

Schlussbericht

SET Level

SET Level

Simulationsbasiertes Entwickeln und Testen von automatisiertem Fahren

Beitrag des Zuwendungsempfängers: **Opel Automobile GmbH**
Bahnhofplatz
65423 Rüsselsheim am Main

Laufzeit: 01.03.2019 – 31.10.2022

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem **Förderkennzeichen 19S19004S** gefördert.

Version: 1.0
Stand: 24.04.2023
Autoren: Dr. Stefan Berger
Dirk Frerichs
Karl-Michael Hahn
Nico Weber



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Darstellung	5
1.1	Aufgabenstellung	5
1.2	Voraussetzungen für das Vorhaben	6
1.3	Planung und Ablauf.....	7
1.4	Stand der Wissenschaft und Technik	9
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
2	Eingehende Darstellung	12
2.1	Erzielte Ergebnisse	12
2.1.1	Teilprojekt 1: Use-Case Management und funktionsorientierte Anforderungsanalyse	12
2.1.2	Teilprojekt 2: Simulationsbasiertes und virtuelles Entwickeln / Testen	17
2.1.3	Teilprojekt 3: Modellspezifikation, -Entwicklung und -Validierung	26
2.1.4	Teilprojekt 4: Instanziierung von Werkzeugketten für Entwicklung und Testen...	29
2.1.5	Teilprojekt 5: Einbettung und kritische Reflexion	32
2.2	Zahlenmäßiger Nachweis.....	33
2.3	Notwendigkeit der Förderung.....	33
2.4	Nutzen und Verwertbarkeit	34
2.5	Bekannt gewordener Fortschritt	34
2.6	Ergebnisverbreitung	34
2.6.1	Zwischen- und Abschlusspräsentation	35
2.6.2	Erfolgte Veröffentlichungen	36
3	Abbildungsverzeichnis.....	37
4	Tabellenverzeichnis	38
5	Abkürzungsverzeichnis.....	39
6	Literaturverzeichnis.....	41

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Vorhaben SET Level adressiert das simulationsbasierte Entwickeln und Testen von automatisierten Fahrzeugen in urbanen Räumen. Mit der Weiterentwicklung numerischer Simulationsmethoden und der Konzeptionierung und Umsetzung neuer Mechanismen zur Modellkopplung werden wichtige Beiträge zu simulationsbasierten Test- und Freigabeprozessen geliefert. Besondere Herausforderungen liegen hierbei darin, Anforderungen an die Simulationsumgebung formal fassbar zu machen sowie zu quantifizieren. Die Validität des entstehenden Gesamtmodells ist hierbei eine zentrale Anforderung.

Die Opel Automobile GmbH bringt in der funktionsorientierten Anforderungsanalyse die OEM-Perspektive ein sowie die entsprechende Expertise in Bezug auf Fahrzeugentwicklung und Entwicklungsprozesse. Dabei betrachtet Opel die speziellen Herausforderungen für urbane Anwendungen im Sinne der Projektinhalte und zieht eigene simulative Aktivitäten im Bereich des automatisierten Fahrens gemäß SAE-Level 3 für Autobahn-Anwendungen heran.

Opel arbeitet an der Strukturierung der Anforderungen und beteiligt sich an der weiteren Ausarbeitung der urbanen Use-Cases für das SET Level Vorgehen. Diese Aktivitäten bauen auf Erfahrungen der Opel Automobile GmbH in den vom BMWK geförderten Vorhaben KOHAF und PEGASUS.

Ein Schwerpunkt der Aufgaben liegt in der Entwicklung und Bereitstellung der Verkehrsräume für die Simulation, was sich in der Leitung von UAP 1.2.1 widerspiegelt.

Die zentrale Forderung nach einem validen Gesamtmodell der Simulation umfasst die Notwendigkeit des Nachweises, dass die berechneten Ergebnisse jedes eingesetzten Simulationsmodells für den angedachten Einsatzzweck und bei zweckgemäßer Anwendung in der Simulationsumgebung hinreichend korrekt sind. Ein weiterer Schwerpunkt der Aufgaben der Opel Automobile GmbH liegt deshalb in der Benennung von Methoden, wie Simulationsmodelle validiert werden können im Hinblick auf eine zweckgemäße Anwendung im Simulationsverbund. Dies manifestiert sich in der Leitung von UAP 2.1.7.

Hierbei wird langjähriges Wissen in die Anforderungen zur Validierung in UAP 2.1.8 eingebracht. Auf Grundlage der Erfahrungen in der Qualitätssicherung können Techniken zur Erstellung und Kopplung (UAP 2.2.1) und Konfiguration (UAP 2.2.2) von Simulationsumgebungen geteilt werden. Die notwendigen Gütekriterien hierfür lassen sich aus der täglichen Arbeit ableiten und in das Projekt einbringen. Diesbezügliche Erfahrungen werden genutzt, um verschiedene Simulationsansätze (UAP 2.3.4 und 2.3.5) zur Lösung einer Vielzahl von Simulationsaufgaben einzusetzen.

Aus der langjährigen Projektzusammenarbeit mit Zulieferern fließen Erfahrungen in UAP 3.3 ein. Damit können wesentliche Kriterien und Schritte für die erforderliche Zusammenarbeit in firmenübergreifenden Simulationsprojekten herausgearbeitet werden.

Im Weiteren bringt die Opel Automobile GmbH ihr Wissen bezüglich Klassifizierung und Strukturierung von Simulationsmodellen und Verkehrsräumen ein (UAP 4.1.1, 4.1.3 und 4.1.4 als Ergänzung zu UAP 1.2.1). Das dient als Grundlage für die weiteren Schritte zur Simulation der komplexen Szenarien.

In einer zeitlichen Überlappungsphase wird Opel Brückenschläge zu PEGASUS vollziehen und Expertise aus dem Bereich von Ko-Simulationen (u. a. der Kopplung von

Verkehrssimulation und Fahrdynamiksimulation) beitragen. Opel besitzt zudem Kompetenz im Bereich Assistenz an städtischen Kreuzungen und wird diese an geeigneter Stelle einbringen.

1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

SET Level wurde als Folgeprojekt von PEGASUS konzipiert. Das Vorhaben PEGASUS (Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen) mit einer Laufzeit von 2016 bis 2019 hatte das Ziel, Basismethoden für die Automatisierungsstufen 3 und 4 im Einsatz auf Autobahnen zu entwickeln (siehe Abbildung 1).

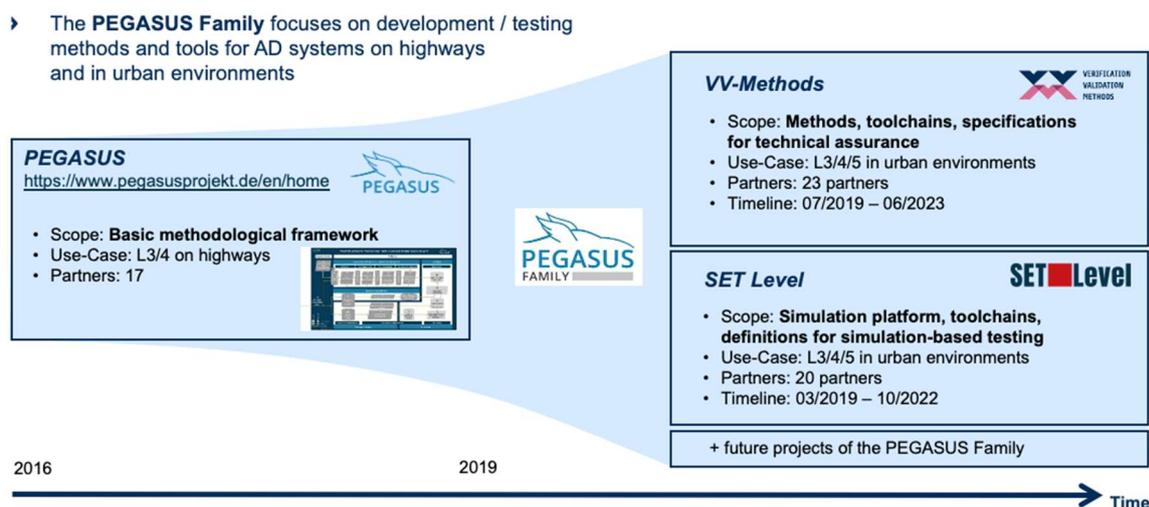


Abbildung 1: Projekte der PEGASUS-Familie

SET Level wurde speziell für den Einsatz von Simulation beim Entwickeln und Testen hochautomatisierter Fahrfunktionen in urbanen Umgebungen konzipiert. Dabei wurden wesentliche Partner aus der deutschen Automobilindustrie, von Zulieferern, IT-Vendoren und renommierten Forschungseinrichtungen zusammengeführt, um Kompetenzen, Methoden und Technologien gemeinsam aufzubauen (siehe Abbildung 2).

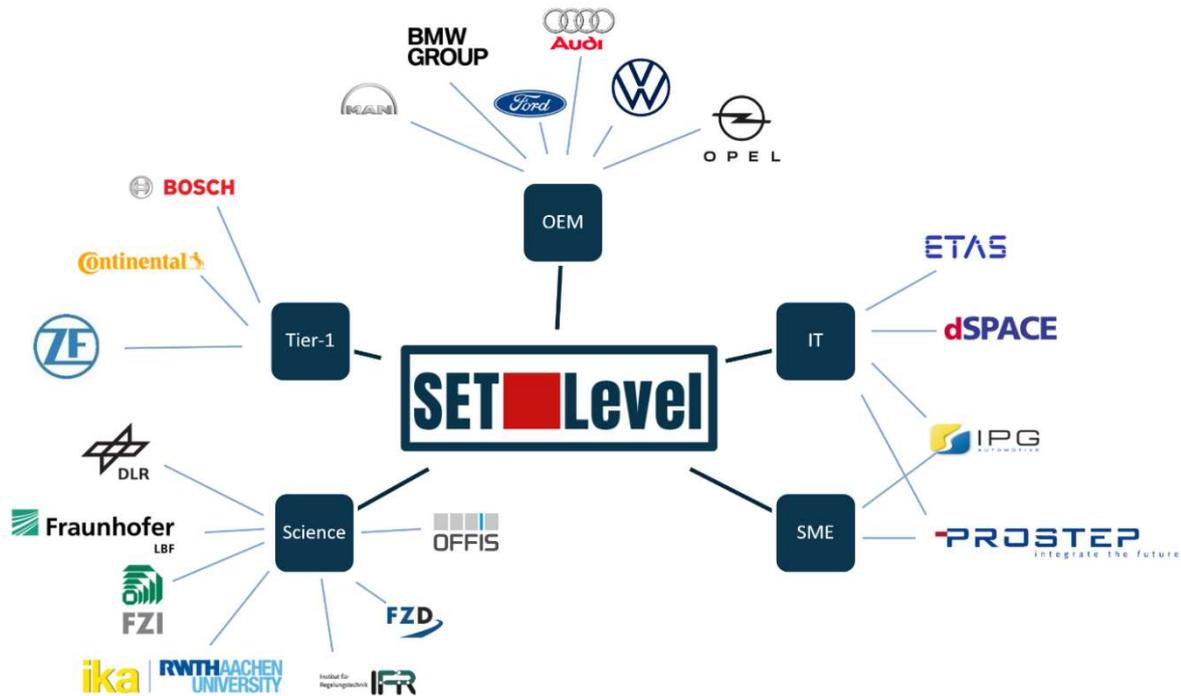


Abbildung 2: Zusammensetzung der Partner von SET Level

1.3 Planung und Ablauf

Grundansatz zur Erschließung und Bearbeitung der komplexen Fragestellung bildete ein iteratives Vorgehen unter schrittweiser Komplexitätssteigerung zur gemeinsamen Durchdringung und Entwicklung des Themas (siehe Abbildung 3).

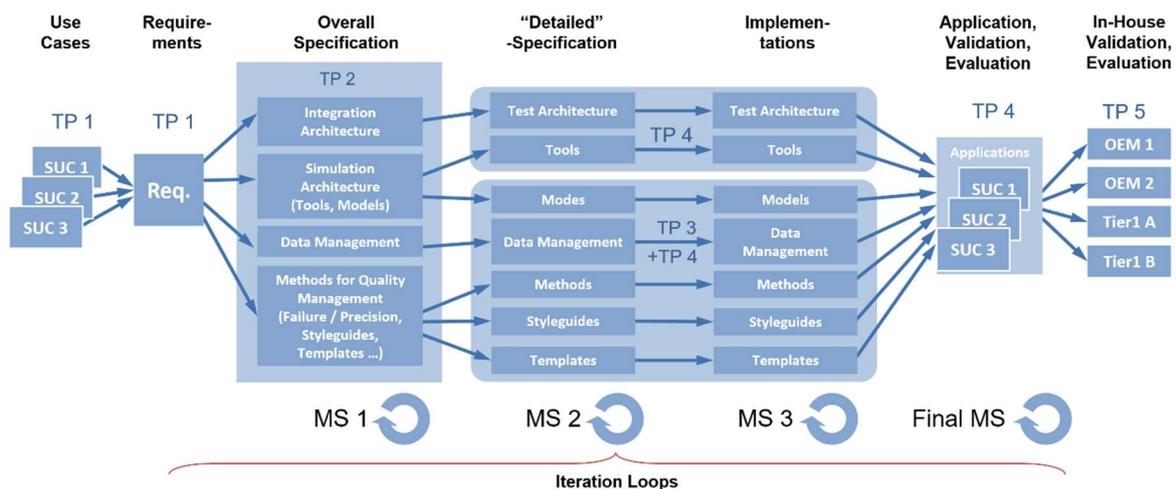


Abbildung 3: Schnelle Iterationen in Projektmeilensteinen

Als Erfolgsmerkmal und -nachweis wurden so genannte Simulation Use Cases (SUCs) konzipiert. Um einen Erfolgsnachweis und eine Basis für die Reflektion der gewählten Ansätze zu schaffen, wurden Demonstratoren zu definierten Meilensteinen implementiert und evaluiert. Dieses Vorgehen war entscheidend für ein schnelles Lernen und für den Nachweis, dass die Grundideen von SET Level – die modularisierten und auf Standards basierenden Architekturen von Simulationstools – auch wirklich funktionieren.

BMW und das DLR koordinierten das Projekt als Ganzes. Die Arbeit erfolgte innerhalb von sechs Teilprojekten (siehe Abbildung 4).

Ausgehend von den Use Cases wurden in Teilprojekt 1 (TP1) Anforderungen (Requirements) an Simulationstools spezifiziert. Inhaltlich fand die Konzeption (Specification) des modularen und standardbasierten Aufbaus von Simulationswerkzeugen in Teilprojekt 2 (TP2) statt. Die detaillierte Spezifikation notwendiger Prozesse und die Implementierung von Modellen wurde in Teilprojekt 3 (TP3) durchgeführt. Die Ausführung von Simulationen auf unterschiedlichen Simulationswerkzeugen (von der Implementierung bis zur Evaluation) fand in Teilprojekt 4 (TP4) statt. Die Sicherstellung der industriellen Anwendbarkeit erfolgte in Teilprojekt 5 (TP5) durch regelmäßige Bewertungen des aktuellen Entwicklungsstands sowie entsprechendes Feedback.

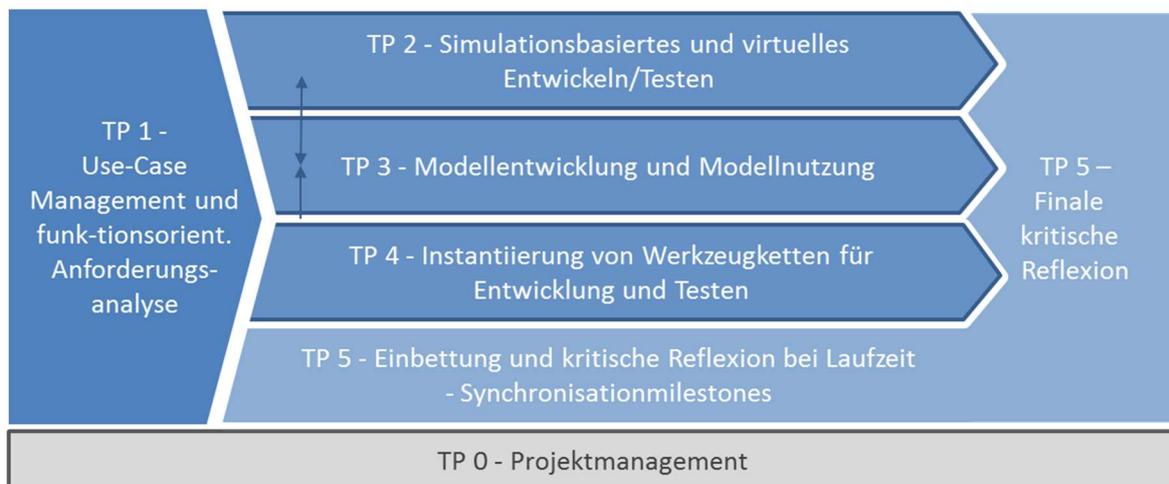


Abbildung 4: Zusammenspiel der Teilprojekte von SET Level

Zeitplan

Abbildung 5 zeigt eine Gesamtübersicht über die Projektlaufzeit. Die verschiedenen Farben sind qualitative Intensitätsangaben, grob eingeteilt in geringe, mittlere und hohe Kapazitätsbedarfe der jeweiligen Teilprojekte. Wie zu erkennen ist, hatte Teilprojekt 1 als Anforderungs- und Synchronisationsprojekt zu VVMethoden einen starken Fokus im ersten Jahr und benötigte im weiteren Verlauf immer weniger personelle Ressourcen, um die Kommunikation zu VVMethoden zu gewährleisten. Die Teilprojekte 2 und 3 hatten ihre Belastungsspitze beginnend mit Q3 über den größten Teil des zweiten Projektjahres. Teilprojekt 4 hatte einen gleichmäßigen Kapazitätsbedarf über die Projektlaufzeit, während derjenige von Teilprojekt 5 über den Projektverlauf immer höher wurde und gegen Ende am höchsten war.

In *Abbildung 5* sind auch drei Gesamtmeilensteine jeweils zum Ende eines Projektjahres verzeichnet, deren Hauptergebnisse als Prototyp, Vorversion und Endversion der Werkzeugketten verstanden werden können.

Arbeitspaket	Projektjahr 1				Projektjahr 2				Projektjahr 3				Projektjahr 4		
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15
0															
1.1															
1.2															
2.1															
2.2															
2.3															
3.1															
3.2															
3.3															
4.1															
4.2															
4.3															
4.4															
5.1															
5.2															
5.3															

Abbildung 5: Zeitplanung mit Meilenstein- und Abschlussberichten

Dabei war als Erfolgsmerkmal die Konzeption von Simulation Use Cases (SUCs) und deren Implementierung in Demonstratoren entscheidend für schnelles Lernen und für den Nachweis, dass die Grundideen von SET Level, die modularisierte und auf Standards basierenden Architekturen von Simulationswerkzeugen, auch wirklich funktionieren.

Als zielführend hat sich die Organisation sog. Quartalsmeetings bewährt, bei denen alle Projektbeteiligten nach vorgegebener Agenda ihre jeweiligen Fortschritte berichtet sowie das jeweils weitere Vorgehen mit den übrigen Projektpartnern diskutiert und abgestimmt haben.

Im ersten Projektjahr konnten alle Quartalsmeetings durch physische Treffen vor Ort organisiert werden. Erfolgsfaktor war dabei die Einrichtung eines gemeinsamen Repositories für Dokumente, Modelle und weitere Artefakte auf der Basis von GitLab.

Ab dem zweiten Projektjahr waren Corona-bedingt im Wesentlichen nur noch virtuelle Meetings möglich. Hier hat die Nutzung von Microsoft Teams und die Einführung von Miro als Kommunikationsplattform erheblich geholfen.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Das Projekt SET Level knüpfte an den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik betreffend Methoden und Werkzeuge des Testens automatisierter Fahrzeugfunktionen an. Insbesondere lieferten die Dokumentationen aus den Projekten PEGASUS (Verweis <https://www.pegasusprojekt.de/de/>), ENABLE S3 (Verweis <https://enable-s3.eu/>) und SmartSE (<https://www.prostep.org/en/projects/smart-systems-engineering/>) dafür eine gute Ausgangsbasis.

Die Hauptergebnisse des Vorhabens PEGASUS sind in der Definition einer Gesamtmethode zur Bewertung einer hochautomatisierten Fahrfunktion zusammengeführt worden. Diese Gesamtmethode umfasst die Aspekte Anforderungsdefinition, Testableitung, Testvorgehen und Werkzeugunterstützung. Bereits dort wurde ein besonderer Schwerpunkt auf die Rolle der Simulation gelegt und die Thematik der Formulierung von Simulationaufgaben mithilfe der damaligen Versionen der ASAM-Standards OpenDRIVE und OpenSCENARIO eingehend betrachtet. Insbesondere wurden dort auch Defizite der Formate für die zweckgemäße Nutzung festgestellt und Vorschläge zur Behebung der Defizite gemacht. Diese

Untersuchungen zur Rolle von Simulation in der Absicherung hochautomatisierter Fahrzeugfunktionen und zu den Realisierungsansätzen für eine praktisch nutzbare Anwendung konnten für SET Level aufgegriffen werden und bildeten einen wesentlichen Teil der Basis, auf der das Projekt systematische Lösungen entwickelte.

ENABLE S3 betrachtete Verifikation und Validierung nicht nur im Automobilbereich, sondern auch in Luft- und Raumfahrt, Bahn, Seefahrt sowie Medizin- und Agrartechnik. Das Projekt strebte nach möglichst einheitlichen, übertragbaren Ansätzen, Methoden und Lösungen. So konnten neben spezifischen automobilbezogenen Ergebnissen (etwa zur Simulationsvalidität) auch generische Beschreibungen in SET Level herangezogen werden, um darauf aufsetzend die automobilspezifischen Ansätze weiter zu entwickeln.

Für SET Level sehr spezifische Konzepte und Ergebnisse konnten aus dem prostep-ivip-Projekt SmartSE herangezogen werden. Die dort entwickelten und erprobten Ansätze zur Austauschbarkeit von Verhaltensmodellen eingebetteter Systeme unter Verwendung des FMI-Standards (Functional Mockup Interface) wurden direkt im Projekt aufgegriffen. Auch der Credible Simulation Process hat seine Wurzeln in SmartSE.

Damit sind die wesentlichen Teile der fachlichen Aufsetzbasis von SET Level skizziert. Um den Stand der Wissenschaft und Technik umfassend zu beschreiben, müsste eine große Zahl an Quellen referenziert werden, da die Absicherung automatisierter Fahrfunktionen von vielerlei Seiten bearbeitet wurde und wird. An dieser Stelle sei auf die Dokumentationen der oben besprochenen drei Projekte verwiesen, die mit ihren Dokumentationen bereits einen großen Teil davon abdecken.

Nachdem sich die Opel Automobile GmbH bereits an PEGASUS beteiligt hatte und auch Partner des Vorhabens VVMethoden ist, war für Opel besonders der enge Schulterschluss zwischen den verschwisterten Projekten wichtig. Dies wurde beispielsweise durch den Austausch der betrachteten Szenarien und die Zusammenarbeit bei der Erarbeitung des Glossars erreicht.

Profitiert hat Opel auch an der Weiterentwicklung der ASAM-Standards OpenDRIVE und OpenSCENARIO, die durch SET Level maßgeblich vorangetrieben wurde. Aufgrund von eigenen Erfahrungen bei der Entwicklung von Simulationsarchitekturen konnte Opel hier einerseits solide Beiträge zum Vorhaben liefern und hat andererseits aber auch aus dem Austausch mit den anderen Projektpartnern und den gemeinsamen Entwicklungen profitiert. So konnten beispielsweise die im Konsortium erarbeiteten Anforderungen zu einem guten Teil für die Entwicklung einer eigenen Simulationsumgebung herangezogen werden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Darmstadt bot die Opel Automobile GmbH einem Doktoranden die Möglichkeit zur Anfertigung einer Dissertation. Der Fokus der Dissertation lag auf dem szenarienbasierten Testen von automatisierten Fahrfunktionen. Unter anderem entstand dabei auch eine gemeinsame Veröffentlichung mit der Technischen Universität Braunschweig [1].

Eine enge Kooperation gab es mit dem Forschungszentrum Informatik (FZI) in Karlsruhe. Das FZI lieferte SET Level die automatisierte Fahrfunktion und unterstützte alle Anwender bei der Implementierung in die verschiedenen Simulationsumgebungen. Opel konzentrierte sich hierbei auf die Kopplung der (agentenbasierten) Simulation von Umgebungsverkehr mit der Simulation eines automatisierten Fahrzeugs und stand hierzu in engem Kontakt mit der

Fa. IPG Automotive und Anbietern von Verkehrssimulationen, wie Eclipse SUMO oder der PTV Group, die die Verkehrssimulationssoftware PTV Vissim anbietet.

Opel war ebenfalls am Vorhaben VVMethoden aus der PEGASUS-Projektfamilie beteiligt, so dass hier während der gesamten Projektlaufzeit ein enger Austausch stattfand. Zum einen wurden die in SET Level erarbeiteten Verkehrsräume und Referenzszenarien mit VV-Methoden ausgetauscht; es gab aber auch weitere Berührungspunkte, wie zum Beispiel das Glossar mit den im Vorhaben verwendeten Definitionen und Fachbegriffen. Sehr hilfreich war hierfür die Austauschplattform „TPX“, die speziell für die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Vorhaben aus demselben Themenkreis aufgesetzt wurde.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

Auf der SET Level Abschlussveranstaltung am 11./12. Oktober 2022 wurden die zentralen Ergebnisse in Form von Plenumsvorträgen oder Postern präsentiert und anschließend auf der SET Level WebSite [2] dokumentiert. Daneben existiert ein öffentlich zugängliches Git-Lab-Verzeichnis [3] mit weiteren Informationen zu ausgewählten Ergebnissen, die interessierten Fachleuten die Möglichkeit eröffnen, SET Level Ergebnisse auch wissenschaftlich zu verwerten.

2.1.1 Teilprojekt 1: Use-Case Management und funktionsorientierte Anforderungsanalyse

Teilprojekt 1 gliederte sich in die beiden Arbeitspakete AP 1.1 (Anforderungen an die Simulation) und AP 1.2 (Szenarienräume und Referenzszenarien). Die Opel Automobile GmbH hat sich an beiden Arbeitspaketen aktiv beteiligt und in AP 1.2 ein Unterarbeitspaket geleitet. Im Folgenden werden die Arbeiten im Detail beschrieben.

2.1.1.1 AP 1.1 Anforderungen an die Simulation

In diesem Arbeitspaket wurden die Anforderungen an die Simulation – funktional, qualitativ und strukturell – und ihre Implementierungsform definiert. Die Strukturierung des Arbeitspaketes in fünf Unterarbeitspakete orientierte sich an den Ergebnissen, die für die weiteren Teilprojekte bereitgestellt wurden. Dies sind die funktionalen Anforderungen (UAP 1.1.1), die Definition der Simulationsprinzipien (UAP 1.1.2), qualitative (UAP 1.1.3) und strukturelle (UAP 1.1.4) Anforderungen sowie das Systemkonzept der Referenzimplementierung (UAP 1.1.5). Die Opel Automobile GmbH beteiligte sich regelmäßig an den Telefonkonferenzen von AP 1.1, in denen die Themen der verschiedenen Unterarbeitspakete behandelt wurden. Hierbei konnten die Sichtweise der Industrieunternehmen dargelegt und Anforderungen an die Simulation eingebracht werden, die für die Anwendung der Simulation von automatisierten Fahrsystemen im industriellen Umfeld von Bedeutung sind.

Bereits für Meilenstein 1 wurde gemeinsam mit anderen Projektpartnern eine Vorversion 0.5 der Anforderungstabelle erzeugt. Diese wurde zu Meilenstein 2 mit der Version 1.0 überwiegend fertiggestellt und bis Projektende weiter gepflegt. Die finale Liste der Anforderungen umfasst mehr als 200 Zeileneinträge. Zur Illustration seien hier einige (in verkürzter Form) aufgeführt:

a) aus dem Bereich der funktionalen Anforderungen

F-1-7: The simulation system shall support manual monitoring during a simulation run.

F-3-5: The simulation system shall be able to operate 3D models, including specific properties of these models.

F-6-4: The simulation system shall evaluate the quality measures provided with regard to the quality objectives to be specified.

b) aus dem Bereich der qualitativen Anforderungen

Q-3-4: All used models shall provide their specification (including considered effects) in a machine-readable format.

Q-6-1: The automated configuration of a simulation run shall be documented.

c) aus dem Bereich der strukturellen Anforderungen

- S-1: The simulation system shall be able to execute/control scenarios defined by a standardized scenario description to be determined.
- S-9-2: The simulation system shall support the execution of sensor models using "Open-Simulation-Interfaces". Sensor models shall receive OSI Ground-Truth or OSI SensorView and output OSI SensorData.
- S-16: The simulation system shall support the integration of a driving function provided in a standardized format.

AP 1.2 Szenarienräume und Referenzszenarien

Simulationsbasiertes Testen und Validieren von automatisierten Fahrfunktionen kann nur gute und vertrauenswürdige Ergebnisse liefern, wenn in der Simulation die für den Straßenverkehr relevanten, kritischen Szenarien abgetestet werden. Im Rahmen von SET Level wurden Simulationsumgebungen aufgebaut und die grundsätzliche Funktionsweise des simulations- und szenarienbasierten Testens demonstriert. Hierzu wurden beispielhaft einige Szenarienräume (sog. Verkehrsräume) und Referenzszenarien definiert, die untenstehend dargestellt sind. Für die zuverlässige Validierung einer Fahrfunktion müssen natürlich weit mehr Szenarien abgeprüft und die zugehörigen Parameter in einem weiten Bereich variiert werden. Da in SET Level jedoch im Wesentlichen die Methode zur Validierung erarbeitet und nicht die Validierung selbst durchgeführt wird, ist es an dieser Stelle ausreichend, mit exemplarischen Verkehrsräumen und ausgewählten Referenzszenarien zu operieren. Diese dienen den verschiedenen Anwendungsfällen der Simulation (Simulation Use Cases) SUC1 bis SUC3, um die jeweilige Methode zu demonstrieren.

UAP 1.2.1 und 1.2.2 Verkehrsräume und Referenzszenarien

Die Opel Automobile GmbH leitete UAP 1.2.1 und engagierte sich stark in UAP 1.2.2. Zunächst fanden im zweiwöchentlichen Rhythmus Telefonkonferenzen der UAPs 1.2.1 und 1.2.2 statt. Sehr bald stellte sich jedoch heraus, dass beide Unterarbeitspakete inhaltlich und methodisch sehr stark miteinander verknüpft sind. In der Folge wurden beide Telefonkonferenzen zusammengelegt und entweder von Opel oder Ford geleitet.

Definition

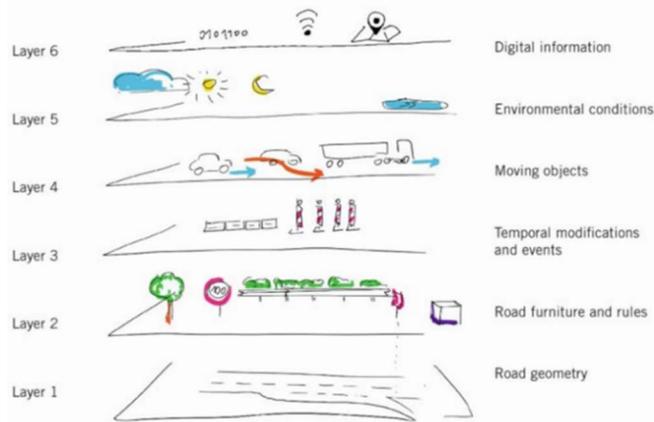
Der Begriff „Verkehrsraum“ beschreibt die Summe der statischen Elemente aus dem Szenario. Dazu gehören beispielsweise die Straßengeometrie, Fahrstreifenmarkierungen, Vorfahrtsregeln, Verkehrsschilder und -ampeln, Gehwege, Zebrastreifen, aber auch die Randbebauung oder die verwendeten Materialien mit ihren Eigenschaften (Radarreflektivität o.ä.).

Das „Szenario“ umfasst darüber hinaus auch die dynamischen Objekte – also im Wesentlichen die Verkehrsteilnehmer, wie Pkw, Lkw, Busse und Bahnen, Motorräder, Fahrräder und Fußgänger. Aber auch Skateboarder oder Rollerfahrer, Hunde und Katzen oder ein über die Straße rollender Fußball gehören in der Stadt dazu und dürfen in der Simulation nicht vergessen werden. Dem Verhalten dieser Objekte liegt jeweils ein Modell zugrunde, das zusammen mit den Zielvorgaben (Straße überqueren, abbiegen, stehen bleiben, usw.) und speziell gewählten Parametern (Abstände, Geschwindigkeiten, Zeitpunkte, usw.) mögliche Trajektorien in der Simulation erzeugt. Schließlich sind auch Wetterbedingungen und

Lichtverhältnisse Bestandteil der Szenarienbeschreibung sowie evtl. vorhandene digitale Infrastruktur.

Methodische Erarbeitung

Die Grundlage für Verkehrsräume und Szenarien bildet das sog. 6-Ebenen-Modell für die Beschreibung von Szenarien, das bereits vor einigen Jahren im Rahmen des vom BMWK geförderten Vorhabens PEGASUS entwickelt wurde. Wie Abbildung 6 zeigt, wird Ebene 1



durch die Straßengeometrie definiert, in Ebene 2 sind die Verkehrsregeln hinterlegt sowie Verkehrszeichen, Randbebauung oder Straßenbegleitgrün. Ebene 3 enthält vorübergehende Änderungen der Streckenführung oder Verkehrsregelung, wie sie zum Beispiel durch Baustellen verursacht werden. Die beweglichen Objekte sind in Ebene 4 verankert, Umweltbedingungen in Ebene 5, und Ebene 6 ist reserviert für die Übertragung von digitalen Informationen via Mobilfunk, von ITS-Roadstations oder Car-to-Car-Kommunikation.

Abbildung 6: 6-Ebenen-Modell aus PEGASUS

Beginnend mit einem einfachen Szenario in einem simplen Verkehrsraum wurde die Komplexität nach und nach gesteigert und an die Bedürfnisse der Simulation Use Cases angepasst. Daraus ergab sich auch die Erweiterung der Szenarien um sog. Meta-Daten, die eine Klassifizierung der Szenarien erlauben.

Im Verlauf des Vorhabens wurden mehrere Verkehrsräume und dazugehörige Szenarien entwickelt, um mit den Anforderungen der Nutzer Schritt zu halten. Verkehrsraum¹ TS0 (null) besteht aus einer geraden, ebenen Straße mit einem Fahrstreifen je Fahrtrichtung, einem Mittelstreifen und je einem Randstreifen auf jeder Straßenseite.

In Referenzszenario RS0 (Abbildung 7) fahren zwei Fahrzeuge in entgegengesetzter Richtung, und zwei Fußgänger überqueren die Straße. Damit lässt sich die Reaktion der Fahrfunktion auf Fußgänger testen.

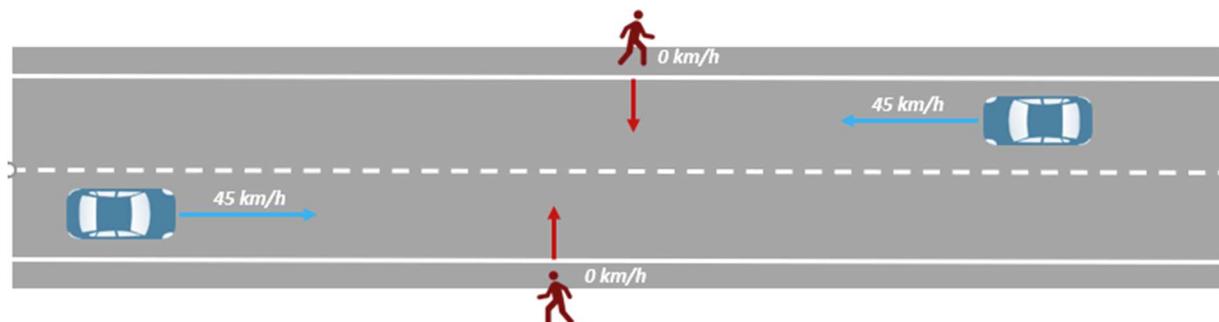


Abbildung 7: Verkehrsraum TS0 mit Referenzszenario RS0.

¹ engl. traffic space

Verkehrsraum 1 zeigt eine städtische Einfallstraße mit ebenfalls einem Fahrstreifen je Fahr- richtung, die durch eine durchge- hende Linie getrennt sind. Von rechts nähert sich eine (Einbahn-) Straße, die über einen Einfädelstreifen in die Einfallstraße übergeht. Mit Referenzszenario RS1 (siehe Abb. 8) lassen sich einfache Einfä- del szenarien simulieren, so dass man z. B. testen kann, wie eine au- tomatisierte Fahrfunktion auf un- terschiedliche Abstände und Ge- schwindigkeiten reagiert.

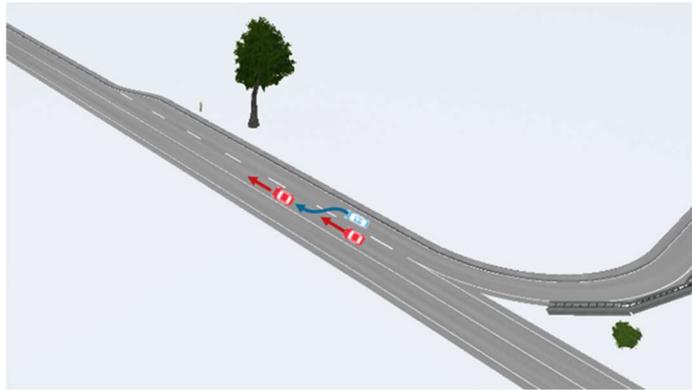


Abb. 8: Verkehrsraum TS1 mit Referenzszenario RS1

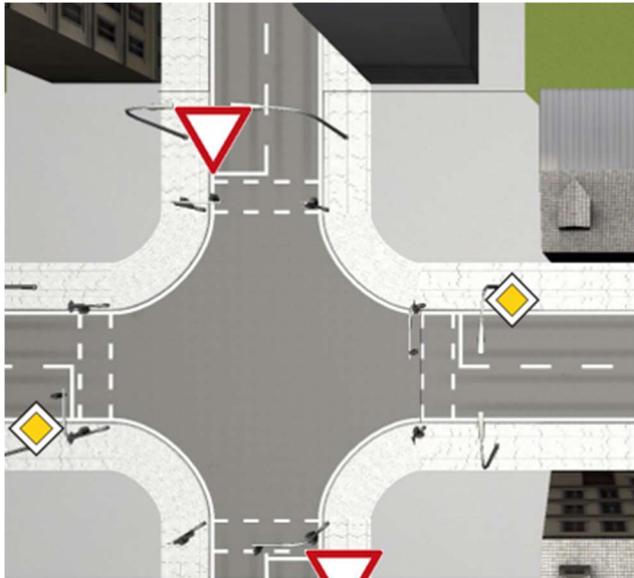


Abbildung 9: Einfache Kreuzung, Verkehrsraum TS2

Zu Meilenstein 2, der zeitlich etwa mit der Halbzeitveranstaltung des Vorhabens SET Level zusammenfiel, sollten einfache Abbiegeszenarien dargestellt werden, bei denen mehrere Verkehrsteilnehmer in Interaktion treten. Hierzu wurde Verkehrsraum TS2 entwickelt (siehe Abbildung 9). Er besteht aus einer vierarmigen, rechtwinkligen Kreuzung mit einem Fahrstreifen je Richtung und einem Gehweg auf jeder Seite. Die Straße in Ost-West-Richtung ist vorfahrtsberechtigter, während in Nord-Süd-Richtung „Vorfahrt gewähren“-Schilder angebracht sind. Teilweise ist eine Straßenrandbebauung vorhanden; auf der Nordost-Ecke befindet sich eine Parkfläche.

Für Referenzszenario RS2 (siehe Abbildung 10) wurde dieser Verkehrsraum mit diversen Verkehrsteilnehmern bestückt. Insgesamt fünf Pkw und sieben Fußgänger bilden ein realitätsnahes, städtisches Szenario. Das Ego-Fahrzeug in blau nähert sich von rechts der Kreuzung und möchte nach rechts in den nördlichen Arm abbiegen. Dabei sind kreuzende Fußgänger zu beachten, und die Sicht nach rechts ist durch einen parkenden Pkw erschwert.



Abbildung 10: Referenzszenario RS2 – Rechtsabbieger mit querenden Fußgängern

Für Meilenstein 3 kurz vor Projektabschluss wurde die Forschungskreuzung in Braunschweig als Verkehrsraum ausgewählt. Wie in Abbildung 11 zu erkennen ist, handelt es sich dabei um eine vierarmige Kreuzung mit bis zu fünf Fahrstreifen je Fahrtrichtung. Daneben sind Fahrradwege und Gehwege sowie Fußgängerüberwege vorhanden. Der Verkehr wird über eine Ampelanlage gesteuert.



Abbildung 11: Komplexe Kreuzung, Verkehrsraum TS3

Für die Simulation wurde ein Szenario erarbeitet (siehe Abbildung 12), bei dem das Ego-Fahrzeug von links in die Kreuzung einfährt und nach links abbiegt, ohne dass hierfür eine spezielle Linksabbieger-Ampel vorhanden wäre. Der Gegenverkehr ist somit zu beachten, ebenso wie Fußgänger und Radfahrer. Das Szenario wurde in verschiedenen Ausprägungen umgesetzt, bei denen die Fahrzeuge im Gegenverkehr unterschiedliche Abstände haben oder beispielsweise auf der Kreuzung noch einen Spurwechsel durchführen. Auf diese Weise entstehen unterschiedliche Situationen, die ggf. eine Herausforderung für die zu testende automatisierte Fahrfunktion darstellen könnten.

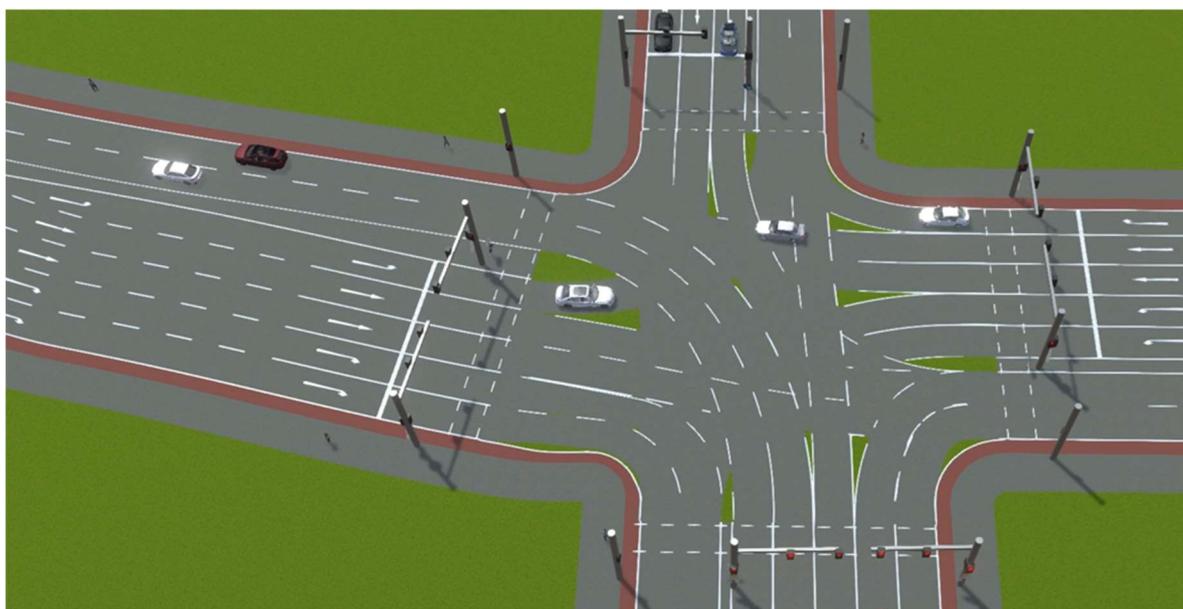


Abbildung 12: Referenzszenario RS3 – Linksabbieger auf komplexer Kreuzung

Die wesentlichen Verkehrsräume und Szenarien, die im Verlauf des Vorhabens erarbeitet wurden, sind auf dem SET Level Public GitLab [4] der Öffentlichkeit zugänglich. Dort findet sich auch eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Szenarien.

Auf der SET Level Abschlussveranstaltung am 11./12. Oktober 2022 wurden sämtliche Ergebnisse präsentiert und anschließend auf der SET Level WebSite [2] dokumentiert. Weiterhin sind dort [5] unter anderem auch Videosequenzen abgelegt, die einzelne Verkehrsräume und Szenarien zeigen – dort als Grundlage für die Kritikalitätsanalyse im Rahmen von SUC1.

2.1.2 Teilprojekt 2: Simulationsbasiertes und virtuelles Entwickeln / Testen

2.1.2.1 AP 2.1 Aufbau einer einheitlichen Integrationsarchitektur

Die Opel Automobile GmbH engagierte sich stark in Teilprojekt 2. So übernahm Opel die Leitung von UAP 2.1.7 – Methoden zur Validierung von Modellen und beteiligte sich an UAP 2.1.8, in dem die Anforderungen an die Validierung und Qualifizierung von Modellen erarbeitet wurden. Weitere Schwerpunkte legte Opel auf die Mechanismen zur Kopplung von Modellen (UAP 2.2.1), generische Ansätze für Simulationsziele und Methoden (UAP 2.2.2) sowie die Erarbeitung von Gütekriterien für die Kopplung von Simulationsmodellen (UAP 2.2.3). Schließlich konnte sich Opel noch im kombinierten UAP 2.3.2 – 2.3.6 einbringen, das sich vor allem mit der Erstellung von Anforderungen an SIL/HIL-Systeme befasste.

UAP 2.1.7 Methoden zur Validierung von Modellen

Organisation

Die Opel Automobile GmbH leitete UAP 2.1.7. Die Arbeitsstruktur des UAPs kann in verschiedene Zweige unterteilt werden. Mit Beginn der operativen Phase des UAPs wurde eine regelmäßige Konferenzschaltung eingerichtet, die das Zentrum des technischen Austauschs auf der Ebene des gesamten Unterarbeitspakets darstellte. Neben dem Hauptaugenmerk auf der Konzeption der verschiedenen nachstehend erläuterten Ergebnisse war die Entwicklung von Definitionen im Bereich der Validierung und Verifikation von Simulationsmodellen Teil der Diskussion. Besonders hervorzuheben ist hier der Wert des impliziten Liefergegenstands in Form einer Konsensbildung zwischen den Partnern, die sich in den zuvor genannten Definitionen sowie in den Erläuterungen bezüglich der verschiedenen erarbeiteten Liefergegenstände ausdrücklich widerspiegelt.

Parallel zu diesem Arbeitszweig wurden Unterarbeitsgruppen zur technischen Ausarbeitung der konzeptualisierten Liefergegenstände gebildet. Die Fortschritte der einzelnen Liefergegenstände wurden im Rahmen der UAP-Konferenzschaltung mit allen beteiligten Partnern regelmäßig überprüft, und die daraus resultierenden Vorschläge wurden genutzt, um die Qualität dieser Liefergegenstände weiter zu steigern.

Inhaltliche Verortung / Schwerpunktsetzung

Im Laufe des ersten Projektquartals wurde deutlich, dass es sinnvoll ist, im Rahmen des Gesamtprojekts festzulegen und zu priorisieren, welcher Aufgabenschwerpunkt des Unterarbeitspakets den wichtigsten Beitrag im Hinblick auf die Ziele des Arbeitspakets 2.1, das in der Vorhabenbeschreibung (VHB) [6] erläutert wird, liefern kann. Im Rahmen der VHB wird UAP 2.1.7 häufig mit "Methoden zur Validierung der Architektur" bezeichnet, während die Beschreibung der inhaltlichen Ziele von AP 2.1 im Kontext der Validierung vordergründig die Notwendigkeit für Arbeiten auf der Modell-Ebene benennt:

„Für jedes eingesetzte Simulationsmodell muss geeignet nachgewiesen werden, dass die berechneten Ergebnisse für den angedachten Einsatzzweck des Modells und bei zweckgemäßer Anwendung in der Simulationsumgebung hinreichend korrekt sind. Es werden Methoden genannt, wie die Simulationsmodelle validiert werden können im Hinblick auf eine zweckgemäße Anwendung im Simulationsverbund. Zusätzlich werden Anforderungen an andere Aspekte der Validierung von Simulationsmodellen definiert.“

In Abstimmung mit den am UAP beteiligten Projektpartnern, sowie der Teilprojekt-Leitung wurde beschlossen, dass eine Fokussierung der Arbeiten auf der Modell-Ebene für das Projekt am sinnvollsten ist. Dies ist zum einen dadurch begründet, dass sich kein anderes UAP mit der Benennung von Methoden zur Validierung von Simulationsmodelle befasst, dies aber – wie oben erwähnt – eines der beschriebenen Ziele ist. Zum anderen herrschte Einigkeit darüber, dass die gesammelten Methoden einen wertvollen Beitrag für die Modellentwicklung innerhalb von Teilprojekt 3 darstellen können. Arbeitspakete, die sich auf Fragestellungen rund um die erarbeitete Architektur fokussieren, haben den Aspekt ihrer Validierung zum Teil mitdiskutiert (beispielsweise UAP 2.1.1). Als Ergebnis der inhaltlichen Diskussionen wurde im Projektverlauf zudem deutlich, dass sowohl die Validierung als auch die Verifikation von Modellen zentrale Elemente innerhalb eines gesamtheitlichen Vertrauensnachweises einer Simulation sind. Aus diesem Grund hat sich UAP 2.1.7 sowohl mit Methoden zur Validierung als auch mit Methoden zur Verifikation von Modellen auseinandergesetzt und währenddessen weitere relevante Attribute zur Vertrauenssteigerung von

dazu beitragen können, eine Aussage über die Glaubwürdigkeit der Modelle und ihrer Ergebnisse zu treffen. Diese Kriterien umfassen beispielsweise die konzeptionelle und operative Validierung. Zusätzlich haben weitere Kriterien wie Datenglaubwürdigkeit und Unsicherheitscharakterisierung Einfluss auf die Vertrauenswürdigkeit von Simulationsmodellen. Die Methodensammlung soll Modellentwicklern verschiedener Domänen einen Auswahlkatalog zur Verfügung stellen, um zu entscheiden, welche V&V-Methoden grundsätzlich für die spezifische Entwicklungsaufgabe im Hinblick auf den beabsichtigten Anwendungszweck geeignet sind.

Der beispielhafte Validierungsbericht für ein Radar-Sensormodell ist methodisch mit der Methodensammlung verknüpft und kann nach Auswahl der geeigneten V&V-Methode als beispielhafter Folgeschritt angesehen werden. Im Bericht wird eine Validierung eines Radar-Sensormodells exemplarisch durch Anwendung der Validierungsmethode nach Viehof [7] durchgeführt. Es sei darauf hingewiesen, dass der Bericht in erster Linie darauf abzielt, ein praktikables methodisches Verfahren für die Validierung eines (Sensor-) Modells zu beschreiben. Besonders erwähnenswert sind neuartige Anpassungen der angewandten Validierungsmethodik im Bereich der sensormodellspezifischen metrischen Validitätskriterien im Validierungsbericht, die in Zusammenarbeit mit TP3 entwickelt wurden und die Qualität des Berichts zusätzlich erhöhen. Die TP-übergreifende Zusammenarbeit bei der Überprüfung des Validierungsberichts und der Methodensammlung erwies sich als äußerst gewinnbringend.

Das Dokument "Verifikations- und Validierungsmethoden als Beitrag zum Vertrauenswürdigkeitsnachweis von Modellen" umfasst im Wesentlichen:

- Beschreibung theoretischer Grundlagen zum Verständnis erarbeiteter Liefergegenstände sowie Verweise auf Primärliteratur.
- Bindeglied zwischen den verschiedenen Liefergegenständen zur Verdeutlichung ihres Zusammenspiels.
- Erläuterung der benötigten Informationen für die Anwendung der Liefergegenstände (Input) und zu deren Nutzung sowie Beschreibung der Ergebnisse des jeweiligen Liefergegenstandes (Output).
- Einordnung der Verifikation und Validierung (V&V) und deren zugehöriger Kriterien in einen übergeordneten Prozess zum Vertrauenswürdigkeitsnachweis von Modellen.
- Verortung des UAPs sowohl in Gesamtprojekt als auch im übergeordneten Prozess zum Vertrauenswürdigkeitsnachweis von Modellen.

Den letzten Liefergegenstand bildet das Template eines Credibility Assessment Reports. Dieses Artefakt umfasst eine Beschreibung aller Tätigkeiten und Evidenzen, anhand derer die Credibility eines Simulationsmodells gesamthaft argumentiert werden kann. Der Credibility Assessment Report bildet schließlich ein wichtiges Eingangsartefakt für die Anwendung des Credible Simulation Process.

Beziehung zu anderen Arbeitspaketen

Der rote Faden zwischen den einzelnen Arbeitspaketen im Kontext der Vertrauenswürdigkeit von Simulationen wurde bereits bei der Präsentation im Rahmen des Halbzeit-Events gezeigt. Eine genauere Zuordnung der UAP-Liefergegenstände zu anderen Arbeitspaketen innerhalb des Projekts SET Level ist in Tabelle 1 zusammengefasst:

Tabelle 1: Beziehungen der Liefergegenstände zu anderen Arbeitspaketen

Liefergegenstand	Arbeitspaket
Methodensammlung	UAP 2.1.8 (Anforderungen an die Validierung / Qualifizierung von Modellen) TP3 (Modellentwicklung)
Übersicht weiterführender Literatur	UAP 2.1.8 (Anforderungen an die Validierung / Qualifizierung von Modellen) TP3 (Modellentwicklung)
Validierungsbericht RADAR-Sensormodell	TP3 (Modellentwicklung)
Bericht "Verifikations- und Validierungsmethoden als Beitrag zum Vertrauenswürdigkeitsnachweis von Modellen" (Kapitel 4 des UAP-Abschlussberichts)	UAP 2.1.8 (Anforderungen an die Validierung / Qualifizierung von Modellen) Weitere UAPs im Rahmen des Projekts
Credibility Assessment Report	TP3 (Modellentwicklung / Credible Simulation Process)

Weitere Informationen

Neben der internen Erarbeitung der oben genannten Liefergegenstände hat das UAP an der Planung, Umsetzung und Auswertung einer Workshop-Reihe zum Thema Modell-, Koppungs- und Simulationsqualität mitgewirkt. Darüber hinaus war das UAP an der Präsentation "It's all about trust – Simulation Credibility" im Rahmen des Halbzeit-Events beteiligt.

Die wesentlichen Ergebnisse, die im Verlauf des Vorhabens erarbeitet wurden, sind im Intranet [8] für jedermann zugänglich.

Auf der SET Level Abschlussveranstaltung am 11./12. Oktober 2022 wurden sämtliche Ergebnisse im Rahmen eines Marktstandes sowie eines Vortrags auf der Hauptbühne präsentiert und anschließend auf der SET Level WebSite [2] dokumentiert.

UAP 2.1.8 Anforderungen an Validierung und Qualifizierung von Modellen

Im Rahmen von UAP 2.1.8 wurden Anforderungen an die Validierung und Qualifizierung gesammelt, mit denen das Leistungsvermögen von Simulationsmodellen und -umgebungen bewertet werden kann. Diese Anforderungen wurden weiter unterteilt in Anforderungen zur Validierung für (konzeptionelle) Modelle, Simulationsmodelle (insbesondere Umweltmodelle), gekoppelte Simulationsmodelle und Anforderungen an die Validierung der gesamten Simulationsumgebung. Dazu gab es einen zielstrebigem Austausch von Arbeitsdokumenten mit UAP 2.1.7. Dabei wurde beispielsweise deutlich, dass in UAP 2.1.8 formulierte Anforderungen an die Validierung von Modellen ebenfalls einen wertvollen Input für die Anwendung der in UAP 2.1.7 erarbeiteten Methodensammlung liefern können.

Ausgehend von der Methodensammlung werden Techniken auf ihre Nutzbarkeit sowie ihre Notwendigkeit beim Einsatz in der Verifikation und Validierung hin analysiert. Dabei werden Techniken vorgeschlagen, die verwendet werden sollen, um ein gewisses Qualitätslevel bei der Erstellung von Modellen sicherzustellen. Hierzu werden verschiedene Techniken empfohlen (+), bzw. dringend empfohlen (++) oder als freiwillig (0) kategorisiert. Dieses

Vorgehen orientiert sich an der Vorgehensweise der ISO 26262. Diese Techniken wurden der operativen Validierung und der Verifikation zugewiesen. Ein Qualitätslevel wird anhand des NASA-Standards zwischen 0 und 4 definiert. Um ein gewisses Qualitätslevel zu erreichen, werden nun Techniken auf Basis der Notwendigkeit für das spezifische Qualitätslevel empfohlen.

Tabelle 2: Anwendung von Verifikationstechniken auf NASA Credibility Level

Name	1	2	3	4	Rational
Statistical Techniques	0	+	++	++	Documented verification method, can be used to quantify model errors
Inspections	++	+	+	+	Informal technique

Tabelle 2 zeigt Auszüge von Verifikationstechniken, deren Durchführung empfohlen wird, um ein gewisses Level an *Credibility* bei den Simulationsmodellen zu erreichen. So wird für ein Simulationsmodell mit NASA-Level 4 dringend empfohlen, statistische Techniken zur Analyse anzuwenden. Die Technik „Inspections“ wäre nicht ausreichend, um dieses Level zu erreichen. Für ein Level-1-Simulationsmodell würde diese Technik hingegen genügen.

Tabelle 3: Anwendung von Validierungstechniken auf NASA Credibility Level

Name	1	2	3	4	Rational
Face Validation	+	+	+	+	Does not include measurements
Statistical Techniques	0	++	++	++	Depends on coverage

Dasselbe Vorgehen lässt sich auch für Validierungstechniken anwenden. Ein Beispiel ist in Tabelle 3 dargestellt. Soll ein Simulationsmodell mindestens mit Credibility Level 2 entwickelt werden, wird dringend empfohlen statistische Techniken anzuwenden. Die „Face Validation“ wird dabei empfohlen, ist aber nicht hinreichend, um das spezifische Level zu erreichen.

Diese Empfehlungen sind im Abschlussbericht [9] von UAP 2.1.8 auf Englisch zusammengefasst.

2.1.2.2 AP 2.2: Entwicklung von Mechanismen für die Kopplung von verschiedenen Simulationsmodellen

UAP 2.2.1 Mechanismen zur Kopplung von Modellen

Um Kopplungsmechanismen bewerten und zielführend erweitern zu können, wurde ein Arbeitsdokument mit einer Auflistung der im Projekt bekannten Kopplungsmechanismen erstellt. Im Rahmen der regelmäßigen Austauschmeetings wurde das Arbeitsdokument stetig erweitert. Das Arbeitsdokument soll eine Einführung in verwendete technische Mechanismen zum Koppeln von Simulationsmodelle geben und aufzeigen, welche Methode für welchen Anwendungsfall verwendet werden kann. Dabei wurden die Kopplungsmethoden **räumlich** (zentral oder verteilt), **zeitlich** (synchron/asynchron) und **inhaltlich** (Austausch) unterschieden. Einzelheiten findet man dazu im Abschlussbericht von UAP 2.2.1 [10].

UAP 2.2.2 Generische Ansätze für Simulationsziele und Methoden

In UAP 2.2.2 wurde eine Recherche zu Metriken bei der Validierung von Simulationsmodellen durchgeführt. Hiermit konnte für die Kritikalitäts- und Wirksamkeitsanalyse eine erste Matrixdarstellung erarbeitet werden, die Simulationsumgebung, Funktions- und Simulationsmodellqualität zusammenführt.

Diese Matrixdarstellung dient als Grundlage, um Einflüsse zwischen Kopplungen und Simulationszielen aufzuzeigen, siehe Abbildung 14. Beginnend mit der Bestimmung der Simulationsqualität, die u. a. berücksichtigt, wie sich ein atomares Simulationsmodell verhält, um dann im nächsten Schritt diese Modelle gekoppelt auf der makroskopischen Ebene zu untersuchen. Im darauffolgenden Schritt kann das System Under Test (SUT) sowie das Szenario selbst qualifiziert werden.

Im Rahmen der regelmäßigen Meetings von UAP 2.2.2 wurde die Szenarienexploration erarbeitet und mit Hilfe von geeigneten Metriken aus diesem UAP diskutiert. Die Ergebnisse wurden in einem Quartalstreffen vorgestellt.

	Simulation Quality (Sec. IV-B)	SUT Quality (Sec. IV-C)	Scenario Quality (Sec. IV-D)	Traffic Simulation
	QUALITY			SIMULATION
Nanoscopic	① Simulation quality of atomic simulation model	④ SUT quality of single time step	⑦ Scenario quality of scenario segment	Vehicles consist of individually simulated subunits
Microscopic	② Simulation quality of coupling mechanism	⑤ SUT quality of time interval	⑧ Scenario quality of single scenario	Vehicles modeled with individual behavior and states
Macroscopic	③ Simulation quality of coupled system	⑥ SUT quality of set of time intervals	⑨ Scenario quality of set of scenarios	Traffic modeled as fluid

Abbildung 14: Qualitätsmatrix basierend auf Untersuchungslevel und System [11]

UAP 2.2.3 Gütekriterien für die Kopplung von Simulationsmodellen

Ziel von UAP 2.2.3 war es, die verschiedenen Kopplungsmechanismen mit Blick auf ihre Güte hin zu analysieren. Da die Simulationsergebnisse insbesondere für die Sicherheitsargumentation herangezogen werden sollen, müssen die Einflüsse auf die Güte bestimmt werden können. Neben der Bewertung von Simulationsmodellen auf ihr qualitatives Verhalten hin müssen auch numerische Einflüsse analysiert und quantifiziert werden, da sich diese auf die Ergebnisse auswirken können.

Verschiedene Modellierungs- und Kopplungswerkzeuge müssen – wie in Abbildung 15 gezeigt – zunächst kategorisiert werden [11]. Diese Kategorisierung hilft, eine bestehende Simulationsumgebung auf ihre Kopplungseigenschaften hinzu analysieren. In *Quadrant I* sind

die verteilten Systeme zu finden, die sowohl eine verteilte Modellbildung als auch eine verteilte Simulation enthalten. Werden diese verteilt erstellten Modelle in einer Simulation integriert, spricht man von geschlossenem System (*Quadrant II*). Werden alle Modelle in einem System modelliert und integriert, so nennt man dies eine monolithischen Simulation (*Quadrant III*). Koppelt man hingegen diese monolithischen Simulationen miteinander, so wird von Simulatorkopplung gesprochen (*Quadrant IV*).

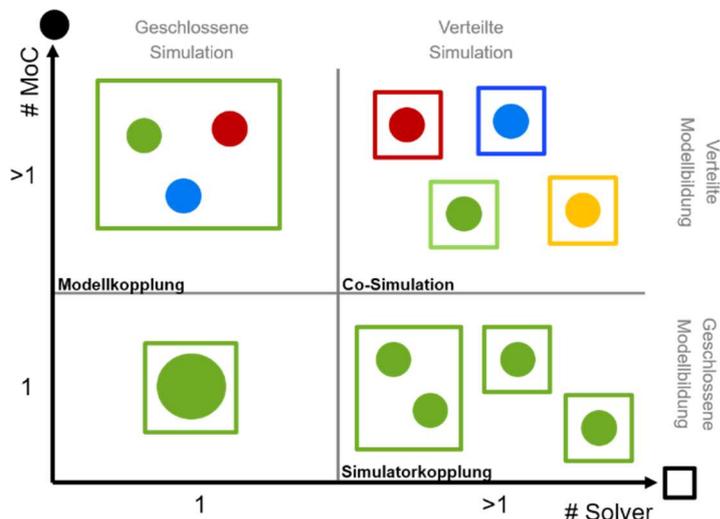


Abbildung 15: Kopplungsklassen nach M. Geimer et al. [11]

Aus dieser Abbildung ergeben sich drei Modellklassen:

- Co-Simulation
- Modellkopplung
- Simulatorkopplung

Diese Modellklassen lassen sich mit verschiedenen Simulationismethoden lösen:

- Discrete Event
- Continuous Time
- Hybrid

Im Weiteren wird sich auf die Klasse der Co-Simulationen und Simulatorkopplungen bezogen, die in den verschiedenen SUCs ihre Anwendung findet.

Um Simulationskerne miteinander zu koppeln, können Daten auf folgende Arten ausgetauscht werden (auch Kopplungsstrategien genannt):

- Synchron
- Synchron parallel (Jacobi – Schema)
- Synchron sequenziell (Gauß – Seidel-Schema)
- Synchron sequenziell (überlappend)
- Asynchron sequenziell
- Iterativ

Insbesondere bei der Co-Simulation kann es zu verschiedenen Effekten kommen, die die Simulationsergebnisse beeinflussen [12]. Der Abschlussbericht von UAP 2.2.3 [13] fasst diese in einer Tabelle zusammen.

2.1.2.3 AP 2.3: Definition von Anforderungen an die Ausführungsumgebungen

UAP 2.3.2 – 2.3.6 Anforderungen an SIL/HIL

Aufgrund der inhaltlichen Nähe der einzelnen UAPs 2.3.2 bis 2.3.6 wurde beschlossen, diese in einem gemeinsamen „UAP 2.3.2-6“ zusammenzuführen. Ziel war es, das Simulationsziel in den Mittelpunkt der Simulation zu stellen – und damit auch die Simulationenaufgabe. Somit sollen Anforderungen an die Ausführungsumgebung passend zur korrespondierenden Aufgabe abgeleitet werden. Dazu wurde ein Fragebogen [14] für die Industrie und ihre Anwender entwickelt, mit dem identifiziert werden sollte, wie sich die verschiedenen Simulationenaufgaben in den Anforderungen an die Simulationsumgebung widerspiegeln.

Der Fragebogen gliederte sich folgendermaßen:

- Einordnung der Aufgabe in das V-Model basierend auf dem SmartSE-Vorschlag von PROSTEP
- Fragen zur Simulationsdurchführung
- Fragen zu den 6 Modell-Typen (optional, nur für die verwendeten Modell-Typen ausfüllen)
 - Umwelt-Modell
 - V-ECU
 - Agenten-Modelle
 - Sensor-Modelle
 - Aktuator-Modelle
 - Physikalische Modelle
- Fragen zum Simulationsaufbau
 - Initialisierung der Simulationsumgebung
 - Simulationselemente
 - Modellkopplung
 - Simulationsinfrastruktur

Im Anschluss wurden die Antworten der Fragebögen analysiert und in einen Gesamtkontext gesetzt. Ziel war es zum einen, die gewählten SUCs als valide Anwendungsfälle zu bestätigen, und zu identifizieren, ob methodische Lücken bestehen mit Blick auf eingesetzte Standards.

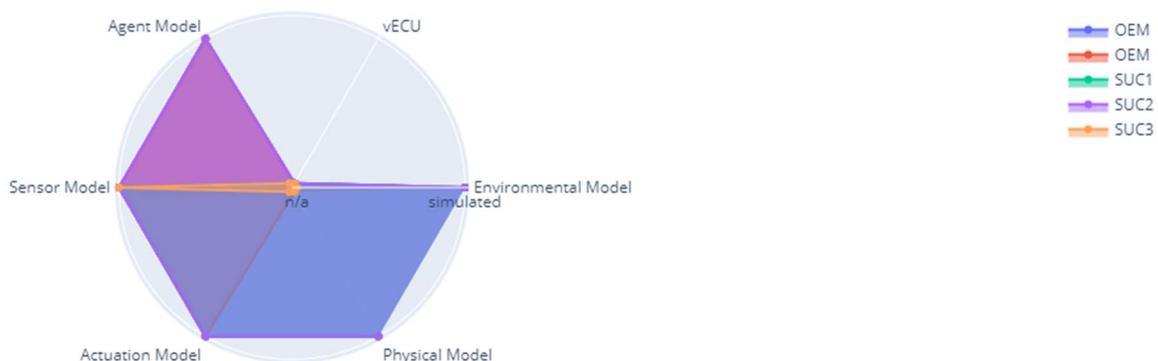


Abbildung 16: Gesamtübersicht über klassifizierte Komponenten in Model-in-the-Loop

Abbildung 16 zeigt den Einsatz von Model-in-the-Loop (MIL) und deren Komponenten nach *Steimle et al.* [1] in der Industrie und im Kontext von SET Level. Es ist zu sehen, dass die gewählten SUCs ebenfalls in der Industrie zu finden sind. Wobei SUC2 über dies hinausgeht und bereits Agenten-Modelle berücksichtigt, was sicherlich dem Forschungsgedanken dieses Vorhabens entspringt.

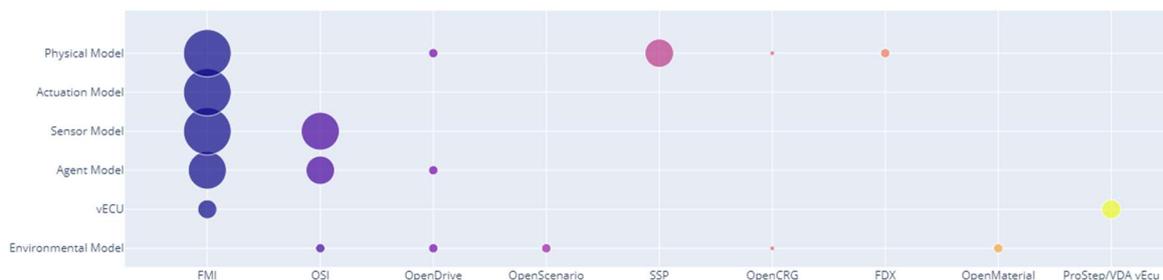


Abbildung 17: Geplante und verwendete Standards für die verschiedenen Elemente

In Abbildung 17 sind die Ergebnisse des Einsatzes von Standards zusammengefasst. Insbesondere gilt hervorzuheben, dass die eingesetzten Standards (FMI, SSP) in der Industrie nachgefragt und bereits eingesetzt werden. Darüber hinaus gibt es eine Nachfrage nach industrieller Nutzung von neuen Standards, wie z. B. OpenSCENARIO. Es lässt sich zusammenfassen, dass die wesentlichen Standards, die in SET Level verwendet werden, auch von der Industrie angewandt werden wollen.

Weitere Einzelheiten finden sich auch hierzu im Abschlussbericht von UAP 2.3.2-6 [15].

2.1.3 Teilprojekt 3: Modellspezifikation, -Entwicklung und -Validierung

Im Rahmen von Teilprojekt 3 hat sich die Opel-Automobile GmbH ausschließlich an AP 3.3 – Datenmanagement beteiligt.

2.1.3.1 AP 3.3 Datenmanagement

UAP 3.3 Simulation Order

Im Rahmen der Arbeit zum Credible Simulation Process wurde der firmenübergreifende Kooperationsprozess ausgearbeitet. Im Rahmen von Erfahrungssammlungs-Workshops erfahrener Kooperationspartner wurden die wesentlichen Schritte und Erfahrungen aus vergangenen Zusammenarbeitsprojekten gesammelt, geordnet und gebündelt, siehe Abbildung 18 und Abbildung 19.

Opel hat sich hier mit Erfahrungen aus vielen Jahren der Zusammenarbeit mit Entwicklungspartnern eingebracht (von denen auch einige an den Workshops teilgenommen haben). Das war insofern besonders wertvoll, als dass die Erfahrungen von beiden Seiten gemeinsam geteilt und bestätigt werden konnten.

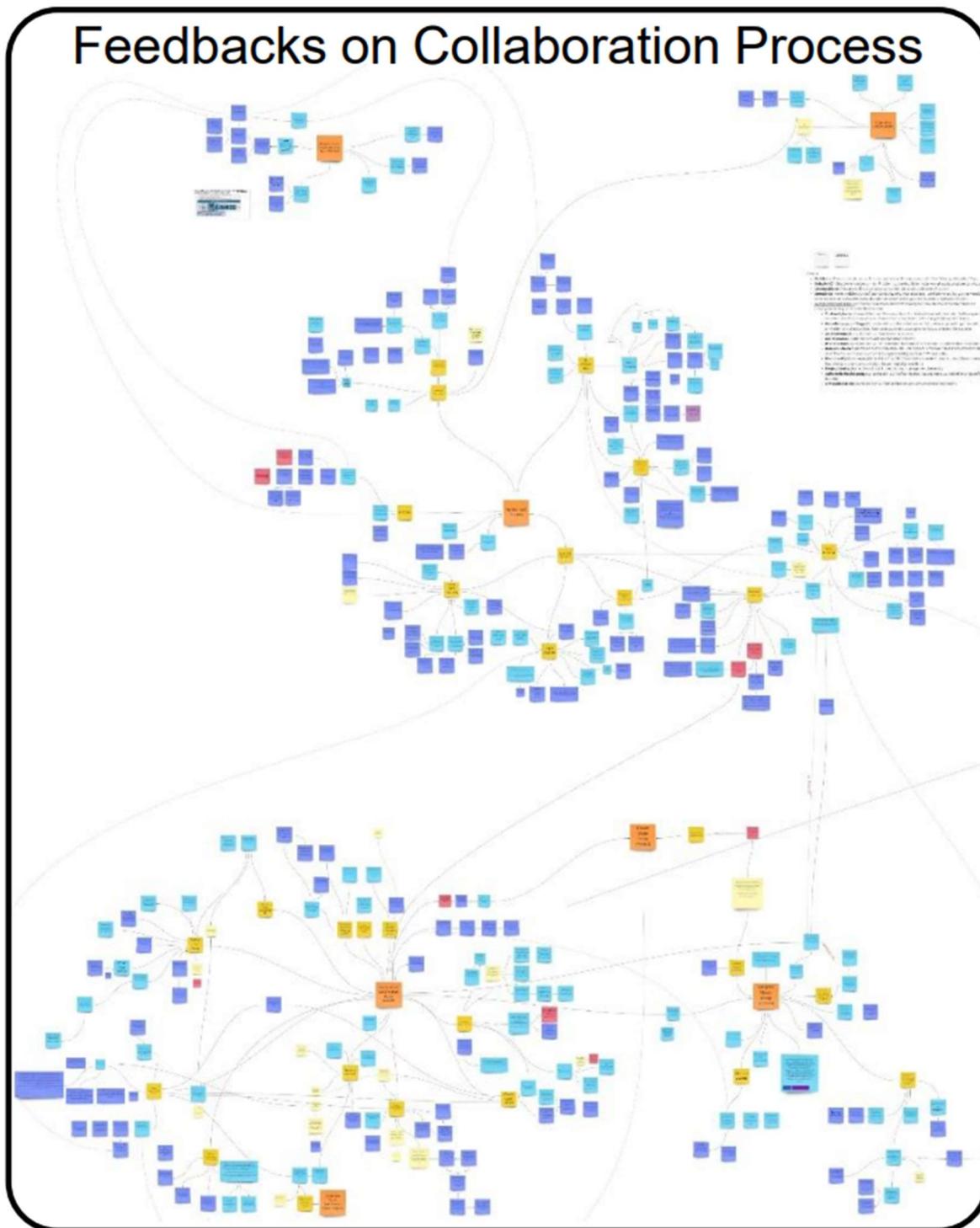


Abbildung 18: Ergebnis der gemeinsamen Erfahrungssammlung

Daraus wurden Empfehlungen für die Initialisierung von simulationsbetonten Projekten abgeleitet, also Projekte, die wesentlich von erfolgreicher Anwendung von Simulation abhängen.

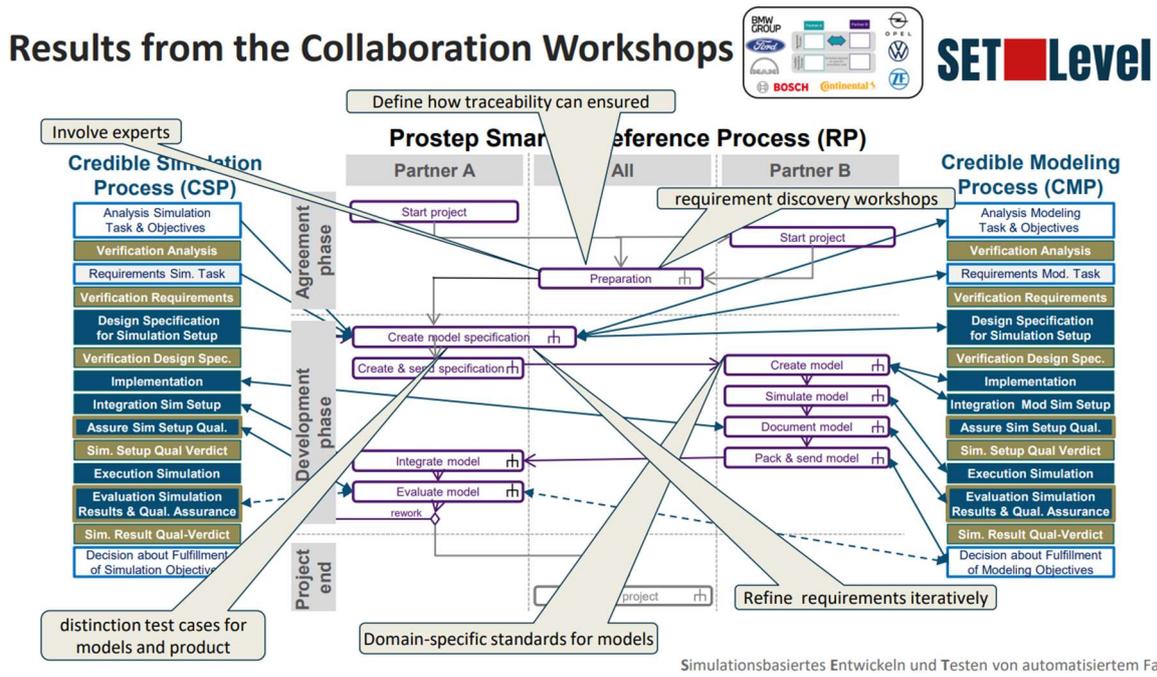


Abbildung 19: Der Referenzprozess als Ergebnis der Workshops

Im Zusammenspiel mit Credible Simulation Process und Credible Modeling Process kann so sichergestellt werden, dass alle notwendigen Schritte adressiert werden und die erforderliche Kommunikation erfolgt.

2.1.4 Teilprojekt 4: Instanziierung von Werkzeugketten für Entwicklung und Testen

2.1.4.1 AP 4.1: Ableitung der Schnittstellenanforderungen

UAP 4.1.1 Spezifikation und Nutzung der Schnittstellen zur Szenariendatenbank

Für die Beschreibung von Szenarien und Verkehrsräumen wurden verschiedene Standards untersucht, um wesentliche Metadaten zu identifizieren. Es zeigte sich, dass es einige etablierte Standards gibt, die sehr geeignet sind, in diesem Zusammenhang genutzt zu werden. Deswegen wurde im ausgewählten Format darauf geachtet, eine Referenzierbarkeit auf solche Standards zu ermöglichen.

Die folgenden Klassifizierungsstandards wurden ermittelt, analysiert und auf ihre Anwendbarkeit für diese Anwendungen hin geprüft:

1. ASAM OpenLabel
2. ASAM OpenODD
3. ASAM OpenScenario 1.x
4. ASAM OpenScenario 2.x
5. ASAM OpenDrive
6. BSI PAS 1883
7. OpenStreetMap
8. CityGML
9. gITF

Es wurden notwendige und hilfreiche Metainformationen ausgewählt, die es erlauben, Szenarien und Verkehrsräume zu suchen oder zu identifizieren. Sie wurden in administrative, strukturelle und beschreibende Metadaten gruppiert.

Diese wurden dann überprüft und validiert, indem die Verkehrsräume und Szenarien der Simulation Use Cases mit Hilfe der Metadaten beschrieben wurden.

UAP 4.1.3 Spezifikation und Dokumentation der Integrationsarchitektur

Zum Thema der Simulationsarchitekturen wurde der MBSE-Ansatz der Ebenen RFLP (Requirements, Functional, Logical, Physical) untersucht und auf die Architekturdefinition übertragen. Dadurch konnte eine klare Definition abgeleitet werden, wie die Elemente einer Simulation (Modell, Szenarien, ...) auf jeder Ebene zu verstehen sind. Diese Vorarbeit diente auch dazu, von den abstrakten Architekturen konkrete Architekturen abzuleiten, um so zu ausführbaren Modellen zu kommen, z. B. durch die Erstellung von FMU-Hüllen in der jeweiligen SSP-Modellarchitektur-Struktur.

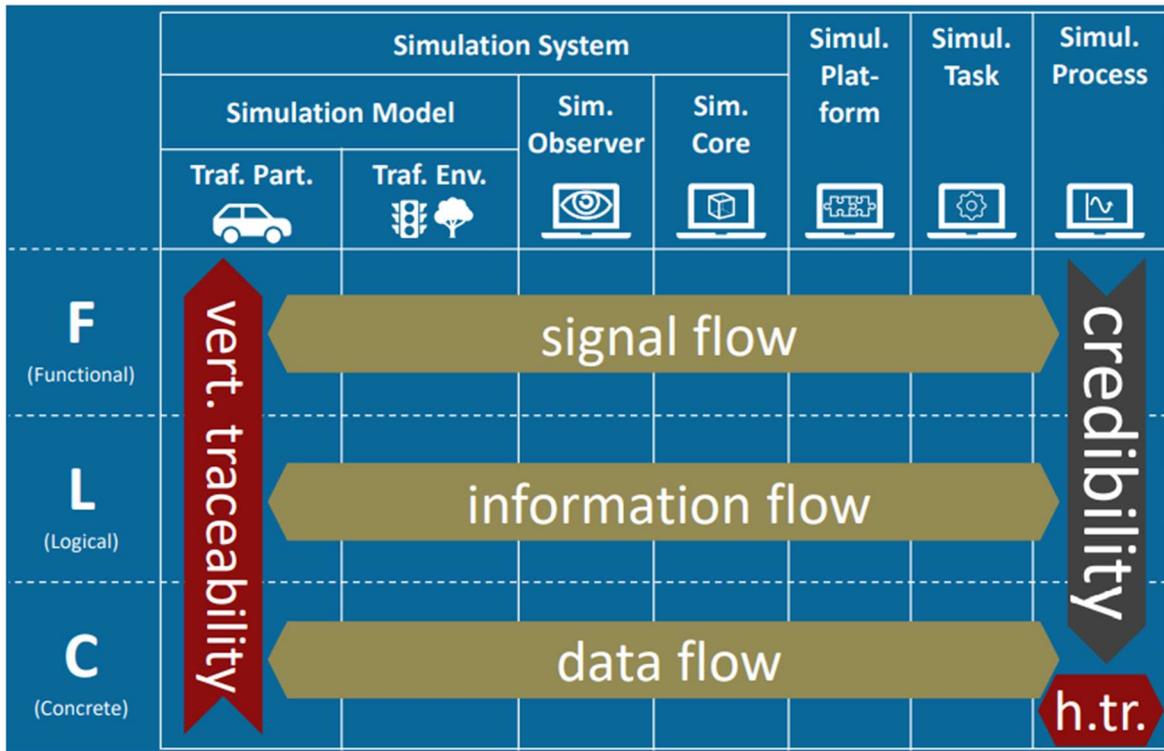


Abbildung 20: Die Orientierungsmatrix zeigt die vereinfachten Zusammenhänge

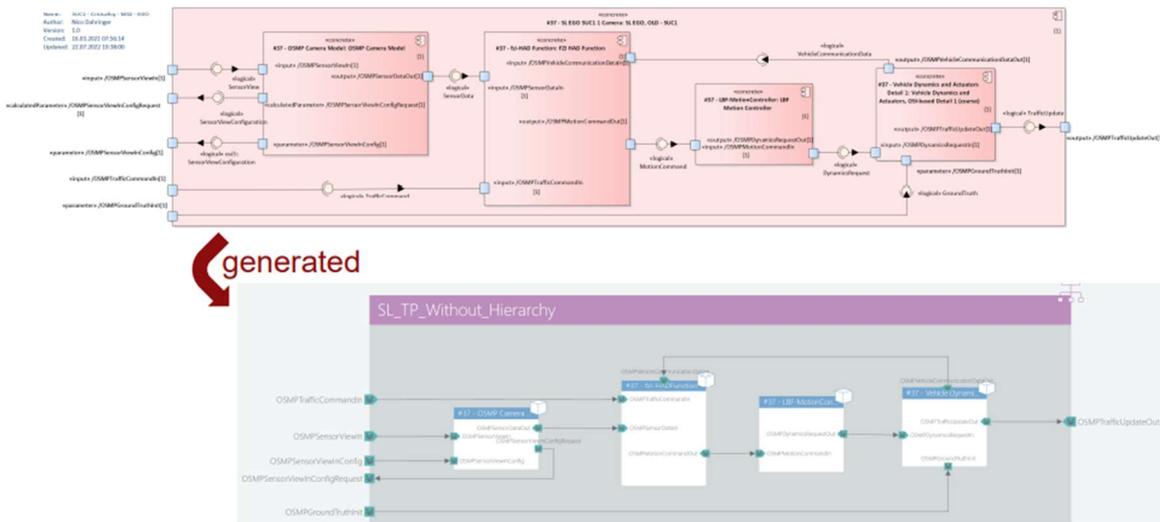


Abbildung 21: Konkretes Sub-Modell im Architekturwerkzeug und im Simulationswerkzeug

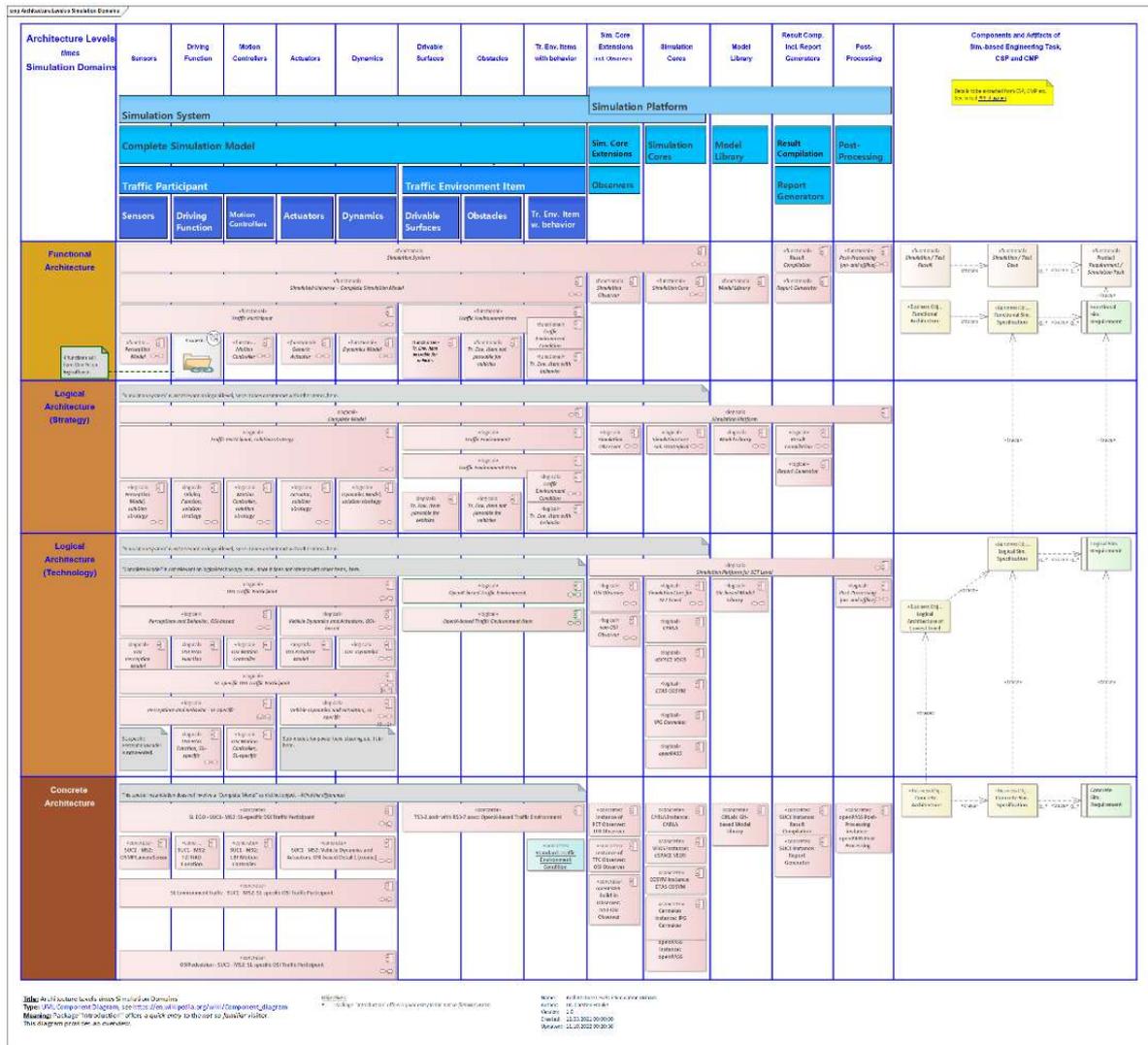


Abbildung 22: Gesamtsimulationsarchitektur als Systemmodell

Die Beschreibung der Simulationsarchitekturen wurde fortgeführt und wesentlich detailliert. Die Elemente einer Simulation (Verkehrsteilnehmer-/Umgebungsmodell, Szenarien, Simulationssystemkomponenten) wurden auf jeder Ebene (hier: funktional, logisch und konkret) beschrieben und zueinander in Bezug gesetzt. Dazu wurde eine Matrix-Darstellung entwickelt, die als Übersicht alle Simulationskomponenten auf den drei Ebenen darstellt (Abbildung 20). Zuerst wurden die Blöcke zur Beschreibung von Sensoren, Fahrfunktionen, Aktuatoren und Dynamik detailliert. Anschließend wurden weitere Komponenten beschrieben (Abbildung 21), sodass die vollständige Simulationsumgebung definiert ist (Abbildung 22).

Hierzu wurde eine Modellierungsrichtlinie erarbeitet, die die Ebenen, Modellierungsansätze und einzelne Artefakte erklärt und auch auf die in SET Level verwendeten Begriffe verweist (Glossar).

Zum besseren Verständnis der Sinnhaftigkeit einer solchen Architekturdarstellung wurde die generische Architektur für eine ausgewählte Funktion – die Notbremsfunktion – umgesetzt. Dies dient zur Kommunikation und – im Sinne eines Anwendungsbeispiels – zur Validierung der Methode.

Die Ergebnisse des UAPs wurden in den Vortrag „Integrationsarchitektur“ bzw. den Marktstand “TP4 – Integrative Architektur der Simulation“ für die Abschlussveranstaltung eingearbeitet.

Opel war während vieler Telefonkonferenzen aktiv in die Ausarbeitung der jeweiligen Detailblöcke und Begriffsdefinitionen eingebunden und konnte insbesondere die Sichtweise eines Fahrzeugherstellers einbringen.

UAP 4.1.4 Spezifikation und Dokumentation der Zulieferungen

Hierzu wurden Methoden skizziert, um Metadaten, die in TP3 definiert werden, zu verwalten und zur Klassifizierung und Nachverfolgung zu benutzen. Dabei wurde der Ansatz des *Credible Simulation Process* aufgegriffen und initial implementiert, um den Nachverfolgungsprozess klarer zu strukturieren.

Opel hat dazu außerdem seine Erfahrungen bezüglich Nachverfolgbarkeit von Simulationsartefakten zwecks Homologation und Strukturierung des Simulationsprozesses eingebracht. Auch in der Diskussion der Metadaten konnte Opel wertvolle Beiträge liefern, speziell bezüglich der Einbindung von SystemX (MIC) und FDX (PROSTEP).

Die Metadaten für Verkehrsräume und Szenarien (s. UAP 4.1.1) wurden in die Referenzimplementierung 'Tracy' integriert, sodass derartige Artefakte sinnvoll identifiziert werden können (→ Vorwärts-/Rückwärtssuche). Dazu wurde das Format SRMD bewertet und getestet.

Opel hat dazu seine Erfahrungen bezüglich der praxisrelevanten Anwendungen eingebracht.

2.1.5 Teilprojekt 5: Einbettung und kritische Reflexion

Die Opel Automobile GmbH hat sich im Rahmen des Teilprojekts 5 an Arbeitspaket 5.2 beteiligt und an mehreren Workshops mit Industriepartnern teilgenommen.

2.1.5.1 AP 5.2: Informationsgewinn aus den Erkenntnissen der Industriepartner aus der firmenspezifischen Erprobung

Um die Anwendung der Projektergebnisse in der Industrie zu erleichtern, wurde ein Prozess für den kontinuierlichen Austausch und Review der Projektergebnisse erarbeitet und mit den TP-Leitern abgestimmt. Auf der daraus entstandenen Diskussionsplattform mit den Industriepartnern konnten den Projektpartnern konkrete Projekt- oder Zwischenergebnisse bereitgestellt und mit den Industrievertretern abgestimmt werden.

Basierend auf den initialen Abstimmungsrunden innerhalb der Industrieplattform wurde von TP5 und TP3 ein Konzept entwickelt, um zusammen mit den SET Level Industriepartnern einen Review des Zusammenspiels der Kooperationsprozesse durchzuführen. Hierzu gehören beispielsweise die in TP3 erarbeiteten Prozesse, Credible Simulation Process und Credible Modelling Process.

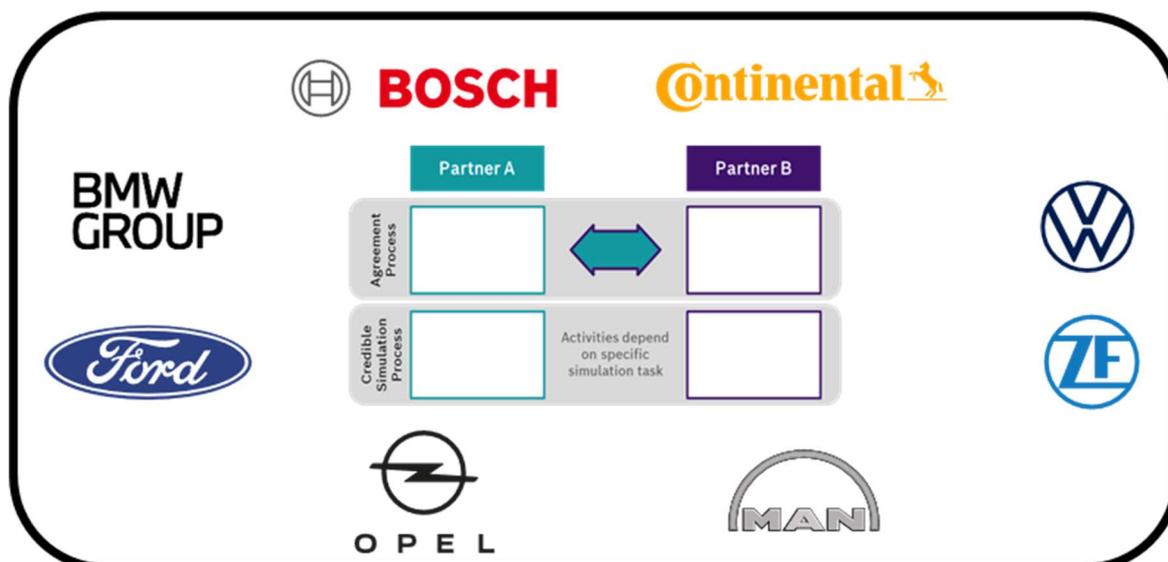


Abbildung 23: Beteiligte Partner und Hauptphasen des Kooperationsprozesses

Hintergrund der Definition des Kooperationsprozesses in TP3 und der industriellen Erprobung der Anwendbarkeit des Prozesses in TP5 ist der wachsende industrielle Trend hin zu gemeinsamen, agilen Entwicklungen, was insbesondere im Bereich des automatisierten Fahrens gilt. Beispielhaft sei hier die gemeinsame Entwicklung einer automatisierten Fahr-funktion genannt, die ein Kameramodell als Wahrnehmungsanteil der Gesamtfunktion enthält. Dieser Use Case zeigt die Notwendigkeit einer engen Zusammenarbeit und Koordination zwischen den beteiligten Partnern und steht im Gegensatz zu früheren Ansätzen, bei denen das Kameramodell nach vorgegebener Spezifikation von einem Partner allein entwickelt wurde.

Um die industrielle Anwendbarkeit des Prozesses zu gewährleisten und sicherzustellen, dass der Prozess die Zusammenarbeit zwischen Industrieunternehmen unterstützt, wurden mehrere Workshops mit den Industrievertretern (siehe Abbildung 23) von SET Level durchgeführt.

Die Opel Automobile GmbH hat sich an mehreren dieser „Industrie-Workshops“ beteiligt, die im Rahmen von AP 5.2 durchgeführt wurden, und konnte dort die firmenspezifische Sichtweise zu den einzelnen Fragestellungen einbringen.

2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Der zahlenmäßige Nachweis ist dem Erfolgskontrollbericht zu entnehmen.

2.3 Notwendigkeit der Förderung

Die Förderung ermöglichte eine umfassende, technisch tiefe Zusammenarbeit des Konsortiums, in dem alle relevanten Rollen von Akteuren im Sektor vertreten waren (OEM, Zulieferer, Technologieentwickler, Wissenschaft und Forschung). So konnten Fortschritte auf dem Feld der Simulation für den Test und die Absicherung automatisierter Straßenfahrzeuge erzielt werden, die eine breite Akzeptanz zu finden versprechen.

Insbesondere im Bereich der Standardisierung der Formate für Testbeschreibung, die simulationsinternen Schnittstellen und der darüber ausgetauschten Inhalte wurden in Abstimmung mit allen Beteiligten große Fortschritte erzielt. Auch die Nutzbarkeit der Setzungen für die praktische Anwendung konnte in gemeinsam umgesetzten Demonstrationen gezeigt werden. So hat der Ansatz, die akteurübergreifende Zusammenarbeit in einem

Verbundprojekt zu fördern, wesentlich dazu beigetragen, im vorwettbewerblichen Bereich Übereinkünfte zu treffen, die zukünftig in wirtschaftliche Umsetzungen einfließen und fortschrittliche Technologien auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik für alle Akteure verfügbar machen.

Durch die Förderung des Projekts SET Level wurde die Qualität der erreichten Ergebnisse insbesondere im Bereich der standardisierten Datenformate und der eingesetzten Tools durch die Abstimmung und Zusammenarbeit im Gegenstandsbereich der beteiligten Firmen und Institutionen in erheblichem Maße gesteigert. Ebenso wurden durch die Zusammenarbeit im Projekt umfangreichere Projektergebnisse erzielt, da die Zuwendung eine umfassendere Betrachtung und erweiterte Evaluation der Ergebnisse ermöglicht hat.

Durch die finanzielle Zuwendung eröffnete sich für die Opel Automobile GmbH u. a. die Möglichkeit, einen weiteren Doktoranden zu beschäftigen, der den firmeninternen Aufbau einer Simulationsumgebung massiv vorangetrieben hat. Seine Arbeiten, die er im Rahmen von SET Level erbracht hat, konnten hierbei auch gewinnbringend eingesetzt werden.

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit

Für die Opel Automobile GmbH bilden die bei der Durchführung des Vorhabens erzielten Ergebnisse einen zentralen Beitrag zu einer Entscheidung über die Serienentwicklung von automatisierten Fahrsystemen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden genutzt, um genauer zu bestimmen, in welcher Systemausprägung und in welchem Zeitrahmen ein solches System auf dem europäischen Kraftfahrzeugmarkt eingeführt werden kann. Die im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse fließen in Vorausentwicklungsprojekte ein, in denen unter anderem die technischen Anforderungen für eine Serienfertigung erarbeitet werden. Daneben werden jedoch auch eine Reihe von nicht technischen Aspekten beleuchtet, z. B. die Produkt- und Marketingstrategien des Stellantis-Konzerns oder die Wirtschaftlichkeit einer möglichen Umsetzung in ein Serienprodukt. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass es typischerweise drei bis fünf Jahre dauert, bis die Ergebnisse aus einem erfolgreich abgeschlossenen Forschungsvorhaben den Weg in die Serienproduktion gefunden haben, sofern die wirtschaftlichen und gesetzlichen Voraussetzungen gegeben sind und die notwendige Infrastruktur eingerichtet wurde.

2.5 Bekannt gewordener Fortschritt

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine Fortschritte anderer Vorhaben auf dem Gebiet von SET Level bekannt geworden, die einen signifikanten Einfluss auf SET Level hatten.

2.6 Ergebnisverbreitung

Die Verbreitung der Projektergebnisse erfolgte durch wissenschaftliche Veröffentlichungen sowie über eine Zwischen- und eine Abschlusspräsentation, zu denen ein breites Publikum eingeladen wurde.

2.6.1 Zwischen- und Abschlusspräsentation

Die wichtigsten Arbeitsergebnisse des Vorhabens wurden im Rahmen einer Zwischenpräsentation im April 2021 sowie einer Abschlusspräsentation im Oktober 2022 der Öffentlichkeit vorgestellt (Abbildung 24).



Abbildung 24: Impressionen der Abschlusspräsentation in München im Oktober 2022

Aufgrund der COVID-19-Pandemie konnte die Zwischenpräsentation nur online stattfinden – d. h. die Vorträge der einzelnen Partner wurden im HomeOffice oder der Arbeitsstelle der Vortragenden gehalten und über eine Online-Sitzung simultan an alle Teilnehmer übertragen.

Für die Abschlusspräsentation konnte eine hybride Veranstaltungsvariante gefunden werden: Während sich die Vortragenden bei BMW in München vor Ort versammelten, waren die anderen Teilnehmer online zugeschaltet. Die Vorträge fanden auf der Bühne im Vortragssaal statt und wurden aufgezeichnet sowie direkt an die externen Zuschauer übertragen. Posterbeiträge wurden online übertragen und teilweise auch separat aufgezeichnet. Während der Abschlusspräsentation waren über zweihundert externe Gäste online zugeschaltet und konnten die Vorträge verfolgen. Sämtliche Präsentationen können auch über das Projektende hinaus noch über die SET Level Website [2] abgerufen werden.

2.6.2 Erfolgte Veröffentlichungen

Im Zuge der Ergebnisverbreitung erfolgte die Präsentation der SET Level-Umfänge wie in

Tabelle 4 aufgelistet:

Tabelle 4: Veröffentlichungen der SET Level-Ergebnisse durch Opel

Datum	Veranstaltung / Veröffentlichung	Ort	Titel	Autoren	Ref.
29.04.2021	SET Level Halbzeitpräsentation	online	It's all about trust - simulation credibility	Dirk Frerichs (Opel) Anne Grätz (Bosch) Birte Kramer (OFFIS)	[16] [17]
29.04.2021	SET Level Halbzeitpräsentation	online	Reference Scenarios and Traffic Spaces	Stefan Berger (Opel) Andreas Pütz (Ford) Daniel Becker (RWTH Aachen)	[18] [19]
2022	IEEE Access		Toward Generating Sufficiently Valid Test Case Results: A Method for Systematically Assigning Test Cases to Test Bench Configurations in a Scenario-Based Test Approach for Automated Vehicles	Markus Steimle (TUB) Nico Weber (Opel) Markus Maurer (TUB)	[1]
11.10.2022	SET Level Abschlusspräsentation	München	It's all about Trust – Simulation Credibility	Anne Grätz (Bosch) Nico Weber (Opel)	[20]
11.10.2022	SET Level Abschlusspräsentation	München	Simulation Credibility Layers – Toward a Holistic Assessment	Nico Weber (Opel) Philipp Rosenberger (TUD)	[21]
11.10.2022	SET Level Abschlusspräsentation	München	Effective Scenario Definition for Diverse Applications of Simulation	Stefan Berger (Opel) Andreas Pütz (Ford) Daniel Becker (RWTH Aachen)	[22]

3 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Projekte der PEGASUS-Familie.....	6
Abbildung 2: Zusammensetzung der Partner von SET Level.....	7
Abbildung 3: Schnelle Iterationen in Projektmeilensteinen.....	7
Abbildung 4: Zusammenspiel der Teilprojekte von SET Level.....	8
Abbildung 5: Zeitplanung mit Meilenstein- und Abschlussberichten.....	9
Abbildung 6: 6-Ebenen-Modell aus PEGASUS.....	14
Abbildung 7: Verkehrsraum TS0 mit Referenzszenario RS0.	14
Abbildung 8: Verkehrsraum TS1 mit Referenzszenario RS1	15
Abbildung 9: Einfache Kreuzung, Verkehrsraum TS2.....	15
Abbildung 10: Referenzszenario RS2 – Rechtsabbieger mit querenden Fußgängern	16
Abbildung 11: Komplexe Kreuzung, Verkehrsraum TS3.....	16
Abbildung 12: Referenzszenario RS3 – Linksabbieger auf komplexer Kreuzung.....	17
Abbildung 13: Zusammenspiel der generierten Liefergegenstände	19
Abbildung 14: Qualitätsmatrix basierend auf Untersuchungslevel und System [11].....	23
Abbildung 15: Kopplungsklassen nach M. Geimer et al. [11].....	24
Abbildung 16: Gesamtübersicht über klassifizierte Komponenten in Model-in-the-Loop ...	25
Abbildung 17: Geplante und verwendete Standards für die verschiedenen Elemente	26
Abbildung 18: Ergebnis der gemeinsamen Erfahrungssammlung.....	27
Abbildung 19: Der Referenzprozess als Ergebnis der Workshops.....	28
Abbildung 20: Die Orientierungsmatrix zeigt die vereinfachten Zusammenhänge	30
Abbildung 21: Konkretes Sub-Modell im Architekturwerkzeug und im Simulationswerkzeug	30
Abbildung 22: Gesamtsimulationsarchitektur als Systemmodell	31
Abbildung 23: Beteiligte Partner und Hauptphasen des Kooperationsprozesses.....	33
Abbildung 24: Impressionen der Abschlusspräsentation in München im Oktober 2022	35

4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beziehungen der Liefergegenstände zu anderen Arbeitspaketen	21
Tabelle 2: Anwendung von Verifikationstechniken auf NASA Credibility Level	22
Tabelle 3: Anwendung von Validierungstechniken auf NASA Credibility Level	22
Tabelle 4: Veröffentlichungen der SET Level-Ergebnisse durch Opel	36

5 Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
ASAM	Association for Standardization of Automation and Measuring Systems
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (bis 2021)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (ab 2022)
COVID-19	Coronavirus Disease 2019
CMP	Credible Modeling Process
CSP	Credible Simulation Process
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ECU	Electronic Control Unit, Elektronisches Steuergerät
FDX	Functional Data Exchange
FZI	Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe
FMI	Functional Mock-up Interface
FMU	Functional Mock-up Unit
HIL	Hardware in the Loop
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization
IT	Information Technology
ITS	IT Service
Ko-HAF	Förderprojekt des BMWK
MBSE	Model-based System Engineering
MS	(Projekt-)Meilenstein
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OEM	Original Equipment Manufacturer, Automobilhersteller
OSI	Open Simulation Interface
PEGASUS	Förderprojekt des BMWK
Radar	Radio Detection and Ranging
RFLP	Requirements, Functional, Logical, Physical
RS	Reference Scenario, Referenzszenario
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SAE	Society of Automotive Engineers
SIL	Software in the Loop
SRMD	Simulation Resource Meta Data
SSP	System Structure and Parameterization
SUC	Simulation Use Case
SUT	System under Test
TP	Teilprojekt

TPX	Plattform zum Austausch zwischen verschiedenen Förderprojekten
TS	Traffic Space, Verkehrsraum
TUD	Technische Universität Darmstadt
TUB	Technische Universität Braunschweig
UAP	Unterarbeitspaket
V-ECU	Virtuelles Steuergerät
VHB	Vorhabenbeschreibung
VVMethoden	Förderprojekt des BMWK
VV, V&V	Validierung und Verifikation

6 Literaturverzeichnis

- [1] M. Steimle, N. Weber und M. Maurer, „Toward Generating Sufficiently Valid Test Case Results: A Method for Systematically Assigning Test Cases to Test Bench Configurations in a Scenario-Based Test Approach for Automated Vehicles,“ *IEEE Access*, pp. 6260-6285, vol. 10, 2022.
- [2] „SET Level WebSite Abschlusspräsentation,“ SET Level, 2022. [Online]. Available: <https://setlevel.de/en/final-presentation>. [Zugriff am 28 11 2022].
- [3] „SET Level Public GitLab,“ SET Level, 2022. [Online]. Available: <https://gitlab.setlevel.de/open>. [Zugriff am 28 11 2022].
- [4] „SET Level Public GitLab TSS,“ SET Level, 2022. [Online]. Available: <https://gitlab.setlevel.de/open/traffic-spaces-and-scenarios/tss>. [Zugriff am 28 11 2022].
- [5] „SET Level Website Abschlusspräsentation UAP121,“ SET Level, 2022. [Online]. Available: <https://setlevel.de/en/final-presentation/booths/effective-scenario-definition>. [Zugriff am 28 11 2022].
- [6] F. Koester, D. Behnecke, H. Hungar, J. Köhler, H.-M. Heinkel, S. Rude and M. Brandstätter, "Vorhabenbeschreibung - Simulationsbasiertes Entwickeln und Testen von Level 4 und 5 Systemen," 2019.
- [7] M. Viehof, „Objektive Qualitätsbewertung von Fahrdynamiksimulationen durch statistische Validierung,“ TUprints, Darmstadt, 2018.
- [8] „SET Level Public GitLab Simulation Credibility,“ SET Level, 2022. [Online]. Available: <https://gitlab.setlevel.de/open/simulation-credibility>. [Zugriff am 28 11 2022].
- [9] „UAP-Abschlussbericht 2.1.8,“ [Online]. Available: https://gitlab.setlevel.de/pm/tp2/documents-tp2/-/blob/master/02_Durchfuehrung/AP2.1_Integrationsarchitektur/UAP2.1.8_Anforderungen_an_Validierung-Qualifizierung_von_Modellen/UAP%20Abschlussbericht/SETLevel-UAP-Abschluss218.docx. [Zugriff am 03 01 2023].
- [10] „UAP 221 AB,“ [Online]. Available: https://gitlab.setlevel.de/pm/tp2/documents-tp2/-/blob/master/02_Durchfuehrung/AP2.2_Kopplung_von_Simulationsmodellen/2.2.1/KopplungsmethodenModelle.md. [Zugriff am 03 01 2023].
- [11] M. Geimer, T. Krüger und P. Linsel, „Co-Simulation, gekoppelte Simulation oder Simulatorkopplung? Ein Versuch der Begriffsvereinheitlichung,“ *O+P Ölhydraulik und Pneumatik*, pp. 572 - 576, 2006.
- [12] C. Gomes, C. Thule, D. Broman, P. Larsen und H. Vangheluwe. *Cosimulation: State of the art.*
- [13] „Abschlussbericht UAP 2.2.3,“ [Online]. Available: https://gitlab.setlevel.de/pm/tp2/documents-tp2/-/blob/master/02_Durchfuehrung/AP2.2_Kopplung_von_Simulationsmodellen/2.2.3/Arbeitsdokument_G%C3%BCtekriterien_f%C3%BCr_die_Kopplung_draft.docx. [Zugriff am 03 01 2023].
- [14] „UAP232-Fragebogen,“ [Online]. Available: <https://gitlab.setlevel.de/pm/tp2/documents-tp2/>

- /blob/master/02_Durchfuehrung/AP2.3_Anforderungen_an_Ausfuehrungsumgebun-
gen/AP2.3-Fragebogen-Summary.xlsx. [Zugriff am 03 01 2023].
- [15] „Abschlussbericht UAP 2.3.2.-6,“ [Online]. Available:
[https://gitlab.setlevel.de/pm/tp2/documents-tp2/-
/blob/master/02_Durchfuehrung/AP2.3_Anforderungen_an_Ausfuehrungsumgebun-
gen/UAP234-6_SIL_HIL_vernetzte-Systeme/UAP2.3.4-5-6-SIL-HIL-
vernetzte_Systeme.docx](https://gitlab.setlevel.de/pm/tp2/documents-tp2/-/blob/master/02_Durchfuehrung/AP2.3_Anforderungen_an_Ausfuehrungsumgebun-
gen/UAP234-6_SIL_HIL_vernetzte-Systeme/UAP2.3.4-5-6-SIL-HIL-
vernetzte_Systeme.docx). [Zugriff am 03 01 2023].
- [16] A. Grätz, D. Frerichs and B. Kramer, "It's all about trust - simulation credibility,"
[Online]. Available: [https://setlevel.de/assets/mid-term-presentation/Simulation-
Credibility.pdf](https://setlevel.de/assets/mid-term-presentation/Simulation-
Credibility.pdf). [Accessed 8 November 2022].
- [17] D. Frerichs, A. Grätz und B. Kramer, „SET Level HZP Trust Video,“ 29 04 2021.
[Online]. Available:
[https://www.youtube.com/watch?v=BJV0YQ3Legw&list=PLtbop7o6Jfx7_Is8U468G1
ToMo5ws59rV&index=17](https://www.youtube.com/watch?v=BJV0YQ3Legw&list=PLtbop7o6Jfx7_Is8U468G1
ToMo5ws59rV&index=17). [Zugriff am 13 12 2022].
- [18] S. Berger, A. Pütz und D. Becker, „SET Level GitLab HZP TS Slides,“ 29 04 2021.
[Online]. Available: [https://setlevel.de/assets/mid-term-presentation/Reference-
Scenarios-and-Traffic-Spaces.pdf](https://setlevel.de/assets/mid-term-presentation/Reference-
Scenarios-and-Traffic-Spaces.pdf). [Zugriff am 13 12 2022].
- [19] S. Berger, A. Pütz und D. Becker, „SET Level HZP TS Video,“ 29 04 2021. [Online].
Available:
[https://www.youtube.com/watch?v=m6WAaITo5Ug&list=PLtbop7o6Jfx7_Is8U468G1
ToMo5ws59rV&index=12](https://www.youtube.com/watch?v=m6WAaITo5Ug&list=PLtbop7o6Jfx7_Is8U468G1
ToMo5ws59rV&index=12). [Zugriff am 13 12 2022].
- [20] A. Grätz und N. Weber, „SET Level final Simulation Credibility,“ 11 10 2022. [Online].
Available: <https://setlevel.de/en/final-presentation/booths/simulation-credibility>.
[Zugriff am 15 12 2022].
- [21] N. Weber und P. Rosenberger, „SET Level final Sim Cred Layers,“ 11 10 2022.
[Online]. Available: [https://setlevel.de/en/final-presentation/presentations/simulation-
credibility-layers](https://setlevel.de/en/final-presentation/presentations/simulation-
credibility-layers). [Zugriff am 15 12 2022].
- [22] S. Berger, A. Pütz und D. Becker, „SET Level final eff sc def,“ 11 10 2022. [Online].
Available: [https://setlevel.de/en/final-presentation/booths/effective-scenario-
definition](https://setlevel.de/en/final-presentation/booths/effective-scenario-
definition). [Zugriff am 15 12 2022].
- [23] B. Schutt, M. Steimle, B. Kramer, D. Behnecke und E. Sax, „A Taxonomy for Quality
in Simula-tion-Based Development and Testing of Automated Driving Systems.,“
IEEE Access, p. 18631–18644, 10 2022.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN k.A.	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel SET Level – Simulationsbasiertes Entwickeln und Testen von automatisiertem Fahren	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Stefan Berger Nico Weber Karl-Michael Hahn Dirk Frerichs	5. Abschlussdatum des Vorhabens Oktober 2022
	6. Veröffentlichungsdatum k.A.
	7. Form der Publikation Dokument
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Opel Automobile GmbH Bahnhofplatz D-65423 Rüsselsheim am Main	9. Ber. Nr. Durchführende Institution k.A.
	10. Förderkennzeichen 19S19004S
	11. Seitenzahl 42
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 23
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 24
16. Zusätzliche Angaben k.A.	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TÜV Rheinland Consulting GmbH Forschungsmanagement Projekträger Bodengebundene Verkehrstechnologien Am Grauen Stein 51105 Köln 29. April 2023	

18. Kurzfassung

Das Vorhaben SET Level adressiert das simulationsbasierte Entwickeln und Testen von automatisierten Fahrzeugen in urbanen Räumen. Mit der Weiterentwicklung numerischer Simulationsmethoden und der Konzeptionierung und Umsetzung neuer Mechanismen zur Modellkopplung werden wichtige Beiträge zu simulationsbasierten Test- und Freigabeprozeduren geliefert. Besondere Herausforderungen liegen hierbei darin, Anforderungen an die Simulationsumgebung formal fassbar zu machen sowie zu quantifizieren. Die Validität des entstehenden Gesamtmodells ist hierbei eine zentrale Anforderung.

Zentrale Ergebnisse von SET Level sind die Entwicklung von verlässlichen Simulationsprozessen und einer soliden Architektur der Simulationsumgebung. Hier ist in erster Linie der sog. Credible Simulation Process zu nennen, der im Rahmen von SET Level entwickelt wurde. Er bietet eine Methode zur Simulation von automatisierten Fahrfunktionen, die den aktuellen Ansprüchen an Zuverlässigkeit und Sicherheit genügt. Der Credible Modelling Process wiederum stellt eine umfängliche Methode dar zur Erzeugung von Modellen für Fahrzeugkomponenten und -funktionen, die später in die Simulationsumgebung integriert werden können. Und schließlich wurde eine Architektur für die gesamte Simulationsumgebung geschaffen, die es den beteiligten Partnern erlaubt, in ihrem (firmen-) spezifischen Umfeld eine Simulationsumgebung aufzubauen, die den gemeinsam erarbeiteten Anforderungen genügt und eine Integration der Ergebnisse von SET Level erlaubt.

Viele der erzielten Projektergebnisse wurden von der Opel Automobile GmbH aufgegriffen. So wurde während der Projektlaufzeit unter anderem eine Simulationsplattform aufgebaut, mit der automatisierte Fahrfunktionen getestet und validiert werden können. Dabei kann der Umgebungsverkehr mit intelligenten Agentenmodellen simuliert werden, bei dem die simulierten Verkehrsteilnehmer direkt auf das Ego-Fahrzeug mit der automatisierten Fahrfunktion reagieren.

Da die Herstellung von automatisierten Fahrzeugen insbesondere bzgl. der Sensorik nicht ohne eine breite Zulieferindustrie möglich ist, wird sich die gemeinsame Erarbeitung von Spezifikationen (beispielsweise für die Schnittstellen von Sensormodellen, die dann ebenfalls vom Zulieferer beigesteuert werden müssen) schnell bezahlt machen und die Zusammenarbeit zwischen Automobilhersteller und Zulieferer vereinfachen.

Allgemeine Informationen zum Vorhaben bzw. zum Konsortium sind auf der SET Level Homepage verfügbar: <https://setlevel.de/>

Die detaillierten Projektergebnisse, die auch auf der Abschlusspräsentation dargestellt wurden, findet man unter <https://setlevel.de/neuigkeiten/abschlussevent-praesentationen-und-videoaufzeichnungen>

19. Schlagwörter

Automatisiertes Fahren, urbaner Raum, automatisierte Fahrfunktion, Test, Validierung, Verifikation

20. Verlag

k.A.

21. Preis

k.A.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN n/a	2. type of document (e.g. report, publication) Report
3. title SET Level – Simulation-based Development and Testing of Automated Driving	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Stefan Berger Nico Weber Karl-Michael Hahn Dirk Frerichs	5. end of project October 2022
	6. publication date n/a
	7. form of publication Document
8. performing organization(s) (name, address)	9. originator's report no. n/a
	10. reference no. 19S19004S
	11. no. of pages 42
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 23
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 24
16. supplementary notes n/a	
17. presented at (title, place, date) TÜV Rheinland Consulting GmbH Forschungsmanagement Projekträger Bodengebundene Verkehrstechnologien Am Grauen Stein 51105 Köln 29. April 2023	

18. abstract

The project SET Level addresses simulation-based development and testing of automated vehicles in urban environments. Advanced numerical simulation methods and concepts for innovative mechanisms for model coupling deliver important contributions for simulation-based test and release procedures. The formal description and quantification of requirements for the simulation are particularly challenging.

Principal achievements of SET Level are the solid architecture of the simulation environment and development of credible simulation processes which allows a simulation of automated driving functions satisfying the current standards regarding reliability and safety. The so-called credible modelling process constitutes a comprehensive method for creating models for vehicle components and functions to be integrated in the simulation environment. The proposed simulation architecture allows the project partners to build up a simulation platform within their (company-) specific environment which meets the jointly acquired specifications and allows for an integration of the SET Level achievements.

Opel has seized many of the SET Level results, e. g. the build-up of a co-simulation platform capable to test and validate automated driving functions in combination with intelligent traffic participants driven by individual traffic agent models.

Development and production of automated vehicles requires close collaboration with TIER-1 suppliers – in particular with regard to environmental sensing. Therefore, jointly developed specifications and interfaces are supposed to quickly pay off and ease the collaboration between car manufacturer and suppliers.

General information on the project and the consortium are available at the SET Level Homepage: <https://setlevel.de/>

More detailed project results which were also presented at the SET Level final event in Munich can be found at <https://setlevel.de/neuigkeiten/abschlussevent-praesentationen-und-videoaufzeichnungen>

19. keywords

Automated driving, urban space, automated driving function, test, validation, verification

20. publisher
n/a

21. price
n/a

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN n/a	2. type of document (e.g. report, publication) Report
3. title SET Level – Simulation-based Development and Testing of Automated Driving	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Stefan Berger Nico Weber Karl-Michael Hahn Dirk Frerichs	5. end of project October 2022
	6. publication date n/a
	7. form of publication Document
8. performing organization(s) (name, address)	9. originator's report no. n/a
	10. reference no. 19S19004S
	11. no. of pages 42
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 23
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 24
16. supplementary notes n/a	
17. presented at (title, place, date) TÜV Rheinland Consulting GmbH Forschungsmanagement Projekträger Bodengebundene Verkehrstechnologien Am Grauen Stein 51105 Köln 29. April 2023	

18. abstract

The project SET Level addresses simulation-based development and testing of automated vehicles in urban environments. Advanced numerical simulation methods and concepts for innovative mechanisms for model coupling deliver important contributions for simulation-based test and release procedures. The formal description and quantification of requirements for the simulation are particularly challenging.

Principal achievements of SET Level are the solid architecture of the simulation environment and development of credible simulation processes which allows a simulation of automated driving functions satisfying the current standards regarding reliability and safety. The so-called credible modelling process constitutes a comprehensive method for creating models for vehicle components and functions to be integrated in the simulation environment. The proposed simulation architecture allows the project partners to build up a simulation platform within their (company-) specific environment which meets the jointly acquired specifications and allows for an integration of the SET Level achievements.

Opel has seized many of the SET Level results, e. g. the build-up of a co-simulation platform capable to test and validate automated driving functions in combination with intelligent traffic participants driven by individual traffic agent models.

Development and production of automated vehicles requires close collaboration with TIER-1 suppliers – in particular with regard to environmental sensing. Therefore, jointly developed specifications and interfaces are supposed to quickly pay off and ease the collaboration between car manufacturer and suppliers.

General information on the project and the consortium are available at the SET Level Homepage: <https://setlevel.de/>

More detailed project results which were also presented at the SET Level final event in Munich can be found at <https://setlevel.de/neuigkeiten/abschlussevent-praesentationen-und-videoaufzeichnungen>

19. keywords

Automated driving, urban space, automated driving function, test, validation, verification

20. publisher
n/a

21. price
n/a

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN n/a	2. type of document (e.g. report, publication) Report
3. title SET Level – Simulation-based Development and Testing of Automated Driving	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Stefan Berger Nico Weber Karl-Michael Hahn Dirk Frerichs	5. end of project October 2022
	6. publication date n/a
	7. form of publication Document
8. performing organization(s) (name, address)	9. originator's report no. n/a
	10. reference no. 19S19004S
	11. no. of pages 42
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 23
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 24
16. supplementary notes n/a	
17. presented at (title, place, date) TÜV Rheinland Consulting GmbH Forschungsmanagement Projekträger Bodengebundene Verkehrstechnologien Am Grauen Stein 51105 Köln 29. April 2023	

18. abstract

The project SET Level addresses simulation-based development and testing of automated vehicles in urban environments. Advanced numerical simulation methods and concepts for innovative mechanisms for model coupling deliver important contributions for simulation-based test and release procedures. The formal description and quantification of requirements for the simulation are particularly challenging.

Principal achievements of SET Level are the solid architecture of the simulation environment and development of credible simulation processes which allows a simulation of automated driving functions satisfying the current standards regarding reliability and safety. The so-called credible modelling process constitutes a comprehensive method for creating models for vehicle components and functions to be integrated in the simulation environment. The proposed simulation architecture allows the project partners to build up a simulation platform within their (company-) specific environment which meets the jointly acquired specifications and allows for an integration of the SET Level achievements.

Opel has seized many of the SET Level results, e. g. the build-up of a co-simulation platform capable to test and validate automated driving functions in combination with intelligent traffic participants driven by individual traffic agent models.

Development and production of automated vehicles requires close collaboration with TIER-1 suppliers – in particular with regard to environmental sensing. Therefore, jointly developed specifications and interfaces are supposed to quickly pay off and ease the collaboration between car manufacturer and suppliers.

General information on the project and the consortium are available at the SET Level Homepage: <https://setlevel.de/>

More detailed project results which were also presented at the SET Level final event in Munich can be found at <https://setlevel.de/neuigkeiten/abschlussevent-praesentationen-und-videoaufzeichnungen>

19. keywords

Automated driving, urban space, automated driving function, test, validation, verification

20. publisher
n/a

21. price
n/a

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN n/a	2. type of document (e.g. report, publication) Report
3. title SET Level – Simulation-based Development and Testing of Automated Driving	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Stefan Berger Nico Weber Karl-Michael Hahn Dirk Frerichs	5. end of project October 2022 6. publication date n/a 7. form of publication Document
8. performing organization(s) (name, address)	9. originator's report no. n/a 10. reference no. 19S19004S 11. no. of pages 42
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 23 14. no. of tables 4 15. no. of figures 24
16. supplementary notes n/a	
17. presented at (title, place, date) TÜV Rheinland Consulting GmbH Forschungsmanagement Projektträger Bodengebundene Verkehrstechnologien Am Grauen Stein 51105 Köln 29. April 2023	

18. abstract

The project SET Level addresses simulation-based development and testing of automated vehicles in urban environments. Advanced numerical simulation methods and concepts for innovative mechanisms for model coupling deliver important contributions for simulation-based test and release procedures. The formal description and quantification of requirements for the simulation are particularly challenging.

Principal achievements of SET Level are the solid architecture of the simulation environment and development of credible simulation processes which allows a simulation of automated driving functions satisfying the current standards regarding reliability and safety. The so-called credible modelling process constitutes a comprehensive method for creating models for vehicle components and functions to be integrated in the simulation environment. The proposed simulation architecture allows the project partners to build up a simulation platform within their (company-) specific environment which meets the jointly acquired specifications and allows for an integration of the SET Level achievements.

Opel has seized many of the SET Level results, e. g. the build-up of a co-simulation platform capable to test and validate automated driving functions in combination with intelligent traffic participants driven by individual traffic agent models.

Development and production of automated vehicles requires close collaboration with TIER-1 suppliers – in particular with regard to environmental sensing. Therefore, jointly developed specifications and interfaces are supposed to quickly pay off and ease the collaboration between car manufacturer and suppliers.

General information on the project and the consortium are available at the SET Level Homepage: <https://setlevel.de/>

More detailed project results which were also presented at the SET Level final event in Munich can be found at <https://setlevel.de/neuigkeiten/abschlussevent-praesentationen-und-videoaufzeichnungen>

19. keywords

Automated driving, urban space, automated driving function, test, validation, verification

20. publisher
n/a

21. price
n/a