, M.], Dissertation, TU Darmstadt, TUPrint, Probabilistische Grundlage zur Darstellung integraler Mehrzustands-Fehlermodelle komplexer technischer Systeme: http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/6920, 2017.

[31] [LEV 2011], Leveson, N. G, Engineering a Safer World. Engineering Systems: The MIT Press, 2011.

[32] [V-Modell 97], IABG Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH. Ottobrunn, Germany, V-Modell 97 - komplett im Format Word (Teil 1-3)., 1997.

[33] [INCOSE], San Diego, CA, USA: International Council on Systems Engineering (INCOSE), Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, version 3.2.2.: INCOSE-TP-2003-002-03.2.2., 2012.

[34] [SPICE], Verband der Automobilindustrie (VDA), “Automotive SPICE Prozessassessment, Version 2.3”, 2007.

[35] [Albers u. a.], In: ATZ elektronik (Mai 2010), S. 60–65., „X-in-the-Loop-Framework für Fahrzeuge, Steuergeräte und Kommunikationssysteme“., 2010.

[36] [B. Schick und J. Henning], In: 3rd Conference Active Safety through Driver Assistance. Apr. 2008, „Simulation methods to evaluate and verify functions, quality and safety of driver assistance systems in the continuous Mil, SiL and HiL process “, 2008.

[37] [Wallentowitz H. und Reif, K.], Handbuch Kraftfahrzeugelektronik, 2006.

[38] [H. Shokry und M. Hinchey], In: Computer 42.4 (Apr. 2009), S. 53–59., „Model-Based Verification of Embedded Software “, 2009.

[39] [N. Hartmann], In: „Automatisiertes Testen Eingebetteter Systeme in der Automobilindustrie.“ München: Hanser, Carl, 2008. isbn: 9783446416352, S. 61-84, „Test Automatisierung im Labor“, 2008.

[40] [J. Schäuffele und T. Zurawka], 5. Aufl. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Automotive Software Engineering - Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werzeuge effizient einsetzen, 2012.

[41] [Wohlfahrt, C., et al], 6. Fachkonferenz AUTOTEST Stuttgart, „Von Systematischer Absicherung zur ‚Digitalen Erprobungsfahrt‘“, 2016.

[42] [M. Miegler u. a.], In: ATZ elektronik (Mai 2009), S. 60–65., „Hardware-in-the-Loop-Test von vorausschauenden Fahrerassistenzsystemen“, 2009.

[43] [Bach J., Holzäpfel, M., Otten, S., Sax, E.], SAE World Congress, Reactive-Replay Approach for Verification and Validation of Closed-Loop Control Systems in Early Development”, 2017.

[44] [Conrad, Mirko], A Systematic Approach to Testing Automotive Control Software., 2004.

[45] [Ference, J. J., Szabo, S., & Najm, W. G.], In 20th International Technical Conference on Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Lyon, France, June 2007, Objective test scenarios for integrated vehicle-based safety systems, 2007.

[46] [A. Spillner und T. Linz], Bd. 3. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2005. isbn: 3-89864-358-1, Basiswissen Softwaretest, 2005.

[47] [E. Sax], München: Hanser, Carl, isbn: 9783446416352 3446416358, Automatisiertes Testen Eingebetteter Systeme in der Automobilindustrie, 2008.

[48] [R. Nörenberg], Diss. Karlsruher Institut für Technologie, isbn: 978-3-86644-842-1., „Effizienter Regressionstest von E/E-Systemen nach ISO 26262“, 2012.

[49] [J. T. Kessels and P. Van den Bosch], International Journal of Intelligent Information and Database Systems, vol. 2, no. 2, pp. 187–203, “Electronic horizon: Road information used by energy management strategies”, 2008.

[50] [M. Aeberhard, S. Rauch, M. Bahram, G. Tanzmeister, J. Thomas, Y. Pilat, F. Homm, W. Huber, and N. Kaempchen], IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 7, no. 1, pp. 42–57, “Experience, results and lessons learned from automated driving on Germany’s highways”, 2015.

[51] [I. Passchier, G. van Vugt und M. Tideman], In: IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Sep. 2015, S. 348–352., „An integral approach to autonomous and cooperative vehicles development and testing“, 2015.

[52] [Bach, J., Otten, S., Sax, E.,02], 3rd International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, A Taxonomy and Systematic Approach for Auto-motive System Architectures: From Functional Chains to Functional Networks”, 2017.

[53] [Keet C.M.], In: Dubitzky W., Wolkenhauer O., Cho KH., Yokota H. (eds) Encyclopedia of Systems Biology. Springer, New York, NY, "Open World Assumption", 2013.

[54] [Streichert, T.; Traub, M.], Springer, Berlin, „Elektrik/Elektronik-Architekturen im Kraftfahrzeug", 2012.

[55] [Bach, J., Otten, S., Sax, E., 01], IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), “A model-based scenario specification method to support development and test of automated driving functions”, 2016.

[56] [VIRES 01], VIRES Simulationstechnologie GmbH, OpenSCENARIO: http://openscenario.org/, 2018.

[57] [FMI], FMI Functional Mock-up Interface: http://fmi-standard.org/, 2018.

[58] [Hanke, T.; Hirsenkorn, N.; van-Driesten, C.; Garcia-Ramos, P.; Schiementz, M.; Schneider, S.; Biebl, E.], Open Simulation Interface: https://www.hot.ei.tum.de/forschung/automotive-veroeffentlichungen/, 2017.

[59] [Fränzle, M.; Gezgin, T.; Hungar, H.; Sauter, G.], Proc. FORMS/FORMAT, "Using Guided Simulation to Assess Driver Assistance Systems", 2010.

[60] [MSC 2018], mscsoftware.com, Virtual Test Drive, Complete tool-chain for driving simulation applications: http://www.mscsoftware.com/product/virtual-test-drive, 2018.

[61] [IPG 2018], ipg-automotive.com, CarMaker: Virtual testing of automobiles and light-duty vehicles: https://ipg-automotive.com/products-services/simulation-software/carmaker/, 2018.

[62] [Weiskopf, M., Wohlfahrt, C., Schmidt, A.], Automotive Safety & Security, „Integrationslösung zur Absicherung eines realen Radarsensors im Systemverbund mit der Hardware-in-the-Loop Test-technologie“, 2015.

[63] [D. Wittmann, C. Wang und M. Lienkamp], In: 7. Tagung Fahrerassistenzsysteme. Nov. 2015, „Definition and identification of system boundaries of highly automated driving “, 2015.

[64] [Otten, S. et al.], Advanced Microsystems for Automotive Applications (AMAA), „ Automated Assessment and Evaluation of Digital Test Drives “, 2017.

[65] [Langner, J., Bach, J., Otten, S., Sax, E., Esselborn, C., Holzäpfel, M., & Eckert, M.], “Framework for using real driving data in automotive feature development and validation.”.

[66] [T. Pretsch und J. Spiegel.], In: Porsche Engineering MAGAZIN 1, S. 44–51, „Vernetzte Welt“, 2014.

[67] [D. Reich u. a.], In: Interfaces 46.5, S. 409–423, „Scheduling Crash Tests at Ford Motor Company“, 2016.

[68] [A. Noack, A. Bertl und B. Eggl], In: ATZ elektronik (Feb. 2016), S. 54–59., „Fahrerassistenzsysteme - Validierung von Hochband-Sensorik“, 2016.

[69] [Heidl, P., Damm, W.], „Postionspapier Hochautomatisierte Systeme - Testen, Safety und Entwicklungsprozesse“: http://www.safetrans-de.org/de/Aktivitaeten/Roadmapping.php, 2017.

[70] [Bach, J. et al.], In: 7. Tagung Fahrerassistenzsysteme, „Control based driving assistant functions’ test using recorded in field data“, 2015.

[71] B. d. Innern, „V-Modell XT,“ [Online]. Available: http://www.v-modell-xt.de.

[72] [BAST 2018], Bundesanstalt für Straßenwesen, German In-Depth Accident Study: https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Fahrzeugtechnik/Fachthemen/f2_gidas.html.

[73] [NHTSA 2017], NHTSA, Automated driving version 2.0 - A vision for safety“., 2017.

[74] [PATH 2016], PATH Program, Peer Review of Behavioral Competencies for AVs, 2016.: Oakland, CA, USA, 2016.

[75] [EUR 2018], euroncap.com, The European New Car Assessment Programme: https://www.euroncap.com/de, 2018.

[76] [SPR 12], J. Spriggs, GSN - The Goal Structuring Notation A Structured Approach to Presenting Arguments: Springer, London, 2012.

[77] [Weiß 2014], Weiß, G.; Grigoleit, F.; Struss, P., Kontextmodellierung für Adaption: http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-268926.html, 2014.

[78] [FMI], Functional Mock-up Interface: https://www.fmi-standard.org.

[79] [PROSTEP2014], PROSTEP, "Recommendation for Systems Engineering": http://www.PROSTEP.org/en/medialibrary/publications/recommendations-standards.html, 2014.

[80] [PROSTEP2015], „Hans-Martin Heinkel, Martin Geissen (interne Projektpräsentation),“ Smart Systems Engineering Status & next Steps WP2, SmartSE Check, 2015.

[81] [PROSTEP2017], PROSTEP, "SmartSE": http://www.prostep.org/projekte/smart-systems-engineering/, 2017.

[82] [SysML], Object Management Group – Systems Modeling Language: http://www.omgsysml.org/.

4 Unterschrift

im Original gez.

Martin Dörr
VVM-Projektleiter ZF Friedrichshafen AG

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel **VVM – Verification Validation Methods** **P**rojekt zur Entwicklung von Methoden zum Sicherheitsnachweis von automatisierten Fahrzeugen im urbanen Umfeld Abschlussbericht der ZF Friedrichshafen AG	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dörr, Martin; Bollmann, Martin; Dr. Daube, Johannes; Cojocaru, Bogdan; Lalitsch-Schneider, Christian; Mai, Martin; Krebs-Radic, Slaviça; Dr. Beck, Matthias; Rasch, Armin; Sedlacek, Martin	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2023 6. Veröffentlichungsdatum 28.06.2024 7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) ZF Friedrichshafen AG Graf-von-Soden-Platz 1 88048 Friedrichshafen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 10. Förderkennzeichen 19A19002W 11. Seitenzahl 92
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 10115 Berlin	13. Literaturangaben 82 14. Tabellen - 15. Abbildungen 50
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln, 28.06.2024	
18. Kurzfassung Das VVM-Projekt hat erstmals einen durchgängigen methodischen Sicherheitsansatz für automatisiertes Fahren im urbanen Umfeld geschaffen. Zentrale Aspekte der VVM-Gesamtmethode sind dabei der Szenarien basierte Ansatz, die Kritikalitätsanalyse, die Fähigkeiten basierte Architektur, durchgängiges Testen in virtuellen, semi-virtuellen und realen Testumgebungen, die Einbindung in eine übergreifende Argumentationsstruktur. Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Förderprojekte Pegasus und SetLevel4to5 kann damit die branchenweite Zusammenarbeit im Bereich des automatisierten und vernetzten Fahrens weiter verbessert werden. Die ZF Friedrichshafen AG (im Folgenden ZF) war als großer deutscher TIER1 im VVM-Projekt Konsortialpartner und hatte in den Teilprojekten TP2 „Kritikalitätsanalyse“ und TP7 „Testvorgehen“ die industrielle Leitung inne. Darüber hinaus war ZF mit Ausnahme des TP5 an allen Teilprojekten beteiligt und konnte so auch TP übergreifend die Kompetenz und Sichtweise eines TIER1 mit Erfahrung in der Entwicklung sicherheitsrelevanter Fahrzeugsysteme einbringen. Der vorliegende Schlussbericht beschreibt das VVM-Projekt im Detail und fasst die Aktivitäten und Ergebnisse zusammen, die ZF gemeinsam mit den Konsortialpartnern aus Wissenschaft und Industrie erreicht hat.	
19. Schlagwörter Automatisiertes Fahren, Test und Absicherung, Verifikation, Validierung, Freigabe, Simulation, Testorchestrierung	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title **VVM – Verification Validation Methods** Project concerning the development of methods for proving the safety of automated vehicles in an urban environment Final report of ZF Friedrichshafen AG	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dörr, Martin; Bollmann, Martin; Dr. Daube, Johannes; Cojocaru, Bogdan; Lalitsch-Schneider, Christian; Mai, Martin; Krebs-Radic, Slaviça; Dr. Beck, Matthias; Rasch, Armin; Sedlacek, Martin	5. end of project 31.12.2013 6. publication date 28.06.2024 7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) ZF Friedrichshafen AG Graf-von-Soden-Platz 1 88048 Friedrichshafen	9. originator's report no. 10. reference no. 19A19002W 11. no. of pages 92
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) 10115 Berlin, Germany	13. no. of references 82 14. no. of tables - 15. no. of figures 50
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln, Germany, 28.06.2024	

18. abstract

The VVM project has created a consistent methodical safety approach for automated driving in an urban environment for the first time. Central aspects of the overall VVM method are the scenario-based approach, the criticality analysis, the capability-based architecture, seamless testing in virtual, semi-virtual and real test environments and integration into an overarching argumentation structure. Building on the results of the previous Pegasus and SetLevel4to5 public funded projects, industry-wide cooperation in the field of automated and connected driving can thus be further improved.

As a major German TIER1, ZF Friedrichshafen AG (hereinafter referred to as ZF) was a consortium partner in the VVM project and held the industrial lead in the sub-projects TP2 "Criticality Analysis" and TP7 "Test Procedure". In addition, ZF was involved in all sub-projects except for TP5 and was thus able to contribute the competencies and perspective of a TIER1 with experience in the development of safety-relevant vehicle systems across all sub-projects.

This final report describes the VVM project in detail and summarizes the activities and results that ZF has achieved together with the consortium partners from academia and industry.

19. keywords
Automated driving, testing, verification and validation, assessment, clearance, simulation, proving ground, field tests

20. publisher	21. price