

Schlussbericht der ADC GmbH zum F&E-Verbundvorhaben

Virtuelle Testumgebung für automatisierte und vernetzte Fahrfunktionen im Einbauzustand

Förderkennzeichen 16ME0167

Laufzeit des Vorhabens

01.10.2020 – 31.12.2023

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 16ME0167

Autoren

Dr.-Ing. Hasan Iqbal
ORCID 0000-0003-2718-8229

Dr.-Ing. Thomas Breitenberger

M.Sc. Sandro Reith

M.Sc. Sreehari Buddappagari
ORCID 0000-0003-0736-9874

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzbeschreibung des Vorhabens	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn	7
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
2	Ausführliche Darstellung	11
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	11
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	21
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit	22
2.4	Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplanes	22
2.5	Während des Projektdurchführung bekannt gewordene Fortschritte bei an- deren Stellen	24
2.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	24
3	Anhang	24
3.1	Literaturverzeichnis	24

1 Kurzbeschreibung des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Globale Zielstellung.

Das Projekt VIVALDI beschäftigt sich unter dem Dach der deutsch-japanischen Forschungsk Kooperation VIVID mit vielversprechenden Methoden zur Absicherung automatisierter und vernetzter Fahrfunktionen. Die zentrale Forschungsfrage lautet: „Wie sicher ist sicher genug?“, d.h. welche Anstrengungen sind notwendig, um die Absicherung eines automatisierten Fahrzeugs als sicher einzustufen. Das Projekt folgt hier den Empfehlungen der UNECE WP29 welche besagt: “Automated/autonomous vehicle systems, under their automated mode (ODD/OD), shall not cause any traffic accidents resulting in injury or death that are reasonably foreseeable and preventable” [1].



Ein Schwerpunkt des Forschungsprogramms liegt auf einer effizienten und standardisierbaren Anwendung virtueller Testumgebungen, die von reinen software-basierten Ansätzen (software-in-the-loop, SiL) bis zur drahtlosen Einbindung von Sensorsystemen im Einbauzustand in virtueller Testumgebung (over-the-air, vehicle-in-the-loop, OTA/ViL) reichen und transparente Schnittstellen aufweisen.

Mit der inhaltlichen und methodischen Ausrichtung wird eine hervorragende Passfähigkeit sowie komplementäre Ergänzung der Ansätze im japanischen Vorhaben DIVP erreicht, darüber hinaus ergänzt der VIVALDI-Ansatz die auf höherer Systemebene angesiedelten Forschungsvorhaben der PEGASUS-Projektfamilie [2] und erzielt somit einen nachhaltigen Mehrwert.

Nachdem die ADC Automotive Distance Control Systems GmbH (im Text nachfolgend „ADC“ genannt) im Vorgängerprojekt SafeMove [3] mit dem Kooperationspartner TUIL (TU Ilmenau) eine Absicherungskette für einfache Szenarien mittels „over-the-air, vehicle-in-the-loop, OTA/ViL“-Technik am Forschungs-zentrum VISTA in Ilmenau realisiert hat – welche derzeit in kleinerem Maßstab (weniger Performance, weniger Fläche) auch industriell von ADC verwertet wird – fokussiert sich der Beitrag von ADC in VIVALDI auf die Realisierung einer SiL (Software-in-the-Loop) Absicherungskette für komplexe Szenarien.

Ansätze zur Ergebnisverwertung.

Angesichts des hohen Neuheitswertes ergeben sich vielfältige Verwertungsansätze. Aus industrieller Sicht steht der Nachweis im Vordergrund, dass sich reale Fahrtests zur Absicherung der Sensorik und der Fahrfunktionen vom assistierten bis hin zum vollautomatischen Fahren teilweise durch Virtuelle Validierung in einen Rechencluster ersetzen lassen. Dies ist aus folgenden Gründen notwendig:

Kosten	Die Absicherung von Fahrfunktionen mittels realer Fahrtests erzeugt hohe Kosten
Umwelt	Die Absicherung von Fahrfunktionen mittels realer Fahrtests belastet die Umwelt in signifikantem Maße
Time-to-market	Die Absicherung von Fahrfunktionen mittels realer Fahrtests erfordert sehr viel Zeit. Im Falle von Software-Updates müssen Fahrtests teilweise wiederholt werden
Software Qualität	Software-Updates erfordern eine schnelle Re-Simulierbarkeit der kompletten Wirkkette im Rahmen der „Continuous Integration“. Dies ist mit Fahrtests nur bedingt möglich, da sich nicht alle Daten in Rohform („raw data“) im Fahrtest aufzeichnen lassen.

In technisch-wissenschaftlicher Hinsicht wird die Klärung der Frage, wie realitätsnah Tests in virtueller Umgebung werden können, und wo die Schnittstelle zwischen rein SW basierten Verfahren, OTA/ViL bzw. realen Fahrtests liegt, wesentliche Auswirkungen auf weitere Entwicklungsstufen der V&V-Testkette haben. In technologischer Hinsicht werden Modelle für Szenarien, Sensoren und Umgebungen erarbeitet, der Eingang in leistungsfähige SW-Werkzeuge finden werden können und damit einer Standardisierung und internationalen Verbreitung des Testansatzes Vorschub leisten. In wirtschaftlicher Hinsicht birgt das Vorhaben aufgrund seiner unmittelbaren Anwendungsrelevanz hohes Potential für die industrielle Verwertung in einem dem Schlüsselbereiche der deutschen Automobilindustrie – dem assistierten und automatisierten Fahren.

Die Absicherung eines solchen System erfolgt klassischerweise durch intensive Fahrtests. Da für die Validierung eines L2 / EuroNCAP Systems bereits mehr als 1 Million Fahrkilometer erforderlich sind, potenziert sich dieser Aufwand für L3, L4 und L5 Systeme. Eine vollständige Validierung eines solches Systems nur auf der Straße und auf dem Testgelände ist aufgrund finanzieller, personeller und umwelpolitischer Aspekte (Spritverbrauch → CO2 Ausstoß) nicht realisierbar. Dazu kommt, dass Feldtests immer im öffentlichen Verkehr stattfinden und für die Aufzeichnung von Daten die Datenschutzverordnung der EU-Kommission einzuhalten ist (Anonymisierung von personenrelevanten Daten) dass Feldtests immer im öffentlichen Verkehr stattfinden und für die Aufzeichnung von Daten die Datenschutzverordnung der EU Kommission einzuhalten ist (Anonymisierung von personenrelevanten Daten).

Des Weiteren können bestimmte Szenarien (e.g. sehr gefährliche Szenarien oder Szenarien bei extremen Wetterbedingungen) nur sehr bedingt im Feldtest getestet werden.

Der virtuellen Validierung auf einem Rechner kommt daher eine Schlüsselrolle zu, da hier Szenarien im Computer erzeugt werden und die genaue Position der Umgebung „per se“ bekannt ist – dies bedeutet, dass der aufwändige Labelprozess entfällt diese Szenarien sehr reproduzierbar wiederholt werden können – 24 Std. / 7 Tage pro Woche die Szenarien automatisch variiert werden können (Geschwindigkeiten, Wetterbedingun-gen, usw.) im Falle eines SiL (Software-in-the-Loop) Simulationen schneller als in Echtzeit durchgeführt werden. Eine Absicherung bzw. Resimulation nach einer Konfigurationsänderung des automatisierten Software Stacks kann also schneller als in Echtzeit erfolgen.

Trotz der wegweisenden Ergebnisse der PEGASUS Projektfamilie [2] wurde bisher allerdings noch kein zufriedenstellender quantitativer und qualitativer Nachweis erbracht, dass die virtuelle Validierung eines kombinierten Systems aus Radar, Kamera und Lidar mit den Ergebnissen eines Feldtests im Rahmen von zu definierenden Kennzahlen (KPIs = Key Performance Indicators) übereinstimmt. Dies trifft vor allem für den Radar Sensor zu, da die Ausbreitungsphysik der Mikrowellenstrahlung im Frequenzband von 76-81 GHz sehr komplex ist.

Das Ziel des Projekts VIVID mit den Teilprojekten VIVALDI (Deutschland) und DVIPS (Japan) ist daher der quantitative und qualitative Nachweis, dass eine Absicherung eines automatisierten Fahrzeugs in signifikanten Teilen „virtuell“ im Computer-Cluster erfolgen kann.

VIVID baut dabei auf die intensive Vorarbeit von Projekten wie

- PEGASUS Projektfamilie [2],
- ELEVATE Fördervorhaben [4] mit SafeMove als Schlüsselprojekt [3] auf, in welchen die ADC wertvolle Beiträge erarbeitet hat.

ADC legt Wert darauf, dass bestimmte Ergebnisse des Förderprojekts explizit zwischen den beteiligten Firmen geteilt werden und damit eine Art „Standard“ bilden. Dies betrifft vor allem die Physik der Wellenausbreitung von Radar und Kamera & Laser-Licht inklusive von Streu- und Reflektionseigenschaften von Verkehrsteilnehmern (Fußgänger, Fahrradfahrer, Motorrad, PKW, LKW, usw.) und Infrastruktur wie Straße, Leitplanken, Straßenrand, Verkehrsschilder, usw. und die Verfahren und Methodiken zur virtuellen Validierung. Diese Ergebnisse sollen explizit innerhalb des Projekts geteilt werden und – nach Projektabschluss – in der Branche disseminiert werden.

Andere Arbeitsergebnisse, die konkret mit Produkten in Verbindung stehen, sind dagegen als strikt vertraulich anzusehen und werden im Projekt nur als „black box“ ausgetauscht (z.B. als kompiliertes SW Binary). Dies ist vor allem auch deshalb notwendig, weil in VIVID eine einzigartige Kombination aus Wettbewerbern (Zulieferern und Automobilherstellern) vertreten ist. Die Details hierzu wurden im Konsortialvertrag geregelt.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das VIVALDI Projekt ist Teil der VIVID Projektfamilie, welche aus dem deutsch-japanischen Zwillingsprojekten VIVALDI und DIVP bestehen. Das DIVP Projekt ist ein der Automotive Leuchtturmprojekte der japanischen Regierung (Cabinet Office).

Die Zusammenarbeit in der VIVALDI Familie besteht seit 2017 und untersucht gemeinsam in einer Forschungskoooperation Themen rund um das automatisierte Fahren. Das BMBF und das Cabinet Office aus Japan haben in einer gemeinsamen Pressekonferenz [5] vom 02.Juni.2020 angekündigt ihre Zusammenarbeit weiter auszubauen und zu intensivieren. So heißt es in der Pressemitteilung wörtlich:

„Das automatisierte Fahren hat großes Potenzial, durch die Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Big Data im Zuge des digitalen Wandels, neue gesellschaftliche Werte zu schaffen. Die internationale Zusammenarbeit trägt wesentlich zur Umsetzung des automatisierten Fahrens mithilfe dieser Technologien bei.“

Dies unterstreicht nicht nur das technische Interesse eine Zukunftstechnologie mit gebündelten Kräften weiterzutreiben, sondern auch die nationale und gesellschaftliche Verbundenheit von Deutschland und Japan gemeinsam einen Weg zu beschreiten.

Das VIVALDI baut hier technisch und inhaltlich nahtlos auf dem Projekt SafeMove [3] auf, welches die Grundsteine für das VIVALDI Projekt gelegt hat. SafeMove war ein Teil des ELEVATE Förderclusters [4] und wurde im Jahr 2020 erfolgreich abgeschlossen und die Erkenntnisse und neu gewonnen Fragestellungen wurden mit in das VIVLAID Projekt übernommen. Weitere wichtige Vorgänger und waren das Pegasus [2] und SET Level Projekt [6].

Dies und die rasante Entwicklung beim automatisierten Fahren verdeutlicht klar die Notwendigkeit der umfänglichen Validierung der Sensoren bis hin zum vollautomatisierten Fahrzeug mittels virtueller Methoden und Absicherungsstrategien.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten in VIVALDI folgten der im Antrag festgelegten und in den Zwischenberichten fortgeschriebenen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung. Das Verbundvorhaben wurde in der im Antrag definierten und im Laufe des Vorhabens fortgeschriebenen Arbeitspaketstruktur bearbeitet. Die ADC hat ihre Beiträge schwerpunktmäßig in den Arbeitspaketen AP3300 (Verifikation) und AP3500 (Validation) geleistet.

Im Arbeitspaket (AP) 3300 wurde das Ray Tracing-basierte Radar Model von Continental weiter ausgebaut und die Toolkette so entwickelt, dass sie modular und flexibel ist. Dadurch ist es möglich Daten an verschiedenen Schnittstellen auszuliefern oder alternative in die Toolkette einzuspeisen. Zusätzlich basieren die Schnittstellen zum großen Teil auf standardisierten Schnittstellen wie OpenDRIVE oder OSI (Open Simulation Interface). Dies ermöglicht die Verarbeitung von Daten anderer Partnern durch die Verarbeitungskette Continentals und umgekehrt. Dabei bleiben IP relevanter Teile vom Sensor-Model verborgen.

Die ausgewählten Szenarien (im AP2000 und AP3000) wurden simuliert und die virtuellen Daten mit den realen Daten verglichen. Um diesen Vergleich sinnvoll durchzuführen, war es notwendig geeignete Metriken zu identifizieren, weiterzuentwickeln und abschließend zu implementieren. Dies ist notwendig, weil ein Vergleich von Radardaten eine komplexe mehrdeutige Fragestellung ist, besonders wenn man die frühen Datenschnittstellen (FFT1, RADI) untersucht. Dazu werden geeignete Methoden zur Differenzierung von statistischen Merkmalen der beiden Datensätzen benötigt.

Nachdem die Szenarien simuliert und die Daten generiert worden sind, müsste die Güte von den simulierten Daten geschätzt werden. In anderen Worten, die Datensätze müssten verglichen und validiert werden. Das war der Fokus von dem AP3500, Validierung. Diese Aufgabe wurde in sowohl studentische Arbeiten als auch in der Kooperation mit Projektpartnern in VIVALDI erforscht. Die Erkenntnisse von der Arbeit wurden bereits im Projekt mittels Vorträgen und Workshops vermittelt. Sie sind auch Teil dieses Abschlussbericht und werden später bei den Arbeitspaketen im Detail beschrieben.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

Neuere Radar-, Kamera- und Lidar-Modellierungen konzentrieren sich auf die genaue spezifische Eigenschaft jedes Sensors unter realen Bedingungen, insbesondere unter Worst-Case-Bedingungen [7] bis [8]. Allzweckmodelle für Reichweiten-, Doppler-, Sichtfeld-, Antennen- und Scandiagramme sind vorherrschend. Weitere Forschungsarbeiten waren und sind erforderlich, um eine zuverlässige Validierung virtueller Sensormodelle für die Wahrnehmung voranzutreiben. Die Sensorleistung und die technischen Spezifikationen entwickeln sich mit jeder Generation rasant weiter, wobei deren Modelle geistiges Eigentum der Sensorhersteller bleiben, von denen einige VIVALDI-Partner (z.B. BF, Continental) sind. Fragen des geistigen Eigentums wurden im Rahmen des VIVALDI Projektes durch sorgfältige Auswahl und Anpassung geeigneter Datenformate sowie Software- und Hardwareschnittstellen berücksichtigt werden.

Nach aktuellem Stand der Technik werden z.B. EuroNCAP Systeme und assistierte Fahrfunktionen mittels Fahrttests auf dem Prüfgelände und im realen Straßenverkehr mittels eines FOT (Field-Operation-Test) validiert. Für ein typisches L2 System werden laut Stand der Technik ca. 1 mio. km an Daten aufgezeichnet.

Tabelle 1: Szenarien im Field-Operation-Test

	Szenario 1 1 mio km	Szenario 2 10 mio km	Szenario 3 1 Mrd. km	
Komplette Absicherungsfahrt	1.000.000	10.000.000	1.000.000.000	km
Fahrleistung pro Fahrzeug	200.000	200.000	200.000	km
Anzahl der notwendigen Testfahrzeuge	5	50	5.000	Fahrzeuge
Fahrzeugkosten (100.000€ pro Fahrzeug)	500.000	5.000.000	500.000.000	€
Durchschnittsgeschwindigkeit	50	50	50	km/h
Anzahl der notwendigen Teststunden	20.000	200.000	20.000.000	h
Anzahl der Mannjahre für Tester (1700h/Jahr)	12	118	11.765	Mannjahre
Kosten (Fahrzeug + Fahrer) (100 € / h)	2.000.000	20.000.000	2.000.000.000	€
Spritverbrauch in Tonnen (Diesel, 7l / 100km)	70	700	70.000	Tonnen Diesel
CO2 Emission (2,6 kg CO2 pro Liter Diesel)	182	1.820	182.000	Tonnen CO2
Data storage (1 GB / km)	1.000	10.000	1.000.000	TeraByte
Data storage (25 € / TB)	25.000	250.000	25.000.000	€
Data storage - Power consumption per year (1W/TB)	8.760	87.600	8.760.000	kWh
Data storage - Electricity cost per year (0,30€/kWh)	2.628	26.280	2.628.000	€
Data storage - CO2 per year (0,30 kg/kWh electricity)	3	26	2.628	Tonnen CO2

Gemäß Tabelle 1 (Szenario 1) führt dies

- zu einem signifikanten finanziellen Aufwand
- zu einem großen Zeitverzug im Terminplan
- und zu einer beträchtlichen CO2 Belastung durch den Diesel-Verbrauch der Fahrzeug-Flotte und der Energiekosten des Data Storage Center.

In geringerem Umfang werden auch heute bereits HiL (Hardware-in-the-Loop) und SiL (Software-in-the-Loop) verfahren eingesetzt.

Die Ergebnisse des SafeMove Projekts [3], an denen ADC maßgeblich beteiligt war, werden derzeit in der Absicherungskette der Continental Radar/Kamera Produkte in die Verwertung überführt. Sie ergeben in gewissen Bereichen bereits eine deutliche Verbesserung der Absicherungsperformance verglichen mit dem heutigen **HiL** Serienstand.

Im Bereich des Teil-automatisierten und automatisierten Fahrens liegt die erforderliche Absicherungs-Fahrleistung für ein solches System im Bereich zwischen Szenario 2 (10 Mio. km) und Szenario 3 (1 Mrd. km) aus Tabelle 1. Szenario 3 ist zusätzlich nochmals in Abbildung 1 visualisiert.

Virtual Verification @ Test & Validation

Why?

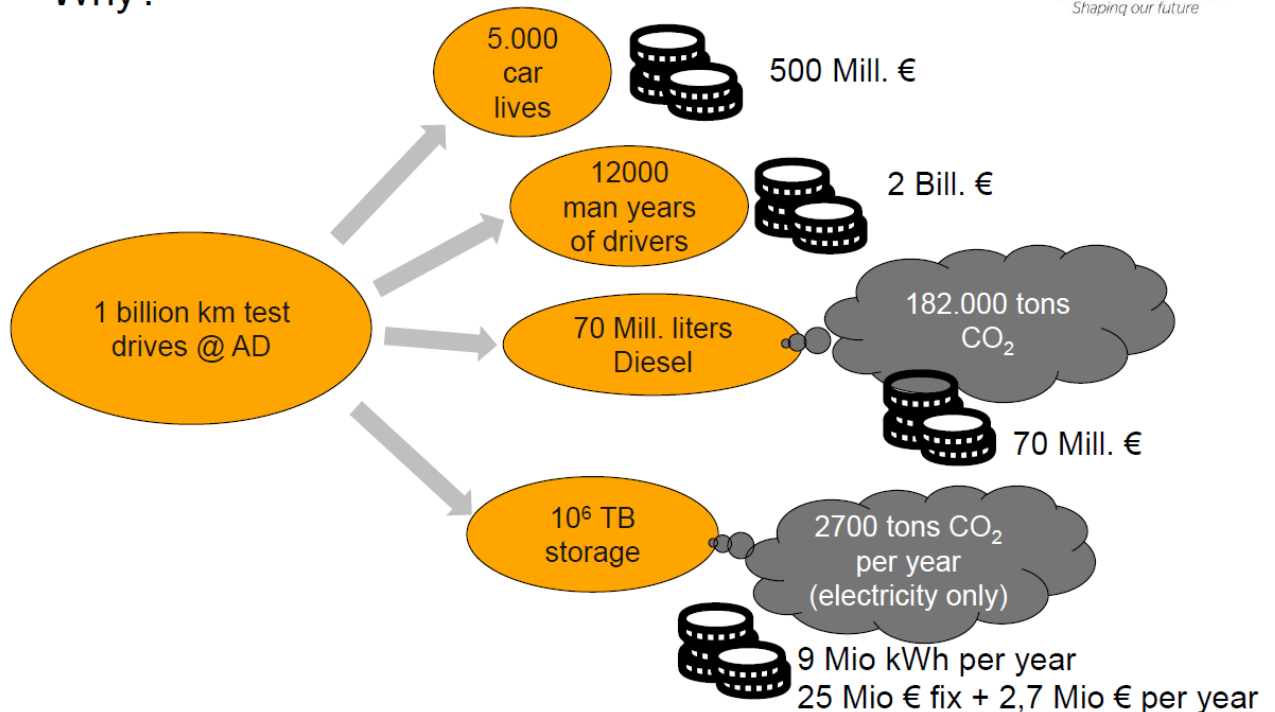


Abbildung 1: Absicherung eines automatisierten Fahrzeugs mittels Fahrtests (Annahme: 1 Milliarde km) ohne den Einsatz virtueller Absicherung durch HiL und SiL

Es ist völlig offensichtlich, dass ein solches System nicht rein über Fahrtests abgesichert werden kann (Kosten, Zeitfaktor (time-to-market), Umweltschutz, Aufwand für das „Labeln“ der Daten), sondern dies nur mit einer Kombination von realer Absicherung im Fahrtest (Field-Operation-Test) und **virtueller Validierung** mittels **HiL** und **SiL** möglich ist.

Für eine virtuelle Validierung ist

1. eine **exakte Darstellung der statischen Umgebung** (Straße, Bordstein, Leitplanke, Verkehrsschilder, Häuser, Brücken, usw.) notwendig
2. und eine **exakte Modellierung des Verkehrsflusses inklusive einer genauen Vermessung der Reflexionseigenschaften von „Traffic Participants“ – getrennt für Radar, Lidar und Kamera**

Frei verfügbare Karten (siehe Abbildung 2) erfüllen diese Anforderungen bei weitem nicht.

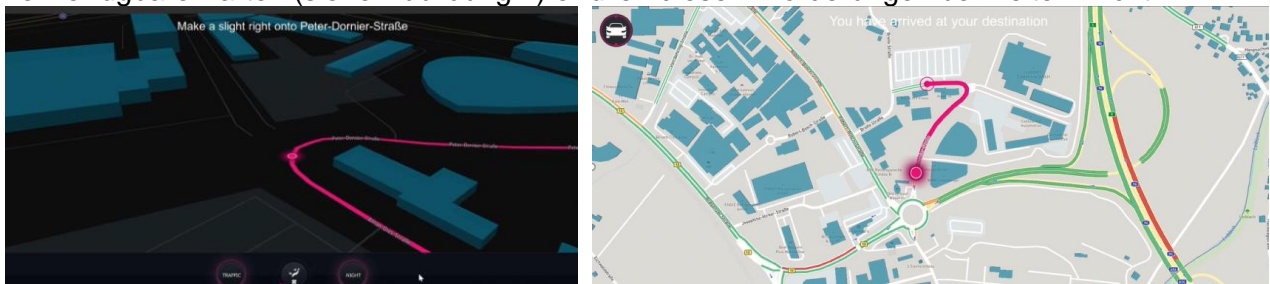


Abbildung 2: Darstellung in heute frei verfügbaren Formaten wie Open-Streetmap © am Beispiel des Standorts der ADC in Lindau/Bodensee

Aus diesem Grund ist die Verwendung einer **exakt vermessenen Umgebung** erforderlich (**digital twin**), wie sie in ausgewählten Städten (z.B. Kempten/Allgäu, Wiesbaden, Frankfurt, Lindau oder Berlin) bereits zur Verfügung steht.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Folgende Partner aus dem Konsortium des VIVALDI Verbundprojektes waren beteiligt:

- **AVL**

Der Partner hat große Erfahrungen im Bereich Prüfstandstechnik, virtuelles Testen von ADAS/AD Systemen und Erzeugung von digitalen Zwillingen.

Hier bestand der Austausch und die Zusammenarbeit darin, die von AVL bereitgestellten digitalen Szenarien der EuroNCAP Tests in das von Continental verwendete Simulationsframework zu integrieren und anzuwenden.

- **IPG**

Der Partner ist Innovator im Bereich der virtuellen Szenengenerierung und hat ebenfalls Erfahrung im Bereich des virtuellen Testens von ADAS/AD Systemen und der Erzeugung von virtuellen Szenarien.

Zu Beginn der Projektlaufzeit fanden mehrere Abstimmungsrunden statt, die das Ziel verfolgten, das von Continental verwendete Sensor Front End Model in die von IPG bereitgestellte Simulationsumgebung zu integrieren, da die von eben diesem Modell benötigten, im OSI-Standard [9] definierten Schnittstellen nicht als zugänglich machbar befunden wurden. Aus diesem Grund hat sich Continental dazu entschieden, die Simulationsumgebung von AAI [10] zu verwenden, da hier alle nötigen Schnittstellen zugänglich gemacht wurden.

- **TUD**

Eine der führenden Universitäten im Bereich des automatisierten Fahrens und Mitglied im BMBF-Leuchtturmprojekt „unicar-agil“, welches als Zielstellung die disruptive modulare Architektur für agile automatisierte Fahrzeugkonzepte verfolgt [11].

Die Universität Darmstadt war in allen Arbeitspaketen vertreten. Neben der Szenario-Definition und Messkampagne hat sich vor allem die Zusammenarbeit im Bereich der Validierung von synthetischen Daten und dem Erweitern und Anpassen von Standards, welche eine Voraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit zukünftiger autonomer Fahrzeuge und Robotik-Anwendungen sind, als nachhaltig, zeitgemäß und zielstrebig erwiesen. Dabei wurden Information und Daten von TUD und Continental ausgetauscht um akademische, sowie industrielle Fragestellungen zu beantworten.

Unter dieser Zusammenarbeit wurde der OSI-Standard [9] um die RayTracingView erweitert, welche einen Austausch zwischen den verschiedenen Interessengruppen auf der RayTracing-Schnittstelle ermöglicht.

Gemeinsame Messkampagne zur Datenerhebung von Radarsensoren wurden durchgeführt. Somit konnten unabhängige Ergebnisse anhand der offenen Radar-Schnittstellen erzielt werden und gleichzeitig Auswertungen auf den tieferen Ebenen der Sensorik durch Continental vorgenommen werden.

Als weiteres Ergebnis dieser Zusammenarbeit ist eine von der TUD Darmstadt eine Metrik zur Vergleichbarkeit von Messpunkten auf Radardaten angepasst wurden und zu einem späteren Projektzeitpunkt hat Continental der TUD Messungen der neusten Radargeneration bereitgestellt [12].

- **MB**

Mercedes-Benz ist einer der innovativsten Automobilhersteller und definiert die Zukunft der Mobilität schon heute.

In den verschiedenen Arbeitspaketen hat man zusammengearbeitet. Die Zusammenarbeit hat sich jedoch auf der Informationsebene im Radar fokussiert, hier wurden die verschiedenen Konzepte, Messungen und Ergebnisse gemeinschaftlich diskutiert und ausgewertet. Die Messungen und Auswertungen haben das Projekt positiv beeinflusst und wichtige Erkenntnisse gebracht und sich auch mit Messungen und Untersuchungen der Projektpartner gedeckt [13].

- **TUIL**

ADC von Continental hat TUIL mit den Radarsensoren unterstützt. Sie haben ihre neuesten Sensoren der sechsten Generation (Gen6) ARS für Forschungs- und Ausbildungszwecke zur Verfügung gestellt. TUIL hat Messungen mit dem Radarsensor in VISTA, bei CARRISMA und auch auf Automobilprüfständen durchgeführt. TUIL hat das Lastenheft und die Beschaffung der 3-D-Karten koordiniert. Conti und TUIL haben zusammen die erhaltenen Karten in Simulator-Toolchains ausgewertet und erste Ergebnisse erstellt.

Im Jahr 2021 haben Mitarbeiter von TUIL und Continental gemeinsam einen Workshop zur virtuellen Validierung von Kfz-Sensoren während der European Microwave Week in London organisiert.

Durch die Kooperation mit Continental hat ein Mitarbeiter der TUIL FG HMT und Doktorand von Prof. Matthias Hein eine Festanstellung und Karrieremöglichkeit bei Continental am Standort Bangalore gefunden. Auch nach dem Eintritt, April 2022, wurden die Zusammenarbeit und Aufgaben innerhalb des VIVALDI Projektes weiterverfolgt und es wurde ein nahtloser Übergang von allein Parteien gewährleistet.

- **UASK**

Continental hat gemeinsam mit der Hochschule Kempten (University of Applied Sciences Kempten) am 14.06.2021, Szenarien gemessen, die im AP2100 ausgewählt wurden. Diese Szenarien wurden ausgewählt, um von ihnen digitale Zwillinge zu erzeugen und die Messfahrt virtuell nachzubilden, mit dem Ziel, die simulativ erzeugten Daten mit den Messdaten aus realen Messfahrten zu vergleichen. Dadurch soll es gelingen, die Sensor Modelle kontinuierlich und iterativ zu verbessern, sodass die Simulationsergebnisse die realen Messungen mit steigender Übereinstimmung abbilden. Mit diesem Vorgang ist es möglich, die realen Testfahrten teilweise mit simulierten Testfahrten zu ersetzen und dadurch Kosten (sowohl ökonomisch als auch ökologisch) gering zu halten.

- **KIT**

Das Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik des Karlsruher Institut für Technologie ist ein etablierter Partner im Bereich Hochfrequenz- und Radar-Forschung.

Das KIT hat seine Jahrlange Expertise eingebracht und hat mit Messplätzen, Sensorik und Tatkraft dabei unterstützt die Materialeigenschaften für den mm-Wellenlänge Bereich für virtuelle Anwendungen zu erschließen.

Continental hat mit dem KIT zusammen ein passendes Format für die Materialbeschreibung gesucht. Dabei ist man auf das damals noch von BMW gehostete OpenMATERIAL gekommen und hat zusammen mit BMW das Format für Radar weiter ausgearbeitet und einen industriell nutzbaren ersten Standard geschaffen für Radarsensorhersteller. OpenMATERIAL wurde mittlerweile an ASAM übergeben und wird hier der OpenX Familie angebunden [14].

Continental und KIT haben Proben im Quasi-optischen Prüfstand im W Band vermessen und die Ergebnisse gegenseitig ausgetauscht. Anschließend wurde die errechneten

elektromagnetischen Eigenschaften der Simulation mit Radarmodell übergeben und verifiziert.

Die auf dem OpenMATERIAL Format basierenden Daten wurden abschließend auf einem öffentlichen Repository bereitgestellt [15].

2 Ausführliche Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Gliederung der folgenden Abschnitte folgt den Arbeitsinhalten der ADC GmbH.

AP2100 Fahrscenarien

Innerhalb des Arbeitspaketes AP2100 wurde sich auf fünf Fahrscenarien aus dem EuroNCAP Testkatalog geeinigt, da das Ziel dieses Arbeitspaketes war, möglichst einfache Testscenarien mit möglichst wenig Fehlereinflüssen zu erarbeiten. Es wurden folgende Testfälle ausgewählt:

- Car-to-Car Front turn-across-path (CCFtap)
- Car-to-Pedestrian Nearside Child (CPNC)
- Car-to-Pedestrian Longitudinal Adult (CPLA)
- Car-to-Pedestrian Turning Adult (CPTA)
- Car-to-Bicyclist Nearside Adult Obstructed (CBNAO)

Dabei wurden die Szenarien durch Projektpartner wie unter Abschnitt 1.5 beschrieben, aufbereitet, sodass das gleiche Fahrscenario in den verschiedenen zur Anwendung gekommenen Simulationstools untereinander vergleichbar sind und keine Abweichungen aufweisen. Lediglich für das beim KIT angewendete Simulationstool standen für alle fünf Testfälle die nötigen szenenbeschreibenden Dateien zur Verfügung. Für das bei Continental verwendete Simulationstool VTD waren dies lediglich Dateien für die Testfälle CPLA und CPNC. Für diese wurden die Simulationen durchgeführt und mit realen Testfahrt Daten verglichen.

Die Daten für die ausgewählten EuroNCAP Szenarien wurden am 14.06.2021 mit realen Sensoren (Radar, Kamera und Lidar) eingefahren. Das Fahrzeug und die Sensoren, die für die Erfassung der EuroNCAP Szenarien eingesetzt wurden, sind in Abbildung 7 dargestellt.

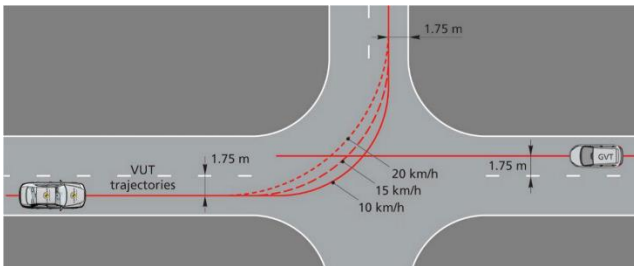


Abbildung 3: Car-to-Car Front turn-across-path (CCFtap)

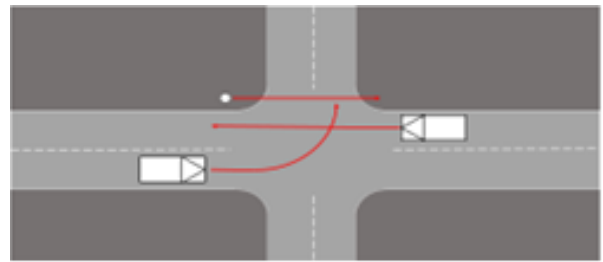
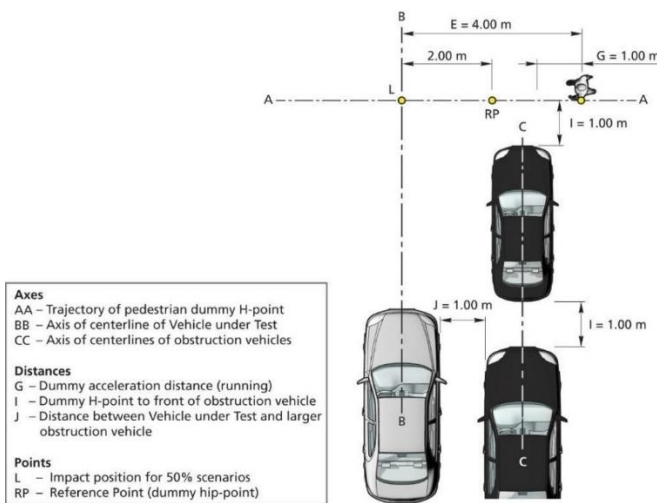


Abbildung 4: Car-to-Car Front turn-across-path with additional TP/VRU

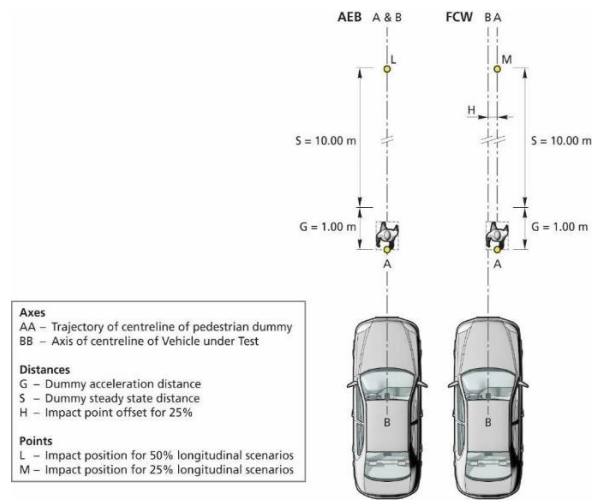


Axes
 AA – Trajectory of pedestrian dummy H-point
 BB – Axis of centerline of Vehicle under Test
 CC – Axis of centerlines of obstruction vehicles

Distances
 G – Dummy acceleration distance (running)
 I – Dummy H-point to front of obstruction vehicle
 J – Distance between Vehicle under Test and larger obstruction vehicle

Points
 L – Impact position for 50% scenarios
 RP – Reference Point (dummy hip-point)

Abbildung 5: Car-to-Pedestrian Nearside Child (CPNC)



Axes
 AA – Trajectory of centreline of pedestrian dummy
 BB – Axis of centreline of Vehicle under Test

Distances
 G – Dummy acceleration distance
 S – Dummy steady state distance
 H – Impact point offset for 25%

Points
 L – Impact position for 50% longitudinal scenarios
 M – Impact position for 25% longitudinal scenarios

Abbildung 6: Car-to-Pedestrian Longitudinal Adult (CPLA)



Abbildung 7: Fahrzeug und Sensoren die für die Messfahrt eingesetzt wurden

AP2200 Sensoren

Seitens ADC wurde entschieden, sowohl den ARS620 als auch den ARS540 in dem Projekt einzusetzen. Diese sind beides „long range radars“, die normalerweise vorne hinter dem Stoßfänger eingebaut werden und in Fahrtrichtung „schauen“. Die Daten des ARS540 konnten mit den Projektpartnern geteilt werden, da dieser Sensor bereits in Serie ist. Die Daten des ARS620 wurden innerhalb von Continental zur Entwicklung des Sensors Modells verwendet, da dieser Sensor zu Projektstart noch nicht die Serienreife erreicht hatte.

Zusätzlich wurden zwei Exemplare der ARS430 an die Technische Universität Ilmenau (TUIL) geliefert, damit die TUIL mithilfe dieser Sensoren den „Radar Cross-Section“ (RCS) verschiedener automotivtypischer Objekte (z.B. ein Auto eines japanischen und eines deutschen Herstellers, reale Fußgänger, Dummy-Fußgänger und Straßenschilder) vermessen konnte.

AP2300 SiL/HiL Verifikation

Die Raytracing-basierten Sensormodelle, im speziellen die Radar Modelle werden zur weiteren Verifikation in die Software-in-the-Loop (SiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL) Open Loop (keine Rückführung in das Simulationstool) eingespeist. Hierzu wird die gleiche Sensor Software und Hardware verwendet, um zu überprüfen, ob die Serienapplikationen auch ein realistisches Ergebnis mit synthetischen Daten liefern können und ob dieses ein Ähnlichkeitsmaß von realen Daten erfüllt, um so die konsumierenden Algorithmen und oder Komponenten mit sinnvollen Daten zu speisen. In Abbildung 13 kann die Verarbeitungskette gesehen werden. Im Falle von Continental kommt der Steuergeräte Code von der Serie ab **FFT1**, diese Schnittstelle kann sich je nach Software und Hardware anpassen.

2.1.1 AP3000 Kritische Real-Szenarien

AP3100 Szenarien

Im Rahmen der Sensor Messungen wurde festgestellt, dass auf Grund der verschiedenen Setups, verwendeten Applikationen und Entwicklungsstände der einzelnen Projektpartner für die Verifikation auf einfache und aussagefähige Messungen zurückgegriffen werden muss. Im Falle von Continental waren das die typischen Messkammermessungen, die in Lindau und im virtuellen Raum durchgeführt wurden. Zusätzlich wurden die im AP2100 vorgestellten Fahrscenarien gerechnet, doch hat sich hier die Verifikation und der Austausch außerhalb der eigenen Umgebung als momentan nicht umsetzbar erwiesen, welches zum Anstoß der genannten Standarderweiterung und neuen Standards geführt hat.

Die folgenden Szenarien wurden für die Verifikation umgesetzt:

- Messkammer Messung Azimuth $az=-90:1:90$ Grad
- Messkammer Messung Elevation $ele=-30:1:30$ Grad
- Zufahrt Retroreflektor Teststrecke $R=250\dots 0$ m
- CPNC
- CPLA
- Virtueller FoT (Field Operation Test) A96 und A71

AP3200 Sensor

Der hier verwendete Sensor wurde nach Rücksprache mit allen Projektpartnern durch den aktuellen modernsten Continental Sensor der 6ten Generation ersetzt und durchgeführt. Die Daten wurden auf der dafür festgelegten Ebene ausgetauscht und intern bereitstehenden Daten-Schnittstellen wurden für die Verifikation berücksichtigt jedoch nicht bereitgestellt. Im Folgenden werden sich hier auf das Radar Data Image (RDI) / Radar Data Interface (RADI) bezogen. Die Sensor Details sind im Folgenden aufgelistet [16]

<https://www.continental-automotive.com/de/komponenten/radars/long-range-radars/advanced-radar-sensor-ars620.html>

ARS620 Kennzahlen

- Abmessung 70 x 55 x 20 mm
- Reichweite 280 m
- Sichtfeld +/- 60 °
- Versorgungsspannung 12 V
- Aktualisierungsrate 50 ms
- Betriebsfrequenz 76...77 GHz
- Temperaturbereich -40...+85 °C

AP3300 Verification

Messkammer

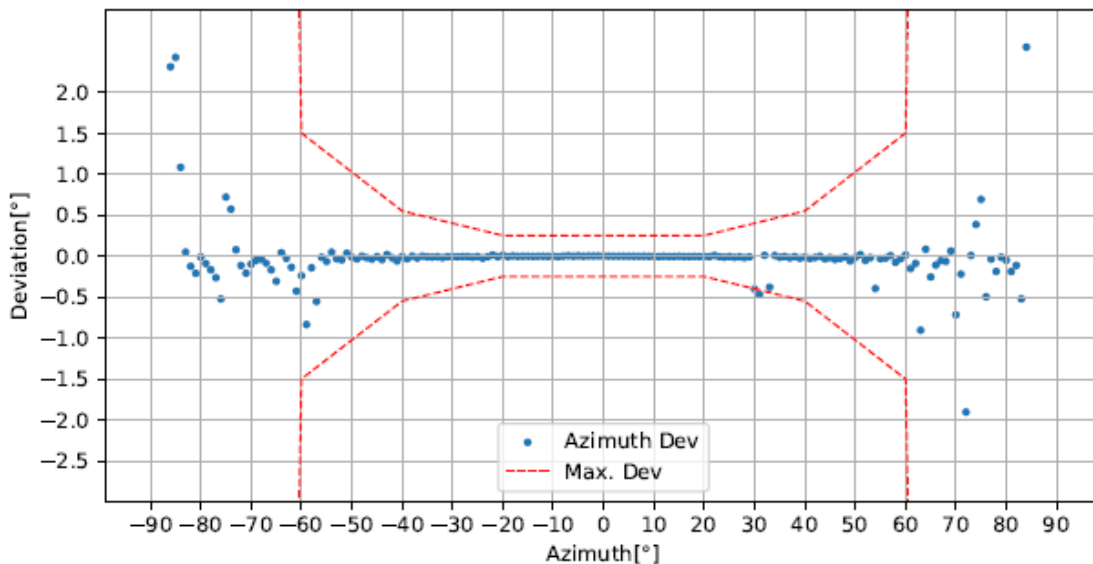
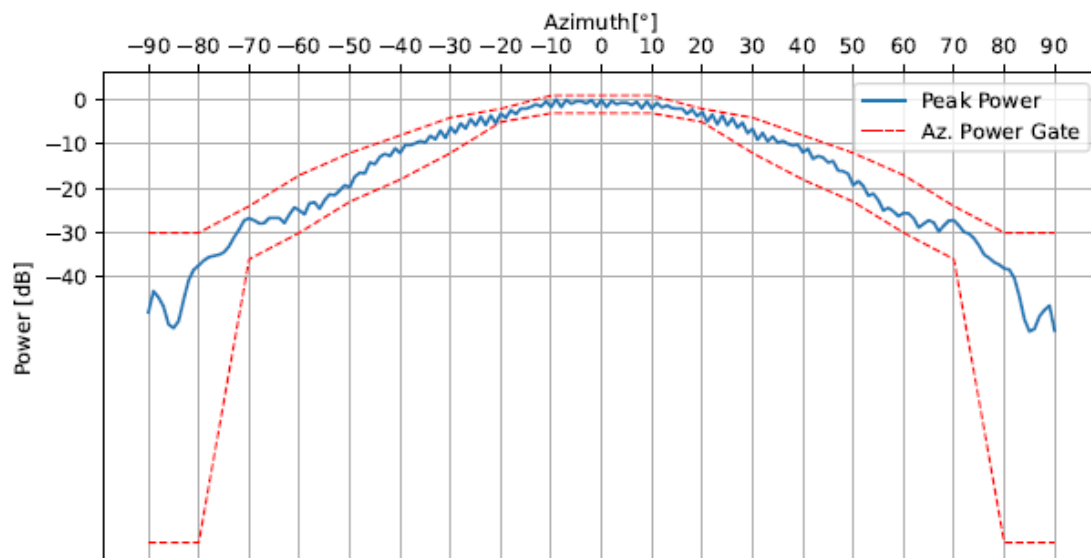
Für die Radar und allgemeine Sensorentwicklung sind Messkammermessungen schon immer einer der wichtigsten Grundbausteine, um das Systemverhalten zu verstehen und um Fehler zu identifizieren. In der virtuellen Sensor Absicherung ist es ebenfalls ein maßgebendes Instrument, um die Güte des bereitgestellten Modells zu ermitteln da Störeinflüsse bei der Messung sehr stark reduziert werden. Hierbei werden die Systemabweichungen des Modells vom vermessenen Gerät unter gleichen Bedingungen analysiert und geben wichtige Kennzahlen über das virtuelle Pendant. In Abbildung 8 ist ein Evaluierungsbericht für solch ein Sensormodel dargestellt. Hier wird das Verhalten abgebildet und die aus den KPIs abgeleiteten zulässigen Bereiche.

Test Case: Azimuth Sweep

Description: Trihedral corner @ 10 m; $-90^\circ \leftrightarrow 90^\circ$ Az; $\delta = 1^\circ$
Evaluation Criteria: AzPowerGate_LSL < Peak power > AzPowerGate_USL
Pass Criteria: KPI > 90.0

Status: **PASS**
KPI: **100.0**

Mean Az. Dev. [°]	0.26
Mean Nr. Targets[#]	16.72
Mean Noise [dB]	-64.42



© Continental AG

Abbildung 8: Ausschnitt eines Sensor Model Evaluierungsbericht, angelegt an einen original Radar Sensor. In dem Ausschnitt wird eine Messung über den Azimuthwinkel gezeigt. Im oberen Bild wird die Empfangene Energie [blau] über dem Winkel dargestellt und das erlaubt Band [rot]. Im unteren Teil wird der Winkelfehler [blau] über den Winkel dargestellt und ebenfalls die erlaubten Abweichungen [rot].

Testfeld

Nach der Freigabe der Messkammermessungen konnten einfache Tests und Fahrversuche äquivalent zur realen Fahrzeugerprobung auf einer Teststrecke mit vordefinierten Szenarien durchgeführt werden. Dies kann ein interner Testkatalog, Kundenforderung oder EuroNCAP Test sein. Da hier die Domäne und das Umfeld gut beschrieben und bekannt sind, haben sich die virtuellen Erprobungen auf der Teststrecke als besonders effizient erwiesen. Weitere Details werden im Abschnitt Validierung dargestellt.

Virtueller Feldtest A96 und A71

Wie in der Realität werden nach Freigabe in der Messkammer und auf dem Testfeld die Sensoren und das System unter realen Bedingungen im Straßenverkehr getestet. Für solche Tests wurden im Rahmen des VIVALDI und VIVID Projekts hierzu die Autobahn A96 von Memmingen nach Lindau und Teile der A71 in Richtung Ilmenau vermessen.

Anschließend wurden alltagsübliche Fahr Szenarien durchgeführt. Da aber noch eine exakte Erfassung des realen Verkehrs und Übertragung in den Virtuellen Raum nicht möglich ist und auch nicht jeder Effekt des Umfelds bekannt ist, hat sich eine Validierung als äußerst schwer erwiesen. Deswegen musste auf eine Verifikation zurückgegriffen werden, um zu überprüfen, ob die erhaltenen Informationen den einer realen Testfahrt entsprechen. In Abbildung 9 wird hier exemplarisch ein Ausschnitt aus einer Testfahrt auf der A96 in Richtung Lindau gezeigt.

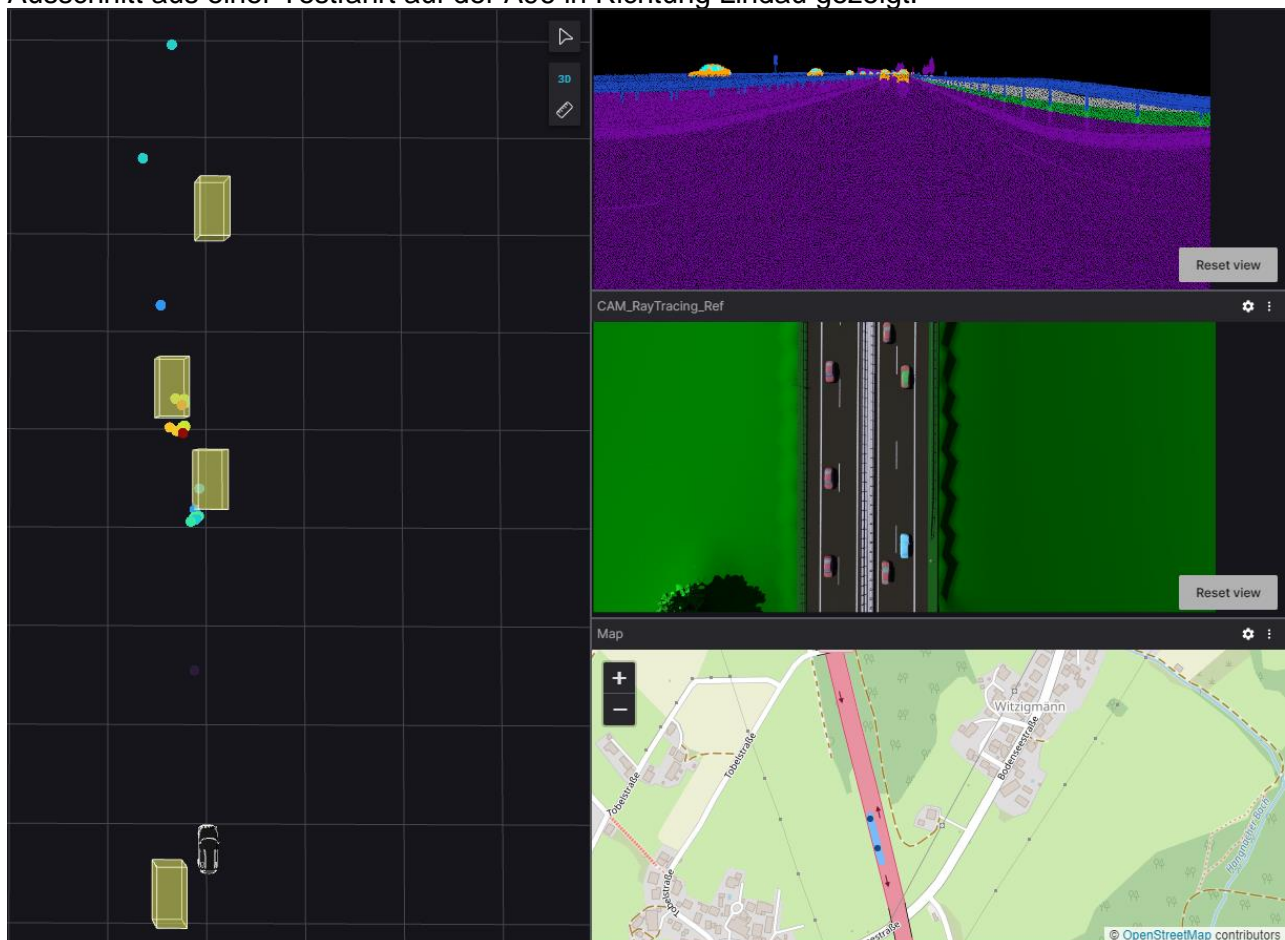


Abbildung 9: Abbildung der virtuellen Autobahnfahrt auf der A96 Richtung Lindau. (Links) Das Ego-Fahrzeug mit dem Front Radar und die berechneten Detektionen die von der Signalverarbeitung geliefert werden anhand des Raytracing-basierten Sensormodells. Die Boxen sind die aus der Simulation extrahierten Ground Truth Objekte (GT). (Rechts Oben) Die Falschfarbendarstellung des Raytracing anhand der zugewiesenen Materialien aus Sicht des Sensors. (Rechts Mitte) Eine

vereinfachte Darstellung der Fahrsituation aus der Vogelperspektive. Das Ego-Fahrzeug ist in blau eingefärbt. (Rechts Unten) Darstellung der GPS Position in der aktuellen Momentaufnahme.

Grünbrücke

Die Grünbrücke wird hier stellvertretend für weitere ausgetauschte und vermessene Karten verwendet, um auf eine bis dahin unbekannte Herausforderung hinzuweisen. Die Grünbrücke ist eine Wildbrücke auf der A71 und Basis für eine typische Autobahnszene, die für viele Automobilehersteller und -zulieferer von Interesse ist. Es handelt sich hierbei nicht um eine besonders Schwierige Situation oder ungewöhnliche Infrastruktur sondern um eine typisch anzutreffende.

Jedoch wurde festgestellt, dass es selbst bei der Beschreibung des Lastenheftes gewisse Herausforderungen gibt, da bis zu diesem Stand die virtuelle Welt nur im optischen Spektrum operiert und für anderen Technologien wie Radar, Lidar und Ultraschall keine Beschreibung vorliegt, auf die man sich berufen kann. So konnten die bestellten Kartenmaterialien für den optischen Bereich verwendet werden, waren jedoch für den Radar nicht verwendbar oder nur manuell modifiziert einsetzbar. Eine der daraus entstanden Standardisierungsprojekte ist OpenMATERIAL, welches sich nahtlos in die OpenX-Familie einreicht und hier ein einheitliches Format definiert.

AP3500 Validation

Die Daten für die ausgewählten EuroNCAP Szenarien wurden am 14.06.2021 mit realen Sensoren (Radar, Kamera und Lidar) eingefahren. Diese EuroNCAP Szenarien wurden mittels Raytracing nachsimuliert und mit den Realdaten verglichen. Hier wurde sehr schnell ersichtlich, dass man eine geeignete Metrik benötigt, um die simulierten Daten mit den realen sinnvoll zu vergleichen.

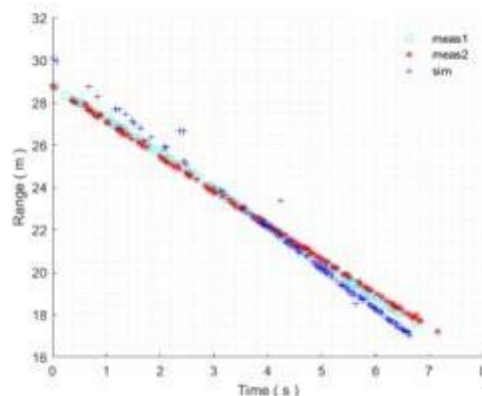


Abbildung 10: Darstellung aller Detektionen von zwei Messungen und einer Simulation für das CPLA Szenario

Diese Problematik kann anhand Abbildung 10 gesehen werden, in der die Detektionen von zwei Messungen und einer Simulation über der Zeit aufgetragen sind. Hier ist eine sehr gute Korrelation zwischen den Messungen zu sehen. Allerdings ist die Korrelation zwischen Messungen und Simulation niedrig. Dies kann durch Messeigenschaften erklärt werden. Zum Beispiel fährt der Fahrer in den Messungen nicht genau 30 km/h, sondern variiert um die 30 km/h. Der menschliche Fahrer kann das Auto nicht mit einer hohen Reproduzierbarkeit genau in einer geraden Linie fahren, sondern weicht mit geringen Unterschieden mäanderförmig davon ab.

Daher ist es wichtig, eine Metrik zu haben, mit der es möglich ist, den Vergleich trotz der Unterschiede erfolgreich durchführen zu können.

Aus Recherche hat sich herausgestellt, dass die Mahalanobis-Entfernung eine geeignete Metrik für den Vergleich darstellen kann, weil bei der Berechnung der Entfernung, die Korrelation zwischen die Detektion und den Schwerpunkt des Clusters der Detektionen betrachtet wird.

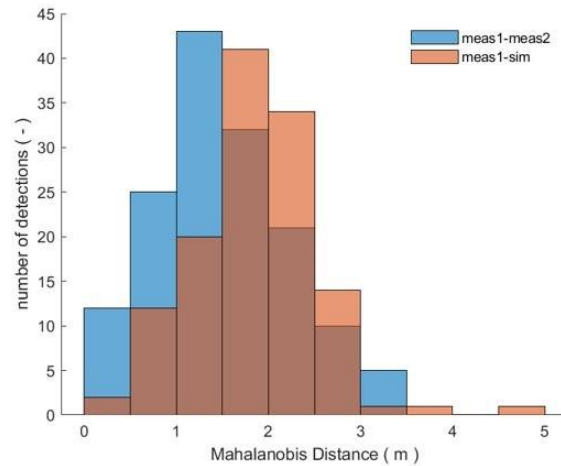


Abbildung 11: Mahalanobis-Entfernung dargestellt für zwei reale Messungen und eine Simulation; CPLA Szenario

Abbildung 11 zeigt die Verteilung der Mahalanobis-Entfernung zwischen zwei Messungen und zwischen einer Messung und einer Simulation für das CPLA-Szenario. Der Verlauf beider Entfernungen zeigt eine gute Übereinstimmung, wobei eine Verschiebung von ca. 0.5 m zwischen dem Verlauf der Messung gegenüber der Simulation sichtbar ist. Dies ist darin begründet, dass die exakte Abbildung der Realität aus der Messung nicht in der Simulation erreicht werden kann. Zum Beispiel dringen in der Realität die hinlaufenden Wellen in das Abgasrohr ein, werden mehrmals im Inneren reflektiert und dann zurückgesandt. Dieses Phänomen ist neben Transparenzeffekten und Unterschieden in der Materialzuweisung in der Simulation nicht abbildbar gewesen, weswegen die Entfernungen von den Detektionen zwischen Messung und Simulation leicht verschoben sein können.

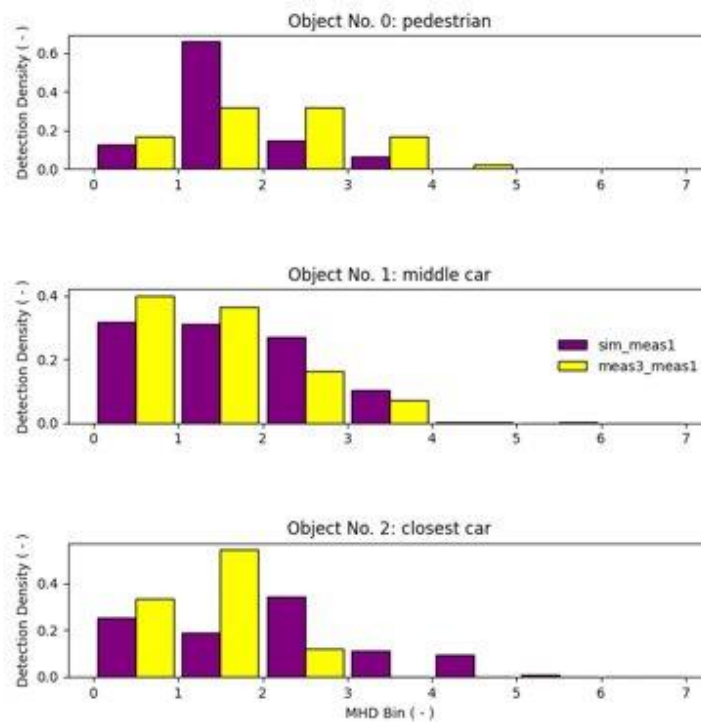


Abbildung 12: Mahalanobis-Entfernung dargestellt für zwei reale Messungen und eine Simulation für drei verschiedene Objekte; CPNC-Szenario

In Abbildung 12 sind die Ergebnisse der Detektionsverteilung der Simulation und der realen Messung für alle drei Objekte aus dem CPNC-Szenario dargestellt, wobei die untere Abbildung das dem Egofahrzeug nächste parkende Fahrzeug, die mittlere Abbildung das zweit entfernteste parkende Fahrzeug und die obere Abbildung den Fußgänger die Verteilung der Mahalanobis-Entfernung darstellt. Alle in der Simulation verwendeten 3D Modelle haben dieselbe Materialzuweisung und bestehen aus einem guten Reflektor für die Radarwelle, wie z.B. Metall. Damit ist der Fußgänger in der Simulation ein sehr guter Reflektor im Gegensatz zu dem realen EuroNCAP Testdummy, der nur schlecht die Radarwellen reflektiert. Hinzu kommt, dass es in der Simulation aufgrund des Fehlens eines realistischen Bewegungsmodells keine bewegten Teile wie Arme oder Beine gibt und der Fußgänger somit eine sehr schmale Silhouette von der Seite her aufweist. Dadurch ist die schmale Verteilung der Detektionen in der Simulation gegenüber den Ergebnissen der Messung zu erklären. In der Messung bewegen sich Arme und Beine des Testdummy und somit ist die Streuung der Detektionen ebenfalls größer.

Die Detektionsverteilung im mittleren Teil der Abbildung zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und real gemessenen Daten. Hier liegt der Grund darin, dass sowohl der Sensor in der realen Messung die Außenseite des parkenden Fahrzeugs detektieren kann als auch der Raytracer dort Reflektionspunkte erzeugt, die zu Detektionen führen. Die übrigen Teile des Fahrzeugs sind sowohl in der Simulation als auch in der Messung durch das davor parkende Fahrzeug verdeckt. Dieser Sachverhalt, dass nur die Außenseite, der in der Simulation verwendeten 3D Modelle zu Reflektionen und damit zu Radardetektionen führt, ist ebenfalls für die Abweichung zwischen den Detektionsverteilungen der Simulation und der Messung auf dem ersten parkenden Fahrzeug verantwortlich. In der Simulation werden die Detektion auch für dieses Fahrzeug auf der Außenseite gebildet, während in der realen Messung die Detektionen auf der Fahrzeugunterseite und im Fahrzeuginneren gebildet werden und damit gegenüber ersterem eine größere Streuung aufweisen. Die Mahalanobis-Entfernung ist gegen kleine Abweichungen und Verteilungsunterschiede sensibel. Aus den gezeigten Ergebnissen lässt sich ableiten, dass es zum einen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen und den realen Messungen gibt und dass zum anderen die Mahalanobis-Entfernung ein vielversprechender, guter erster Ansatz ist, um die

Detektionsverteilungen zwischen real gemessenen und durch Simulation erzeugten Daten zu vergleichen, bzw. deren Ähnlichkeit zu bewerten.

2.1.2 AP4000 Kooperation innerhalb von VIVALDI und VIVID

Im Rahmen von VIVID gab es regelmäßigen Kontakt mit den DIVP-Partnern und auch Teilnahme bei den jeweiligen Projektveranstaltungen förderte den Austausch. Im Jahr 2020 und 2021 war es aufgrund der Corona-Pandemie nicht möglich, die Veranstaltungen im Präsenz stattfinden zu lassen, daher wurden alle Vorträge und Diskussionen online gehalten. Bei den sip-ADUS Veranstaltungen im Jahr 2020 und 2021 hat Continental über den Vorgängerprojekt (SafeMove [3]) und VIVID berichtet.

Im Jahr 2022 und 2023 ist es dem Konsortium gelungen, das Projekttreffen in Präsenz in Japan zu organisieren. Im Jahr 2022 fand das Treffen in Kyoto statt und im Jahr 2023 teilweise in Tokio und Tsukuba. Bei den beiden Präsenz Veranstaltungen haben Vertreter von Continental teilgenommen und einen Rückblick auf das vergangene Jahr gegeben. Hier wurden auch die aktuellen Ergebnisse von den Arbeitspaketen vorgestellt.

Im AP4000 war vorgesehen, einen regelmäßigen Austausch zwischen den Projektkonsortien, VIVALDI und DIVP zu spezifischen Themen zu etablieren. Dafür wurden „Joint Teams“ (JTs) für die jeweiligen Themen gebildet. Continental hat die Führungsrolle in dem JT 3.3 Radar erhalten und im Rahmen dieses JT wurden regelmäßige online Termine mit den japanischen Partnern veranstaltet.

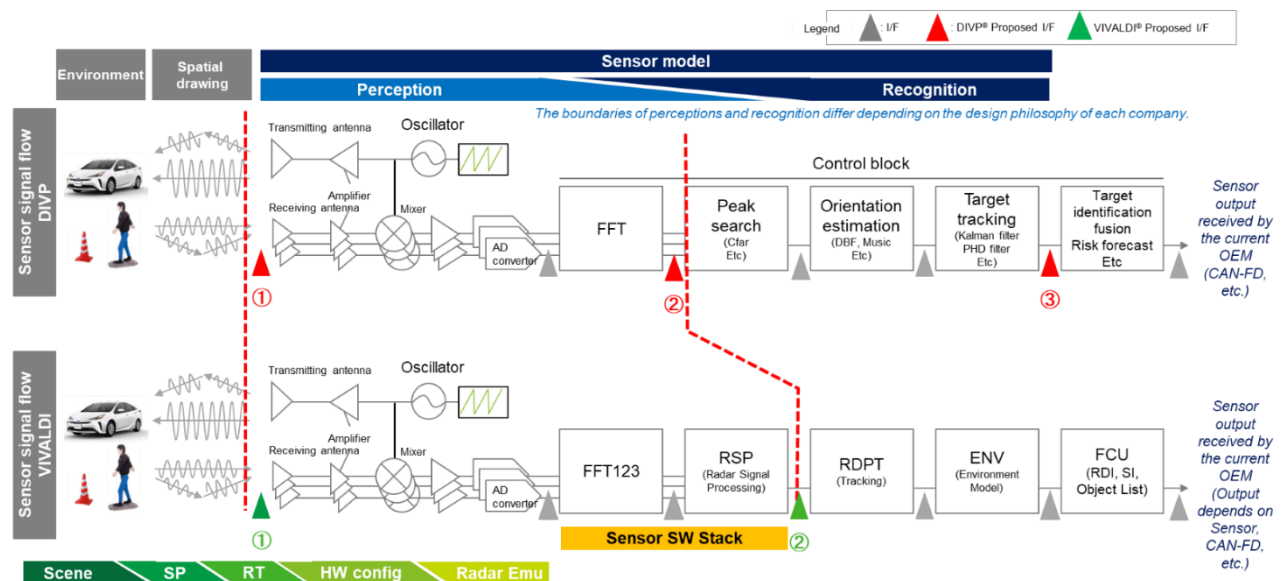


Abbildung 13: Architektur des Sensor-Modells von DIVP und VIVALDI

Abbildung 13 zeigt einen Vergleich von der Architektur des Sensor-Modells, die von DIVP und VIVALDI verwendet werden. Beide Modelle sind modular aufgebaut, damit den Zugang zu der Ausgabe eines Moduls inzwischen möglich ist. Zum Beispiel kann man die Radar-Detektionen am grünen Punkt 2 nehmen und analysieren, anstatt es durch die Kette weiterverarbeiten zu lassen. Auch das Gegenteil ist möglich: die Raytracingdaten eines fremd simulierten Szenarios kann auch in die Kette eingespeist werden. Zum Beispiel am grünen Punkt 1.

Um die Daten zwischen DIVP und VIVALDI erfolgreich auszutauschen, wurde von ASAM OpenSimulationInterface (OSI) Gebrauch gemacht. Mittels OSI war es möglich Daten an den

grünen Schnittstellen 1 und 2 auszutauschen. Das OSI war am Anfang vom Projekt aber nicht dafür geeignet, Radar-Raytracingdaten bereit zu stellen, da es als Schnittstelle zum Radarsensormodell angedacht war. Deswegen wurde ein Vorschlag eingebracht, OSI zu erweitern, indem eine neue generische Raytracing-Schnittstelle, die sowohl für Radar als auch für Lidar geeignet ist, definiert wurde. Diese neue Schnittstelle beinhaltet die Koordinaten der ersten und letzten Hitpoints des Strahls, der Jonesvektor, die Pfadlänge und die Dopplerverschiebung. Alle diese Parameter hatten ursprünglich gefehlt und die Erweiterung wurde mittlerweile, mit enger Kooperation von Technische Universität Darmstadt, an ASAM als ein „Change Request“ eingereicht und auch von ASAM angenommen. Das erweiterte OSI ist nun auch veröffentlicht und verfügbar auf GitHub [17].

Zusätzlich hat Continental die Verantwortlichkeit erhalten, die Messergebnisse im vom OpenMATERIAL vorgeschlagenen Format zu veröffentlichen. Das Ziel hier ist eine Datenbank von Materialparameter zu erstellen und öffentlich zugänglich machen, damit alle sowohl in der Industrie als auch in der Akademie die gleichen Parameter für die Simulationen verwenden können. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich zwischen den verschiedenen Simulationsergebnissen der individuellen Einrichtungen.

Hierzu wurden in Kooperation mit dem KIT zahlreiche Materialalien, die üblich bei Automotive-Anwendungen sind, vermessen, um diese zu charakterisieren und in der Datenbank zu hinterlegen. Hier wurden unter anderem Materialalien wie verschiedene Kunststoffe, Aluminium und jeweils ein Muster Asphalt von einer Autobahn und einer normalen Stadtstraße verwendet.

Nachdem die Materialien vermessen und ihre Parameter extrahiert waren, wurden die Parameter in einem gITF-Format gespeichert und öffentlich zugänglich auf GitHub [18] abgelegt. Das gITF-Format wird von der Khronos Gruppe verwaltet und darf ohne Lizenzgebühren verwendet werden.

Das Thema OpenMATERIAL wird gerade von ASAM angenommen und wird gerade in einem Projekt [19] weiterentwickelt, damit künftig auch OpenMATERIAL analog zu OSI ein Standard wird.

2.1.3 AP5000 Wissenstransfer und Forschungsdatenmanagement

Im Jahr 2021 hat Continental gemeinsam mit der TU Ilmenau einen Workshop bei dem European Microwave Week 2021 (EuMW 2021), die in London im April 2022 stattgefunden hat, organisiert. Hier wurden Sprecher von zehn verschiedenen Firmen und vier Hochschulen/Universitäten eingeladen, um zusammen elf Vorträge zu halten. Die Vorträge haben das breite Thema „Virtuelle Validierung der Automotive Sensoren wie Kameras, Radar- und Lidarsensoren“ und die „Validierung“ als Kernthemen gehabt.

Continental hat bei der Halbzeitveranstaltung im Juni 2022, die von der TU Ilmenau in Berlin organisiert wurde, einen Vortrag mit dem Titel, „Open Loop Validation with Artificial Raw Data Injection – a VIVALDI Status Report“ gehalten.

Auch bei der EuMW 2023 in Berlin wurde einen Workshop von der Hochschule Kempten organisiert, bei dem Continental ebenfalls einen Vortrag mit dem Titel „Virtual Validation of Continental Radar Sensors - Gen 6 Virtual Testing, Sensor Models and VIVALDI“ gehalten hat.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die ursprünglich in der Gesamtvorkalkulation geplanten Selbstkosten des Vorhabens wurden in Summe in der Gesamtnachkalkulation mit Kosten i.H.v. 812.691,28 EUR überschritten. Entsprechend wird der Bundesanteil i.H.v. 262.798,00 EUR vollständig ausgeschöpft. In der Nachkalkulation sind die Positionen 0837 Personalkosten und 0838 Reisekosten herauszustellen.

Im Projektverlauf wurden mehrere nationale und internationale Reisen angetreten. Aus internen buchhalterischen Gründen konnten lediglich 3.337,83 EUR geltend gemacht werden. Somit ist das Budget i.H.v. 9.400,00 EUR dieser Kostenposition nicht vollständig ausgeschöpft.

Die Gesamtvorkalkulation der Personalkosten wurden mit tatsächlichen Kosten i.H.v 711.595,23 EUR um 163.999,23 EUR überschritten. Gründe hierfür ist einerseits ein Mehrbedarf an geleisteten Ingenieursstunden sowie zusätzlich durchschnittlich höhere Stundensätze der beteiligten Kostenstellen.

Im Rahmen des Projekts VIVID wurden Projektstunden über dem erwarteten Budget gebucht. Grund dafür waren unvorhersehbare Aufwände, die bei Projektstart unbekannt und nicht planbar waren. Maßgeblich verantwortlich dafür waren die beim fortschreitenden Projektstand aufgedeckten Lücken in der Definition von Schnittstellen sowie bei der Beschreibung der Eigenschaften in der 3D-Modellierung. So ist zum Beispiel bei der Virtualisierung von sogenannten Hotspots (z.B. 25 de Abril Brücke in Lissabon) aufgefallen, dass eine Definition im optischen Spektrum möglich ist, jedoch bei einer Beschreibung in einem andern Wellenlängenbereich die Anforderungen und aber auch die Aufbereitung mit den 3D Artisten bis dato nicht definiert war.

Basis der Personalkosten in der Gesamtvorkalkulation ist ein Stundensatz i.H.v 88,23 EUR sowie eines Gemeinkostenzuschlagssatzes i.H.v. 25,55 %. Der sich daraus ergebende Stundensatz wurde im Schnitt um 22,77 EUR überschritten. Daraus ergibt sich der Mehrbedarf in der Gesamtnachkalkulation für die Kostenkategorie 0237 Personalkosten und die entsprechende Überschreitung der Vorkalkulation in dieser Kostenkategorie.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Im VIVALDI Projekt wurden Forschungsarbeiten zur Verbesserung des Radarsensor-Modells Continentals vorangetrieben. Die Zielrichtung der Arbeiten war dabei durch die Anforderungen dieser sich immer stärker herausbildenden Anwendungsfelder geprägt. Es war notwendig, nicht nur die Zuverlässigkeit der virtuell simulierten Daten zu steigern, sondern auch Nachweise über die Genauigkeit und Validierung der künstlich erzeugten Daten zu erschaffen. Um dies zu realisieren, mussten Metriken erforscht werden, die eine Aussage zu der Ähnlichkeit der virtuellen Daten zu den realen Daten geben.

Ein Ziel, das neben der Zuverlässigkeit der Daten auch immer eine entscheidende Rolle bei dem Entscheidungsprozess gespielt hat, ist die Notwendigkeit, Standards für die Simulationen in der Automobilindustrie zu verwenden.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplanes

2.4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Dieses Teilprojekt zielte eingebettet in das VIVALDI Verbundvorhaben mit seiner Ausrichtung auf die Realisierung einer kompletten virtuellen Absicherungskette für ADAS-Funktionen, welche Sicherheitsfunktion oder auch assistierte / teilautonome Fahrfunktion (AD) darstellen, mittels der SiL (Software-in-the-Loop) Methodik. Dies umfasste im Speziellen die virtuelle Modellierung der Testszenarien im PC, die Modellierung der Ausbreitungsphysik, die Anpassung von der verwendeten Raytracing Technik, die Bereitstellung eines Sensormodells, welches die komplette Radarfunktionalität abbildet und einer detaillierten Abschlussbewertung. Neben dem Forschungsvorhaben ist dieses Ziel in der Industrie auch durch zukünftige Consumer-Ratings (wie z.B. EuroNCAP) motiviert, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit als Grundlage für zukünftige gesetzliche Vorgaben für die Zulassung von Fahrzeugen genommen werden.

Für das Erreichen dieses Ziel spielte die gemeinsame Zusammenarbeit mit den weiteren

Projektpartnern und Universitäten eine bedeutende Rolle. Die so gesammelte Erfahrung und Expertise wurde hinreichend im oberen Teil dieses Abschlussberichts aber auch in den daraus entstandenen Publikationen und Vorträgen im Bereich virtueller Validierung dargestellt.

Weiter führte dieses Teilprojekt neben den anderen Teilprojekten zu einem regelmäßigen Austausch mit dem japanischen Partnerprojekt (VIVID, DIVP), was zu dem die Möglichkeit bot, gegenseitig von den Erfahrung zu lernen sowie Vorschläge für und Verbesserungen von Standards zu erarbeiten. Zusätzlich zeigte es aber auch auf, dass das Projekt eine führende Rolle auf dem gesteckten Gebiet einnimmt.

Für die ADC GmbH bietet sich wirtschaftliches Verwertungspotential durch die Erarbeitung und Sicherung von Spezialwissen, vor allem durch den großen ersten Schritt in die Richtung einer kompletten virtuellen Absicherungskette und durch die Verbesserung des Sensormodells auf Basis der in diesem Verbundvorhaben gemachten Erkenntnisse. Dies wird bei der Durchführung von zukünftigen Kundenprojekten eine Rolle spielen und kann zu weiteren Kundenaufträgen beitragen.

2.4.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Von zentraler Bedeutung für die gezeigte erfolgreiche und ertragreiche wissenschaftliche Zusammenarbeit zwischen VIVALDI und DIVP und zur Definition einer standardisierten und weltweit und industrieweit anerkannten Absicherungskette sind die Definition und Beschreibung offener Schnittstellen und Austauschformate auf den Ebenen der Szenarien, Sensoren und Umgebungen. Diese Schnittstellen wurden unter anderem in der Vergangenheit durch die Projektfamilie PEGASUS [2] definiert und werden gemeinschaftlich vom ASAM e. V., Altlaufstr. 40, D-85635 Höhenkirchen gepflegt.

Die wissenschaftlich-technischen Erfolgsaussichten sind sehr gut, da sich für das Vorhaben kompetente Partner mit für eine erfolgreiche Durchführung spezifischer und relevanter Expertise und bewährten Kooperationsstrategien zur richtigen Zeit zusammengefunden und über mehrere Jahre erfolgreich zusammengearbeitet haben, und das in einem internationalen Kontext.

Weiter sind die Strahlverteilung des verwendeten Raytracing Modells und die Annäherung an eine Wellenfront im Raum wesentlich verbessert worden, was zu einer Erhöhung der Güte des Modells beiträgt, allerdings noch weiteres Verbesserungspotential in der Zukunft beinhaltet. Dies und die Erweiterung der Validierung der virtuell erzeugten Daten, könnte durch die erneute wissenschaftliche Zusammenarbeit in einem zukünftigen Förderprojekt angegangen werden.

2.4.3 Wissenschaftliche und/oder wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die wissenschaftlich und wirtschaftlichen Anschlussfähigkeiten, die sich im Rahmen des VIVALDI Projekts ergeben haben, sind vielfältig und umfangreich. Die hier beschriebenen Umfänge übersteigen weit das Umfeld von Automotive und haben ein enormes Potential auch in anderen Bereichen der Industrie, wie zum Beispiel Robotik, Landwirtschaft, Bergbau, Industrie4.0 und vielen weiteren Bereichen einen Paradigmen Wechsel in der Entwicklung der Technologie durchzuführen. Eine Grundlage dafür ist der „digital twin“ oder auch „Zweite Realität“ die eine Abbildung der Realität der zu untersuchenden Domäne im vollen Umfang beschreibt.

Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Ergebnisse des VIVALDI Projektes und VIVID Projektes haben einen der Pfeiler der Absicherung und Entwicklung von virtuellem System gezeigt. Mit Hilfe dieser Ergebnisse sind Sensoren und umfelderfassende Technologien gut beschrieben. Jedoch hat sich auch gezeigt, dass eine genaues System Verständnis der Sensortechnologien und der

Fahrzeugarchitekturen nicht ausreichend ist, um eine reine virtuelle Entwicklung und Absicherung durchzuführen. Ein enormes wissenschaftliches Potential hat die Umfeldbeschreibung für das Zielsystem. Eine effiziente und schnelle Erstellung eines Operationsbereiches, der alle Voraussetzungen und Effekte erfüllt, um ein virtuelles System unter realistischen Bedingungen zu betreiben. Auch die Generierung und Skalierbarkeit solcher virtuellen Beschreibungen ist derzeit kosten intensiv und aufwendig und trägt ein hohes wissenschaftliches Potential. Abschließend wird eine domänenübergreifende vernetzte Gesamt-Systemarchitektur benötigt, die alle Domänen und Technologien vereint.

Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Nutzbarkeit für Industrie und Wirtschaft ist gegeben. Durch Customer Ratings wie EuroNCAP oder kommende Homologationsanforderungen werden hier einzelne Komponenten untersucht und freigegeben. Das VIVID Projekt hat dazu eine ausführliche Beschreibung der Sensoren, Szenarien und Metriken geliefert, um dies umzusetzen. Die Untersuchung spezifischer Fahrsituationen und Technologieauslegungen wird vorgenommen, da hier oft eine klinische und gut bekannte Umfeldbeschreibung ausreichend ist, um die geforderten Informationen zu erhalten.

2.5 Während des Projektdurchführung bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Dier gewonnen Ergebnisse wurden von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik beobachtet und in bekannten Standards aufgenommen.

- ISO/OSI 11010 (neu)
- ASAM OSI::RayTracingView (erweitert)
- ASAM OpenMATERIAL (neu)
- BASt Homologation (neu)
- EuroNCAP Customer Rating (erweitert)

Das VIVID Projekt hat hier einen Einflussgehabt und die Bausteine für eine Austauschbare und vernetzten „digital twin“ für Sensorsysteme geliefert. Industrieseitig wurden die Ergebnisse auch von weiteren Firmen aufgenommen um hier auf zukünftige Projekte, Customer Ratings und Regularien vorbereitet zu sein.

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

1. S. Abadpour, M. Pauli, M. Kretschmann, H. Iqbal, P. Aust and T. Zwick, "Dielectric Material Characterization of Traffic Objects in Automotive Radar Applications," *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Florence, Italy, 2023 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/10133024>)


3 Anhang

3.1 Literaturverzeichnis

- [1] „UNECE WP.29 – Introduction,“ [Online]. Available: <https://www.unece.org/trans/main/wp29/introduction.html>.
- [2] „Pegasus Projekt,“ [Online]. Available: <https://www.pegasusprojekt.de/de/>.
- [3] „SafeMove - Systemvalidierung von Fahrzeugradaren mittels drahtloser Techniken,“ [Online].

Available: <https://www.elektronikforschung.de/projekte/safemove>.

- [4] „Elektroniksysteme für das vollautomatisierte Fahren (ELEVATE),“ [Online]. Available: <https://www.elektronikforschung.de/foerderung/nationale-foerderung/elevate>.
- [5] BMBF, „Wir stärken die internationale Forschung für mehr Sicherheit im autonomen Fahren,“ *undesministerium für Bildung und Forschung, Bureau of Science, Technology and Innovation, SIP-adus*, pp. Bureau of Science, Technology and Innovation, SIP-adus, 2020.
- [6] R. Galbas et al, „Application of SET Level results in the VVMethods Project,“ 2022.
- [7] T. Dallmann und et al., „ATRIUM: A Radar Target Simulator for Complex Traffic Scenarios,“ in *ICMIM*, Munich, 2018.
- [8] „Radar test bench and DARTS,“ [Online]. Available: <https://www.dspace.com/>. [Zugriff am 4 Februar 2020].
- [9] ASAM OSI, „ASAM OSI® (Open Simulation Interface),“ [Online]. Available: <https://opensimulationinterface.github.io/osi-documentation/>. [Zugriff am 20 Februar 2024].
- [10] AAI, „Automotive Artificial Intelligence,“ [Online]. Available: <https://www.automotive-ai.com/>. [Zugriff am 20 Februar 2024].
- [11] R. van Kempen et al, „UNICARagil: Agile Development of Self-Driving Vehicles,“ in *30. Aachen Colloquium Sustainable Mobility*, Aachen, Germany, 2021.
- [12] L. Elster et al, „Making Automotive Radar Sensor Validation Measurements Comparable,“ *Applied Sciences*, 2023.
- [13] P. Aust et al, „Fingerprints of the Automotive Radar Scattering of Passenger Cars and Vans,“ *Applied Sciences*, 2023.
- [14] ASAM, „Proposal Workshop,“ [Online]. Available: <https://www.asam.net/conferences-events/detail/asam-openmaterial-proposal-workshop/>.
- [15] VIVALDI, „VIVALDI_Materials,“ 2023. [Online]. Available: https://github.com/SevdaKIT1234/VIVALDI_Materials.
- [16] I. 23150:2023-05, „Road vehicles - Data communication between sensors and data fusion unit for automated driving functions - Logical interface,“ p. 344, 2023.
- [17] ASAM, „OpenSimulationInterface,“ ASAM, 2023. [Online]. Available: https://github.com/OpenSimulationInterface/open-simulation-interface/tree/689-add_raytracerview_config. [Zugriff am 21 03 2024].
- [18] S. R. Sevda Abadpour, „VIVALDI_Materials,“ [Online]. Available: https://github.com/SevdaKIT1234/VIVALDI_Materials/tree/dev.
- [19] ASAM, „ASAM OpenMATERIAL®,“ [Online]. Available: <https://www.asam.net/project-detail/asam-openmaterial/>.
- [20] D. Wayne und et al., „RF Target & Decoy Simulator,“ *AMTA Proceedings*, pp. 489-494, 2011.
- [21] F. Rosique und et al., „A Systematic Review of Perception System and Simulators for Autono-mous Vehicles Research,“ *Sensors*, 2019.

Datum: 04.06.2024	Kurzbericht VIVID	
Zuwendungsempfänger: ADC Automotive Distance Control Systems GmbH	Förderkennzeichen: 16ME0167	
<u>Vorhabenbezeichnung:</u> Deutsch-Japanische Forschungs Kooperation im automatisierten und vernetzten Fahren: Virtuelle Validierung-VIVID	<u>Projektleiter:</u> <u>Hasan Iqbal</u>	
Laufzeit: 01.10.2020 – 31.12.2023	Berichtszeitraum: 01.10.2020 – 31.12.2023	
<p>Auf den folgenden Seiten werden die Resultate eines Arbeitspaketes von VIVALDI exemplarisch dargestellt. Einen detaillierten Überblick mit allen Informationen kann man dem offiziellen Abschlussbericht entnehmen.</p> <p>AP3300 Verification</p> <p><u>Messkammer</u></p> <p>Für die Radar und allgemeine Sensorentwicklung sind Messkammermessungen schon immer einer der wichtigsten Grundbausteine, um das Systemverhalten zu verstehen und um Fehler zu identifizieren. In der virtuellen Sensor Absicherung ist es ebenfalls ein maßgebendes Instrument, um die Güte des bereitgestellten Modells zu ermitteln da Störeinflüsse bei der Messung sehr stark reduziert werden. Hierbei werden die Systemabweichungen des Modells vom vermessenen Gerät unter gleichen Bedingungen analysiert und geben wichtige Kennzahlen über das virtuelle Pendant. In Abbildung 8 ist ein Evaluierungsbericht für solch ein Sensormodel dargestellt. Hier wird das Verhalten abgebildet und die aus den KPIs abgeleiteten zulässigen Bereiche.</p> <p><u>Testfeld</u></p> <p>Nach der Freigabe der Messkammermessungen konnten einfache Tests und Fahrversuche äquivalent zur realen Fahrzeugerprobung auf einer Teststrecke mit vordefinierten Szenarien durchgeführt werden. Dies kann ein interner Testkatalog, Kundenforderung oder EuroNCAP Test sein. Da hier die Domäne und das Umfeld gut beschrieben und bekannt sind, haben sich die virtuellen Erprobungen auf der Teststrecke als besonders effizient erwiesen. Weitere Details werden im Abschnitt Validierung dargestellt.</p>		

Berichtszeitraum:
01.01.2022 –
31.12.2022

Zwischenbericht
ADC Automotive Distance Control
Systems GmbH

Förderkennzeichen:
16ME0167



Evaluation Performance: Radar Sensor Model

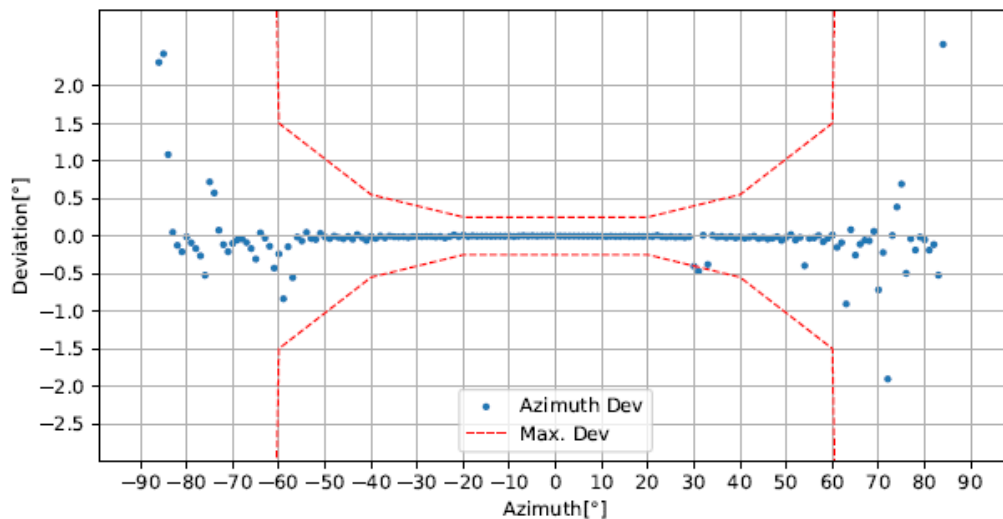
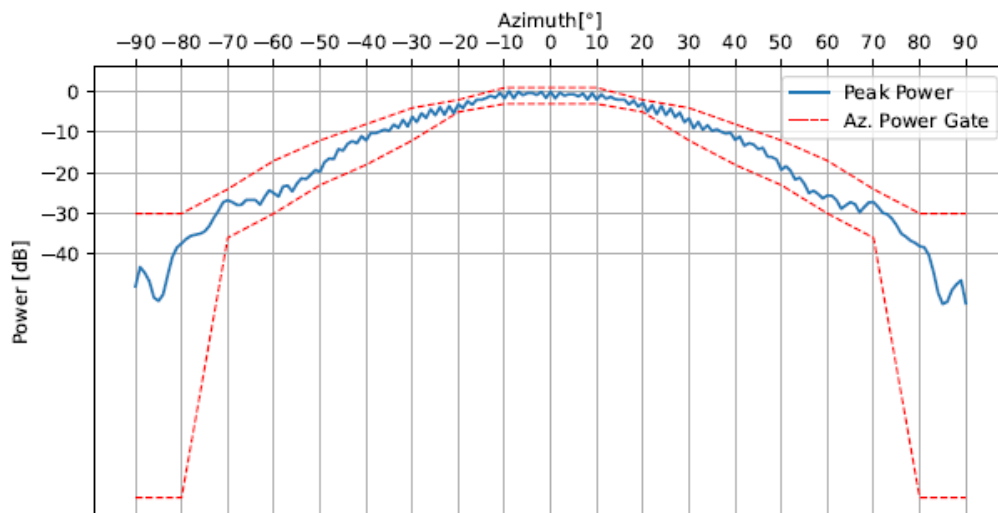
A AM

Test Case: Azimuth Sweep

Description: Trihedral corner @ 10 m; -90° <-> 90° Az; delta = 1°
Evaluation Criteria: AzPowerGate_LSL < Peak power > AzPowerGate_USL
Pass Criteria: KPI > 90.0

Status: **PASS**
KPI: **100.0**

Mean Az. Dev.[°]	0.26
Mean Nr. Targets[#]	16.72
Mean Noise [dB]	-64.42



© Continental AG

Abbildung 1: Ausschnitt eines Sensor Model Evaluierungsbericht, angelegt an einen original Radar Sensor. In dem Ausschnitt wird eine Messung über den Azimuthwinkel gezeigt. Im oberen Bild wird die Empfangene Energie [blau] über dem Winkel dargestellt und das erlaubte Band [rot]. Im unteren Teil wird der Winkelfehler [blau] über den Winkel dargestellt und ebenfalls die erlaubten Abweichungen [rot].

Berichtszeitraum:

01.01.2022 –
31.12.2022

Zwischenbericht

ADC Automotive Distance Control
Systems GmbH

Förderkennzeichen:

16ME0167

Virtueller Feldtest A96 und A71

Wie in der Realität werden nach Freigabe in der Messkammer und auf dem Testfeld die Sensoren und das System unter realen Bedingungen im Straßenverkehr getestet. Für solche Tests wurden im Rahmen des VIVALDI und VIVID Projekts hierzu die Autobahn A96 von Memmingen nach Lindau und Teile der A71 in Richtung Ilmenau vermessen.

Anschließend wurden alltagsübliche Fahrscenarien durchgeführt. Da aber noch eine exakte Erfassung des realen Verkehrs und Übertragung in den Virtuellen Raum nicht möglich ist und auch nicht jeder Effekt des Umfelds bekannt ist, hat sich eine Validierung als äußerst schwer erwiesen. Deswegen musste auf eine Verifikation zurückgegriffen werden, um zu überprüfen, ob die erhaltenen Informationen den einer realen Testfahrt entsprechen. In Abbildung wird hier exemplarisch ein Ausschnitt aus einer Testfahrt auf der A96 in Richtung Lindau gezeigt.

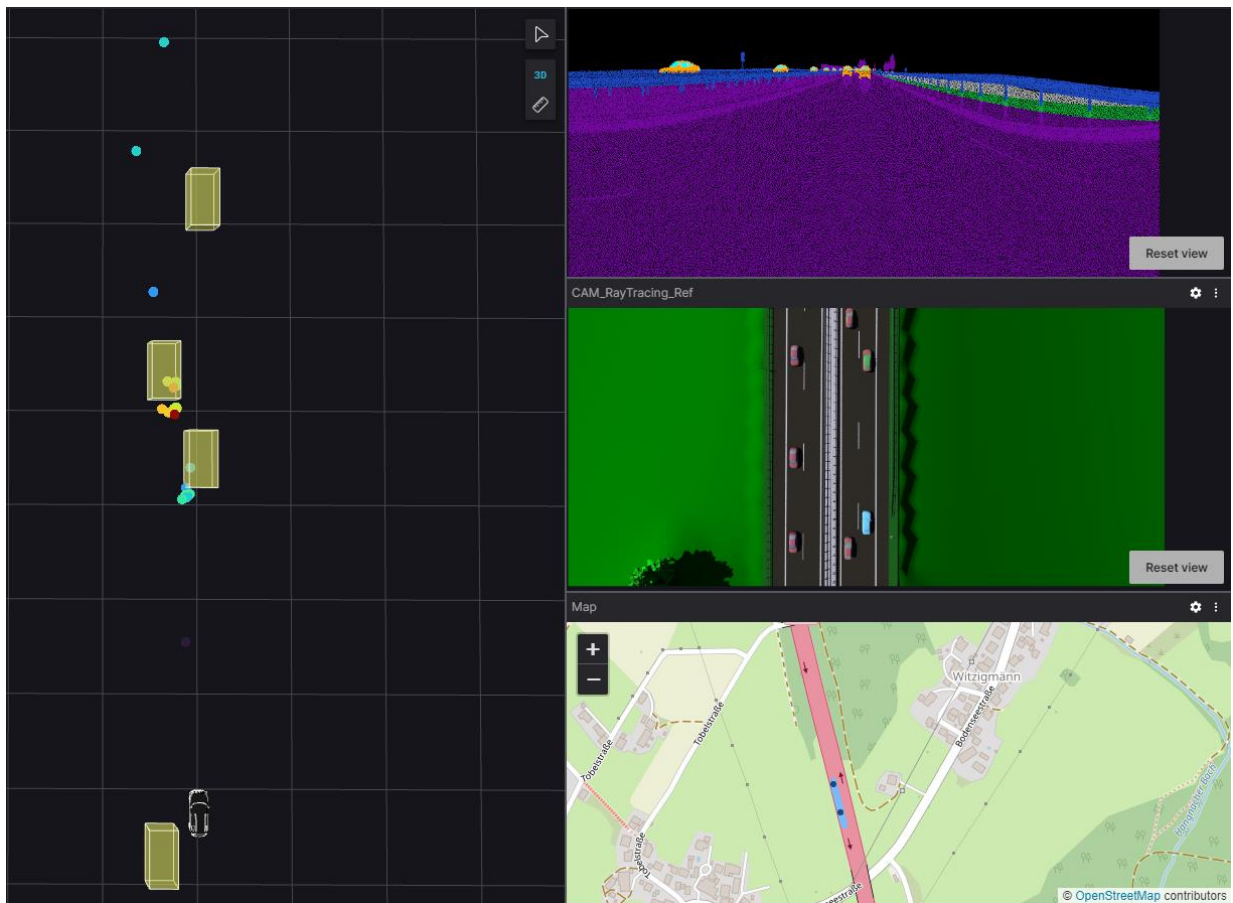


Abbildung 2: Abbildung der virtuellen Autobahnfahrt auf der A96 Richtung Lindau. (Links) Das Ego-Fahrzeug mit dem Front Radar und die berechneten Detektionen die von der Signalverarbeitung geliefert werden anhand des Raytracing-basierten Sensormodells. Die Boxen sind die aus der Simulation extrahierten Ground Truth Objekte (GT). (Rechts Oben) Die Falschfarbendarstellung des Raytracing anhand der zugewiesenen Materialien aus Sicht des Sensors. (Rechts Mitte) Eine vereinfachte Darstellung des Fahrsituation aus der Vogelperspektive. Das Ego-Fahrzeug ist in blau eingefärbt. (Rechts Unten) Darstellung der GPS Position in der aktuellen Momentaufnahme.

Berichtszeitraum: 01.01.2022 – 31.12.2022	Zwischenbericht ADC Automotive Distance Control Systems GmbH	Förderkennzeichen: 16ME0167
---	--	--------------------------------

Grünbrücke

Die Grünbrücke wird hier stellvertretend für weitere ausgetauschte und vermessene Karten verwendet, um auf eine bis dahin unbekannte Herausforderung hinzuweisen. Die Grünbrücke ist eine Wildbrücke auf der A71 und Basis für eine typische Autobahnszene, die für viele Automobilehersteller und -zulieferer von Interesse ist. Es handelt sich hierbei nicht um eine besonders Schwierige Situation oder ungewöhnliche Infrastruktur sondern um eine typisch anzutreffende.

Jedoch wurde festgestellt, dass es selbst bei der Beschreibung des Lastenheftes gewisse Herausforderungen gibt, da bis zu diesem Stand die virtuelle Welt nur im optischen Spektrum operiert und für anderen Technologien wie Radar, Lidar und Ultraschall keine Beschreibung vorliegt, auf die man sich berufen kann. So konnten die bestellten Kartenmaterialien für den optischen Bereich verwendet werden, waren jedoch für den Radar nicht verwendbar oder nur manuell modifiziert einsetzbar. Eine der daraus entstanden Standardisierungsprojekte ist OpenMATERIAL, welches sich nahtlos in die OpenX-Familie einreicht und hier ein einheitliches Format definiert.